

MATERIAL PARTICULADO DISPERSADO AL AIRE POR VEHÍCULOS EN CAMINOS AGRÍCOLAS NO PAVIMENTADOS

Particulate Matter Dispersed by Vehicles Running on Agricultural Unpaved Roads

Juan Pedro Flores Márgez^{1‡}, Manoj K. Sukla², Junming Wang² y Berenice C. Hernández Arratia¹

RESUMEN

Las emisiones de polvo producidos en caminos no pavimentados inician con la pulverización del material superficial de suelo causado por la fuerza de las ruedas de los vehículos, al levantar y exponer el polvo a corrientes fuertes de aire detrás de las ruedas. Los objetivos del proyecto consistieron en demostrar la utilidad de una técnica simple que involucra aparatos rotativos pequeños y cintas adhesivas para coleccionar material particulado (MP) suspendido en el aire que es emitido por el tráfico vehicular, así como llevar a cabo la cuantificación de la masa y comparar los datos de las cintas adhesivas con los datos del muestreador MET-1. Las muestras de MP fueron coleccionadas mediante aparatos rotativos con cintas adhesivas a 1.5, 4.5 y 6 m de altura con base en la superficie del terreno a los lados Este y Oeste de dos caminos agrícolas en el Valle de Juárez, Chihuahua, México. El análisis del suelo de los caminos evaluados mostró que el contenido total de limo y arcilla en promedio fue de $51 \pm 0.7\%$ y el contenido de humedad gravimétrico *in situ* fue de $3.47 \pm 0.3\%$ en el sitio del rancho universitario de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), mientras que en el sitio Rodela fueron de $52 \pm 3.3\%$ y de $2.13 \pm 0.17\%$. La cantidad de MP retenido en las cintas adhesivas se incrementó desde 4.02 mg m^{-3} a 32 km h^{-1} hasta 16.07 mg m^{-3} a 64 km h^{-1} . Los factores de emisión estimados para el total de MP suspendidos fueron 3469 g km^{-1} a 32 km h^{-1} , 3918 g km^{-1} a 48 km h^{-1} y 4271 g km^{-1} a 64 km h^{-1} , respectivamente. La cantidad de partículas medidas por el muestreador MET-1 a 1.5 m sobre la superficie del terreno se incrementó desde 0.08 mg m^{-3} a 32 km h^{-1} hasta 0.14 mg m^{-3} a 64 km h^{-1} en el camino Rodela. Las cintas

adhesivas aportaron información sobre la cantidad de partículas y demostraron su utilidad para caracterizar el MP dispersado en el aire.

Palabras clave: cinta adhesiva, rotores, limo, arcilla, polvo, emisión.

SUMMARY

Dust emission due to vehicular traffic on unpaved rural roads starts with the pulverization of surface material by the force of the wheels, uplifting and exposing road dust to strong air currents behind the wheels. The objectives of the project were to demonstrate the usefulness of a simple technique involving sticky tapes and rotorod samplers for collecting suspended airborne particulate matter (MP) emitted from unpaved road due to vehicular traffic, to carry out the mass accounting and to compare sticky tape data with MET-1 sampler data. Dust samples were collected 1.5, 4.5 and 6 m above the ground surface on the east and west sides of two roads in Valle de Juarez, Chihuahua, Mexico. The soil analysis showed that average total silt and clay content of road dust was $51 \pm 0.7\%$, and *in situ* gravimetric moisture content was $3.47 \pm 0.3\%$ on the "UACJ" road, whereas it was $52 \pm 3.3\%$ and $2.13 \pm 0.17\%$ on the "Rodela" road. Concentration of particles retained on sticky tapes increased on average from 4.02 mg m^{-3} at 32 km h^{-1} vehicle speed to 16.07 mg m^{-3} at 64 km h^{-1} at the "Rodela" site. Emission factors estimated for the total suspended MP were 3469 mg m^{-3} at 32 km h^{-1} , 3918 g m^{-3} at 48 km h^{-1} and 4271 g m^{-3} at 64 km h^{-1} vehicle speed, respectively. The concentrations of particles measured by MET-1 sampler at 1.5 m above soil surface increased from 0.08 mg m^{-3} at 32 km h^{-1} to 0.14 mg m^{-3} at 64 km h^{-1} vehicle speed at the "Rodela" site. Sticky tapes provided information on the amount of particles, and demonstrated the usefulness of sticky tapes for characterizing airborne MP.

Index words: sticky tape, rotors, silt, clay, dust, emission.

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Henry Dunant 4016. 32310 Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

[‡] Autor responsable (juflores@uacj.mx)

² Department of plant and environmental sciences, New Mexico State University. 88003 Las Cruces, Nuevo México.

INTRODUCCIÓN

Material particulado (MP) es un término utilizado para referirse a partículas suspendidas en el aire, debido tanto a causas naturales como por acciones humanas. El tamaño de MP es expresado como el diámetro aerodinámico, el cual se refiere a la unidad de densidad de partículas esféricas con las mismas propiedades aerodinámicas, tales como la velocidad de caída (EPA, 2006). El MP con diámetro aerodinámico $\leq 10 \mu\text{m}$ (MP_{10}) y $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2.5}$) pueden ser emitidas por numerosas fuentes (plantas de energía, fábricas de cemento, fábricas de diverso tipo, volcanes, incendios forestales y pastizales, atomizadores o aerosoles), fuentes no puntuales (camiones, automóviles, actividades agrícolas, caminos de terracería, ranchos ganaderos) y sitios de construcción.

Debido a su densidad y tamaño, en cuanto más pequeña es la partícula, mayor es el tiempo en que permanece en el aire. Como resultado de las velocidades de sedimentación, el MP fino es menor i.e. $\sim 0.01 \text{ cm s}^{-1}$ para una partícula con un diámetro de $2.5 \mu\text{m}$ y densidad de 1 g cm^{-3} (Hatley y Graham, 1980). Estas partículas pueden estar suspendidas en la troposfera por semanas y subsecuentemente pueden ser transportadas a grandes distancias. Las partículas finas son de preocupación e importancia por algunas razones tales como: i) existen evidencias de que las $\text{MP}_{2.5}$ pueden ser depositadas en el fondo de la laringe más que las partículas grandes (Schwartz *et al.*, 1996) y ii) su gran superficie específica tiene alta capacidad para adsorber otros químicos y transportarlos a lugares más bajos por el viento a distancias lejanas. Debido a esos riesgos ambientales y de salud, los MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ están legislados por los estándares de contaminantes de la calidad del aire nacional en los Estados Unidos de América, NAAQS (EPA, 2006). En el Valle de Juárez, Chihuahua, así como en la mayoría de las regiones agrícolas, gran porcentaje de MP es generado por vehículos que viajan en caminos rurales no pavimentados. Sin embargo, se conoce muy poco sobre la cantidad, composición, flujos y distancia de transporte del MP dispersado en los caminos no pavimentados y su contribución a los excedentes del MP_{10} (Holmen *et al.*, 1998; Kuhn *et al.*, 2001; Miller *et al.*, 2005). La mayoría de los caminos no pavimentados consisten de grava, material de caminos compactados generalmente creados de roca madre. Las ruedas de los vehículos causan una fuerza sobre la superficie que provoca una pulverización del material

del camino y lanza partículas tanto por la fuerza generada, como por la ola turbulenta causada al paso del vehículo (EPA, 2006). En Nuevo México (USA), como en la mayoría de las regiones áridas, un porcentaje grande de MP es generado por vehículos que transitan en caminos rurales no pavimentados. Las condiciones secas favorecen la resuspensión de las partículas finas que llegan a estar suspendidas en el aire creando una columna o tolvanera. Las emisiones de polvo en caminos no pavimentados han sido reportados como una función directa de las partículas $< 70 \mu\text{m}$ (Cowherd *et al.*, 1974; Kuhn *et al.*, 2001). Algunos estudios han reportado que las tasas de emisión de MP en caminos no pavimentados están en función de la carga de limo o del tamaño de distribución de las partículas (Cowherd *et al.*, 1990; Kuhn *et al.*, 2001), la velocidad del vehículo (Etyemezian, 2003; Veranth *et al.*, 2003), tamaño del vehículo (Gillies *et al.*, 2003) y contenido de humedad del suelo en la carretera (Etyemezian, 2003). Algunos de estos experimentos fueron realizados mediante el levantamiento de varias torres erguidas y con instrumentos costosos de sistemas de monitoreo del polvo. Existe una necesidad de desarrollar sensores rentables y económicos, los cuales puedan coleccionar una cantidad grande de datos de emisión para cuantificar las variaciones espaciales, composición y MP esparcido que pasan al aire. Estos equipos de muestreo deberán coleccionar suficientes muestras para realizar análisis físicos y químicos simultáneos.

El conocimiento de la variabilidad de estos factores individuales (i.e. grado de compactación y humedad del suelo en caminos no pavimentados, velocidad vehicular, velocidad y dirección del viento, entre otros) y su efecto en las emisiones de MP es crítica para el desarrollo preciso de modelos y de los estándares de calidad del aire. Además, al mejorar la cuantificación de las emisiones de MP en caminos rurales, es posible mejorar el entendimiento de la presencia de las mencionadas partículas sobre el medio ambiente y la salud humana. Por tal motivo, el objetivo principal de éste proyecto consistió en demostrar la utilidad de un método sencillo (rotores y cintas adhesivas) para coleccionar el MP suspendido en el aire dispersado en un camino no pavimentado debido al tráfico vehicular. Así como i) determinar la concentración de MP que pasa al aire a diferentes alturas dispersado por un vehículo que transita a diferentes velocidades, y ii) comparar la concentración de MP detectado en las cintas adhesivas a los datos del MET-1.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio Experimental

Los dos caminos no pavimentados para los experimentos de emisión de MP se localizaron junto al Río Bravo en el Valle de Juárez, Chihuahua. Un sitio se localizó en el rancho de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) a los 31° 21' 10" N y a los 105° 59' 52" O, el otro sitio fue un camino vecinal del rancho Rodela a 31° 21' 27" N y 105° 59' 40" O. Ambos sitios se encuentran a 1060 m de altura y consisten de suelos profundos, bien drenados que fueron formados por aluvión en las planicies sujetas a inundación y por arroyos en terrazas bajas. Los suelos del área son clasificados como Serie Caseta, los cuales se originaron de rocas ígneas, roca caliza y areniscas, texturas pesadas, arcillo-limosas, aluviales muy profundos, color café oscuro y drenaje interno deficiente. A un metro de profundidad la textura cambia de arcilla a arena, suelos con perfil arenoso profundo, topografía plana (CIEPS, 1970) y US-Taxonomy: fine-silty, mixed, calcareous, thermic typic Torrifluvents. Estos suelos son profundos, bien nivelados y de buen drenaje superficial pero no interno. El clima es clasificado como árido, la temperatura media anual es de 16.8 °C con una mínima de -8.6 °C en diciembre y máxima de 38.7 °C en junio, la precipitación media anual de 147 mm distribuida en su mayor parte de junio a septiembre (UACJ, 2007).

Instalación del Experimento

Dos torres construidas con tubos de acero de 1 pulgada de diámetro fueron instaladas en cada lado (Este-Oeste) de un camino no pavimentado y cuatro rotores fueron colocados a 1.5 y 4.5 m sobre la superficie del terreno en cada lado del camino, Este (E) y Oeste (O), E1.5, E4.5, O1.5 y O4.5. Además, tres rotores en la parte más alta de las torres se colocaron a 6 m de altura sobre el camino: TE6, TM6 y TO6. Cada uno de los rotores tuvo dos alas y en cada ala un trozo de cinta adhesiva de 1 × 5 cm adherida a un portaobjetos de vidrio transparente de 1 × 5 cm para atrapar las partículas de polvo (suelo) o MP del aire. Cada rotor fue calibrado antes de iniciar y al final de los experimentos (Figura 1). Un ejemplo de las imágenes de MP en las cintas adhesivas obtenidas con el microscopio electrónico se muestra en la Figura 2 donde

los puntos blancos pequeños son el MP y las burbujas grandes son del material plástico de la cinta.

La velocidad y dirección del viento, humedad relativa y otras variables meteorológicas fueron medidas utilizando un aparato meteorológico portátil estándar (Davis Instruments, model Vantage Pro). Los datos meteorológicos obtenidos del mencionado equipo fueron comparados con los datos registrados en la estación climática local establecida a 1 km de las torres para corroborar la dirección y velocidad del viento principalmente. Los datos meteorológicos promedios por hora incluyendo la temperatura del aire, humedad, velocidad y dirección del viento para los sitios experimentales el día del experimento (12 de febrero de 2008) se presenta en la Figura 3. Ambos caminos sujetos al experimento se aislaron de cualquier otro tráfico aproximadamente una hora antes de iniciar y hasta después de terminar ambos experimentos. Los ensayos fueron realizados mediante el uso de una camioneta tipo Pick Up Chevrolet Silverado 1996 cabina y media, tracción automática, un peso aproximado de 2000 kg, una altura de 1.1 m en la parte trasera, la cual se manejó a tres velocidades: 32, 48 y 64 km h⁻¹, las cuales son frecuentes en caminos no pavimentados y para compararse con otros estudios en condiciones similares. El vehículo se puso en marcha a 100 m al sur de la torre y se detuvo a 50 m al norte de la torre. Las muestras de polvo dispersado se colectaron durante un total de seis minutos después que el vehículo pasó por debajo de la torre y el volumen total del aire muestreado se determinó a partir de las revoluciones por minuto (rpm) conocidas de los rotores, de la circunferencia del área muestreada ($\pi \cdot \text{diámetro del círculo transversal durante una rotación o } \pi \cdot d$) y con base en las dimensiones de las cintas adhesivas (longitud, L y amplitud, w) utilizando la Ecuación 1:

$$\text{Volumen total muestreado min}^{-1} = \pi d L w \text{ rpm}^2 \quad (1)$$

En esta ecuación, la multiplicación por dos se realizó porque se tuvieron dos cintas adhesivas en cada juego por rotor. Dado que cada uno de los ensayos por sitio experimental se realizó durante seis minutos, el total de volumen muestreado para la duración del ensayo se calculó al multiplicar por seis el valor obtenido en la Ecuación 1. Cada una de las cintas adhesivas fue pesada antes y después del experimento para obtener la cantidad total de partículas retenidas y fue utilizado para calcular

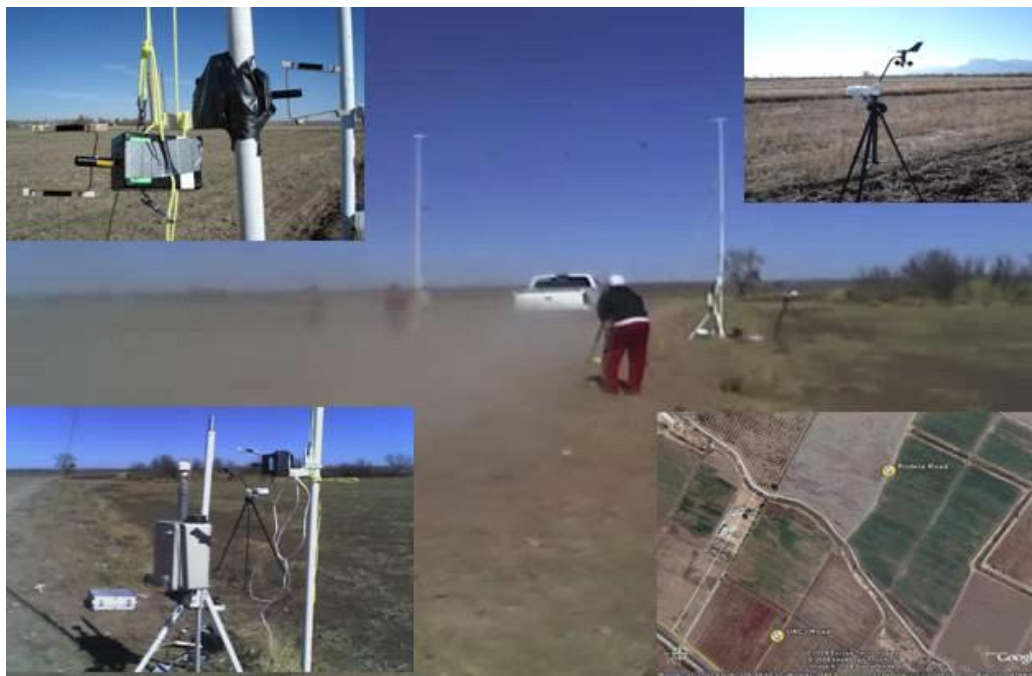


Figura 1. Rotores colgados de la torre (arriba izquierda), estación climática portátil (arriba derecha), muestreador de material particulado (MP) (abajo izquierda), foto de sitios experimentales Google (abajo derecha) y la camioneta corriendo por debajo de la torre y generando la nube de polvo en el camino no pavimentado del Valle de Juárez, Chihuahua, México.

la concentración de material en suspensión en el aire a diferentes alturas y velocidades. Dos muestreadores MET-1 con un monitor/logger GT-640 (Met One Instrument Inc.) fueron colocados a 2 m de distancia en los lados Este y Oeste de la torre en el camino no pavimentado para medir la concentración de material

particulado a 1.5 m de altura. Ambos muestreadores MET-1 tienen contadores de partículas para detectar y medir partículas individuales tan pequeñas como $0.3 \mu\text{m}$ de diámetro. Ambos muestreadores fueron ajustados con un dispositivo el cual permitió sólo partículas $\leq 2.5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2.5}$). La cantidad total de emisión de material

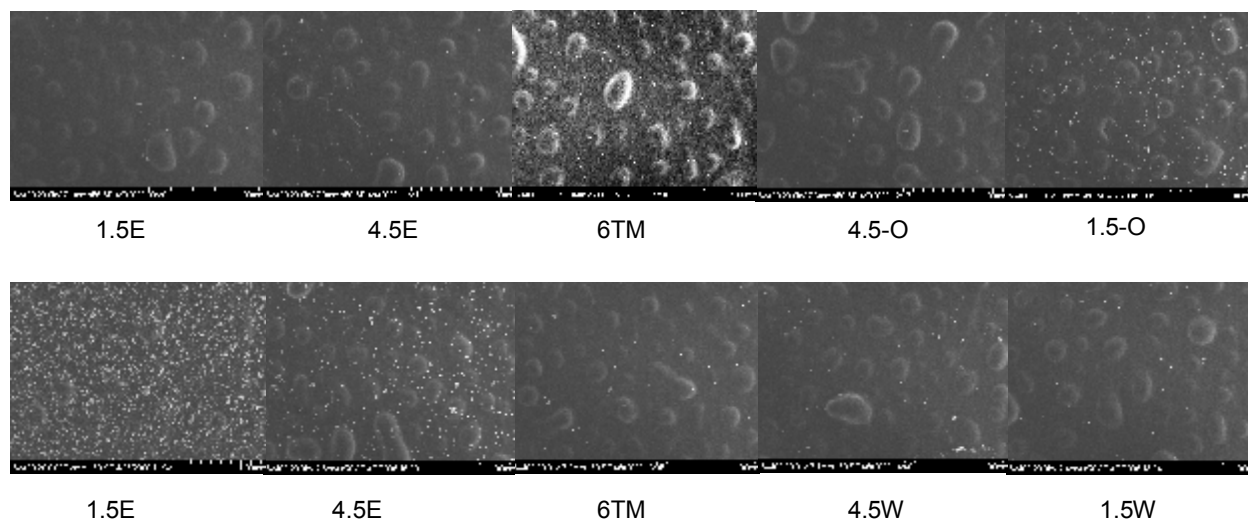


Figura 2. Imágenes de material particulado (MP) generadas por el microscopio electrónico de partículas de polvo retenidas en las cintas adhesivas a diferentes alturas de las torres en UACJ (superior) y Rodela (inferior) para una velocidad de 48 km h^{-1} . E = lado este, TM = torre parte media y O = oeste.

particulado suspendido (PE) para los sitios estudiados en caminos no pavimentados (libras por milla recorrida del vehículo) fue también estimada con la siguiente ecuación propuesta por la EPA (2006) y los valores de la Ecuación 2 fueron posteriormente convertidos a g por vehículo por km:

$$PE = \frac{k \left(\frac{s}{12} \right)^a \left(\frac{S}{30} \right)^d}{\left(\frac{M}{0.5} \right)^c} - C \tag{2}$$

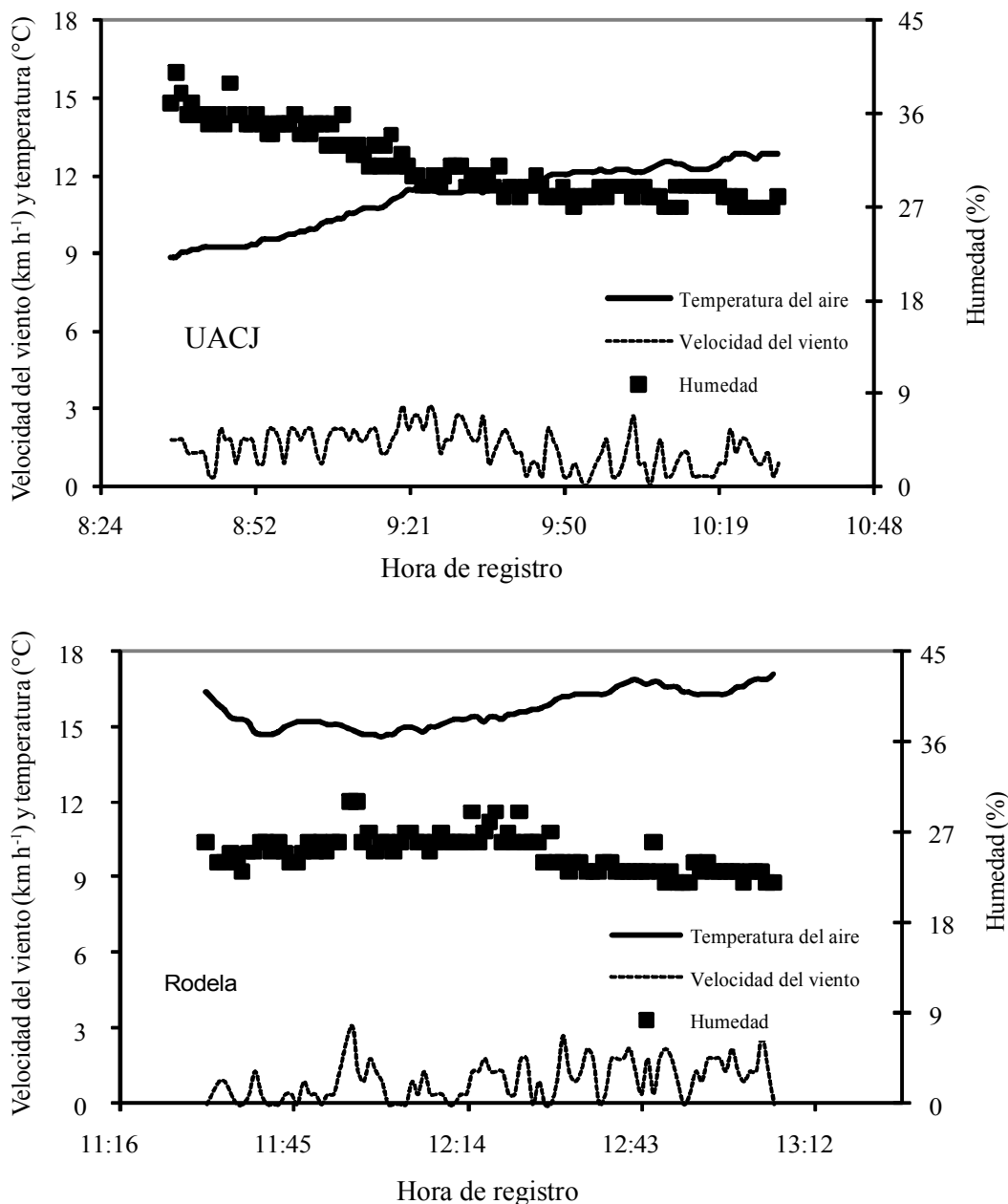


Figura 3. Condiciones meteorológicas promedio incluyendo temperatura del aire (°C), humedad (%) y velocidad del viento (km h⁻¹) el 12 de febrero de 2008 en los sitios de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y Rodela durante el experimento.

Donde k , a , c y d son constantes y fueron obtenidos a 6.0, 1, 0.3, 0.3, respectivamente para un MP suspendido total de un camino público (EPA, 2006); donde s es el contenido promedio de limo para un camino no pavimentado (%); S es la velocidad promedio del vehículo (millas por hora); M es el contenido de humedad y C es un factor de emisión de partículas (0.00047 libras por milla recorrida del vehículo).

Propiedades del Suelo en un Camino no Pavimentado

Al final de los experimentos se recolectaron siete muestras de suelo a una profundidad de 2 cm en lugares separados a 2 m de distancia en cada uno de los dos caminos no pavimentados evaluados. Las muestras se utilizaron para determinar la distribución del tamaño de partículas utilizando el procedimiento de Gee y Bauder (1986). También se analizó el porcentaje de humedad del suelo, pH mediante un electrodo Pinchale Corning 530, conductividad eléctrica con un conductivímetro Orion 3 Star. Ambos parámetros, pH y sales solubles, fueron analizados en extracto de pasta de saturación del suelo (Rohades, 1996). Nitrógeno total Kjeldahl fue determinado mediante un método de digestión descrito por Bremner (1996). El fósforo inorgánico fue determinado mediante el método Olsen con bicarbonato de sodio como extractante y utilizando un espectrofotómetro Genesys 20 (Olsen y Sommers, 1982). Las variaciones en las propiedades del suelo fueron frecuentemente expresadas con un intervalo del coeficiente de variación (CV) de diferentes clases: mínimo (<15%), moderado (15 a 35%) y máximo (>35%) (Wilding, 1985; Shukla *et al.*, 2004).

Análisis por Microscopio Electrónico

Las imágenes para observar las partículas retenidas en las cintas fueron creadas utilizando un microscopio electrónico de barrido (HITACHI, S-3400N). Cuatro imágenes se tomaron de cada cinta adhesiva en su parte media con un ligero traslape entre las imágenes. También se creó una laminilla por separado para cada altura del muestreo con el microscopio electrónico para los sitios UACJ y Rodela para la velocidad vehicular de 48 km h⁻¹.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Físicas y Químicas de Suelo en un Camino no Pavimentado

La distribución del tamaño de partículas para el sitio UACJ varió entre 47 y 51% de arena, entre 48 y 53%

de limo y entre 0 y 0.4% de arcilla en 2 cm de profundidad del suelo, lo cual indica una clara dominancia de partículas mayores (Cuadro 1). El coeficiente de variación para los contenidos de arena y limo fue de 4%, lo cual de acuerdo al criterio sugerido por Wilding (1985) puede ser caracterizado como bajo. El camino Rodela mostró de 47 a 53% de arena, 33 a 53% limo y 0 a 16% de arcilla. El coeficiente de variación para los contenidos de arena, limo y arcilla fue de 4% (bajo), 20% (moderado) y 70% (alto). Las partículas más finas en los sitios de estudio constituyeron cerca de 51% de todas las partículas primarias. El contenido de humedad de las muestras de suelo colectadas varió entre 2 y 5% (CV = 20%) en UACJ y de 1 a 3% (CV = 22%) en Rodela indicando que el suelo del camino fue bastante seco durante el experimento debido a las condiciones climáticas muy secas prevalecientes.

El pH del suelo del camino varió ligeramente de 7.2 a 7.4 (CV = 1%) en UACJ y de 7.6 a 8.3 (CV = 3%) en el sitio Rodela, los valores de pH >7 estuvieron acordes con los suelos de zonas árida (Cuadro 1). La conductividad eléctrica (CE) fue también baja y varió de 1.2 a 1.4 dS m⁻¹ (CV = 8%) en UACJ y de 0.2 a 0.9 dS m⁻¹ (CV = 63%) en Rodela. El nitrógeno total Kjeldahl varió de 0.572 a 1.131 g kg⁻¹ (CV = 25%) para UACJ y de 0.48 a 0.612 g kg⁻¹ (CV = 9%) para el sitio Rodela. Los datos físicos y químicos mencionados se pueden relacionar con la dispersión de MP, aunque en ambos sitios el contenido de arcilla, humedad del suelo, NTK y CE fueron bajas, el contenido de limo, arena y fósforo extractable Olsen fueron mayores en el suelo Rodela que en UACJ, atribuido a que este sitio tiene mayor tráfico vehicular como camino rural, mientras que el sitio UACJ corresponde a un camino de exclusiva actividad agrícola dentro del rancho universitario.

Cuantificación de la Masa de las Partículas de Suelo

El promedio de las revoluciones por minuto (rpm) de los rotores fue 1495±12.02 y presentó baja variabilidad (CV = 2.3%) con un promedio de 1495±34 rpm. El experimento en UACJ se inició a las 8:30 y se prolongó hasta las 10:30 el 12 de febrero de 2008. Las condiciones atmosféricas registradas aproximadamente a 2 m al Oeste de la torre, mostró que el promedio de la dirección del viento durante el ensayo fue sureste, el promedio de velocidad del viento fue 1.45±0.72 km h⁻¹ y la humedad relativa fue de 30.67±3.31% (Figura 3). El experimento en Rodela inició a las 12:05 y concluyó a la 13:10 del

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos para algunas propiedades físicas y químicas del suelo colectadas en caminos agrícolas no pavimentados de los sitios Universidad Autónoma de Ciudad Juárez y Rodela, Praxedis, Giner Guerrero, Chihuahua, México.

Estadísticos	Arena	Limo	Arcilla	pH	Conductividad eléctrica	Nitrógeno Total	Fósforo
	- - - - - % - - - - -				dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
	UACJ						
Media	48.79	51.15	0.05	7.32	1.30	0.782	49.99
Error estándar	0.68	0.71	0.05	0.03	0.03	0.073	20.43
Mediana	49.08	50.92	0.00	7.32	1.29	0.752	22.17
Moda	47.08	52.92	0.00	7.32	1.29	0.572	12.27
Desviación estándar	1.8	1.88	0.14	0.08	0.08	0.193	54.06
Coefficiente de variación	0.04	0.04	2.65	0.01	0.06	0.25	1.08
Curtosis	-1.82	-1.68	7.00	1.88	0.58	0.77	0.03
Simetría	0.35	-0.43	2.65	-0.96	0.49	0.83	1.35
Rango	4.00	4.36	0.36	0.24	0.25	0.559	132.59
Mínimo	47.08	48.56	0.00	7.18	1.18	0.572	12.27
Máximo	51.08	52.92	0.36	7.42	1.44	1.131	144.87
	Rodela						
Media	49.00	40.97	10.03	7.98	0.39	0.549	97.00
Error estándar	0.79	3.10	2.67	0.10	0.09	0.018	25.85
Mediana	49.08	37.28	13.64	7.98	0.31	0.558	76.56
Moda	47.08	33.28	13.64	7.56	0.17	0.480	21.89
Desviación estándar	2.09	8.2	7.07	0.27	0.24	0.048	68.4
Coefficiente de variación	0.04	0.2	0.70	0.03	0.63	0.09	0.71
Curtosis	2.16	-1.06	-1.06	-0.77	2.65	-1.09	3.52
Simetría	1.35	0.96	-0.99	-0.44	1.59	-0.21	1.65
Valor	6.00	19.64	16.36	0.77	0.71	132.01	215.11
Mínimo	47.08	33.28	0.00	7.56	0.17	0.480	21.89
Máximo	53.08	52.92	16.36	8.33	0.88	0.612	236.99

mismo día. Las condiciones atmosféricas registradas durante el experimento indican que el promedio de la dirección del viento fue sureste y varió de sur a suroeste, el promedio de velocidad del viento fue de 0.92 ± 0.76 km h⁻¹ y la humedad relativa promedio fue de $24 \pm 1.87\%$. Durante el proceso experimental no se observó precipitación pluvial. Por lo tanto, las condiciones atmosféricas fueron similares y estables durante ambos experimentos.

La altura de la onda turbulenta detrás de las ruedas del vehículo fue registrada por una cámara de video digital en UACJ a 1.23 m, 1.35 m y 1.50 m por encima del terreno (1.03, 1.13 y 1.25 veces la altura del vehículo) para 32, 48 y 64 km h⁻¹ de velocidades del vehículo, respectivamente. En el sitio Rodela, la altura fluctuó de 1.56 m, 2.04 m y 3.36 m sobre la superficie del terreno (1.3, 1.7 y 2.8 veces la altura del vehículo) para 32, 48 y 64 km h⁻¹ de velocidad. La altura de la nube turbulenta fue más alta en Rodela que en UACJ. Así, la altura

inyectada de polvo se pudo observar como una función de la velocidad del vehículo y de la cantidad y tamaño de las partículas. En contraste, Veranth *et al.* (2003) han reportado que la altura de una onda turbulenta fue de 1.7 veces la altura del vehículo.

Williams *et al.* (2008) también reportaron que la altura de la onda turbulenta presentó rango de 2 a 3.5 m sobre la superficie del terreno (1.1 y 1.9 veces la altura del vehículo). La altura impulsada es importante porque al aumentar la altura de inyección o dispersión, disminuye la posibilidad de que una partícula sea depositada dentro de un tiempo dado. Algunas de las partículas fueron mayores de 10 µm, los factores de emisión estimados para el total de MP suspendidos a partir de la Ecuación 2 fueron 3469, 3918 y 4271 g por vehículo por km recorrido a 32, 48 y 64 km h⁻¹, respectivamente. Los volúmenes totales muestreados durante cada experimento fueron similares con un promedio de 1.05 ± 0.02 m³ para velocidad de 32 km h⁻¹, 1.04 ± 0.05 m³ para 48 km h⁻¹

y $1.06 \pm 0.04 \text{ m}^3$ para 64 km h^{-1} . La concentración de partículas de polvo en las cintas adhesivas fue calculada al dividir el peso de partículas colectadas en las cintas adhesivas por el volumen muestreado por minuto.

La cantidad de partículas retenidas en las cintas adhesivas sobre la torre a 1.5 y 6 m del lado Este y en la parte Oeste de la torre a 32 km h^{-1} fueron mayores que aquellas colectadas en TO6 y O1.5 en UACJ. Las diferencias en concentraciones de partículas fueron más pequeñas entre el este, parte más alta, y al oeste de la torre a diferentes alturas para las velocidades vehicular de 48 a 64 km h^{-1} . Los promedios de concentraciones de polvo medidos en las cintas adhesivas fueron 8.55 mg m^{-3} para la velocidad de 32 km h^{-1} (Figura 4). Sin embargo, las concentraciones fueron ligeramente menores para las velocidades vehiculares de 48 km h^{-1} (3.44 mg m^{-3}) y 64 km h^{-1} (3.91 mg m^{-3}). La falta de diferencia en las concentraciones de partículas retenidas en las cintas adhesivas para las velocidades altas fue debido a la baja cantidad de polvo presente en el camino del sitio UACJ.

El camino no pavimentado en UACJ no es de uso frecuente porque está en el interior de un rancho agrícola, es decir no está sujeto a pulverización del camino debido al tráfico vehicular como el camino del sitio Rodela.

La cantidad de partículas de polvo en las cintas adhesivas fueron mayores en el Este y Oeste de la torre a 1.5 m de altura para 32 km h^{-1} de velocidad en el camino Rodela. Las concentraciones de partículas en las alturas 4.5 m y 6 m fueron similares (Figura 3). Al aumentar la velocidad del vehículo a 48 km h^{-1} se incrementaron las concentraciones al Este y Oeste de la torre a 4.5 m de altura. Para la velocidad del vehículo a 64 km h^{-1} , la concentración de partículas del polvo se incrementó a los 6 m de altura (TE6, TM6 y TO6). Además, cantidades grandes de partículas de polvo fueron también retenidas a E4.5 y O1.5. Incrementar la velocidad del vehículo, también se incrementó la amplitud y altura de la nube de polvo en el camino Rodela. Las concentraciones promedio de polvo medidas en las cintas adhesivas fueron 4.02 mg m^{-3} para una velocidad de 32 km h^{-1} , 6.22 mg m^{-3} para 48 km h^{-1} y 16.07 mg m^{-3} para 64 km h^{-1} . El sitio Rodela ha tenido mucho más tráfico pesado y ha estado sujeto a la pulverización del suelo y a la fuerza impartida por las llantas en el rodamiento al moler las partículas gruesas y convertirlas en más finas. El contenido de arcilla del camino también se incrementó hasta 16% y tuvo una mayor emisión

de polvo que en el sitio UACJ, lo cual fue de acuerdo con el alto tráfico del camino. Al incrementar la velocidad del vehículo, se colectaron más partículas de polvo en las cintas adhesivas a TE6, TM6 y TO6, pero las concentraciones de partículas en cada uno de los tres lugares a los 6 m de altura de la torre fueron similares a las tres velocidades. Durante estos experimentos, los cambios en velocidad y dirección del viento, y humedad relativa fueron bajos. De esta manera, nuestra hipótesis fue aceptada en que el principal mecanismo de conducción para el esparcimiento vertical y horizontal de la nube de polvo fue al incrementarse la velocidad del vehículo. Incrementos en la emisión de partículas de polvo al aumentarse las velocidades también han sido reportadas Kuhn *et al.* (2005) y Williams *et al.* (2008). Dyck y Stukel (1976) también reportaron una relación lineal entre la emisión de polvo, la velocidad del vehículo y el contenido de limo.

Las emisiones de polvo en carreteras de caminos no pavimentados son generalmente reportadas con base en sus cargas de limo: $< 70 \mu\text{m}$ (EPA, 1999). Las imágenes desarrolladas por el microscopio electrónico también muestran que la mayoría de las partículas de polvo retenidas en las cintas adhesivas son del tamaño de limo (Figura 2). Se observó que algunas partículas podrían ser clasificadas como limo grueso y estas fueron retenidas en las cintas adhesivas a 1.5 y 4.5 m de altura. De tal forma que la variación fue consistente con la distribución del tamaño de partícula de las muestras de suelo (polvo). La acción de pulverización debido a la fuerza de las ruedas en el camino durante el recorrido del vehículo puede cambiar la distribución del tamaño de partícula del polvo del camino e incrementar la proporción de limo y otras partículas de tamaño más finas. Dado que las partículas de tamaño grande no pueden verse en las Figuras generadas por el microscopio electrónico, es posible que estas partículas fueran decantadas o cayeron más rápido fuera de la suspensión antes de alcanzar la torre localizada en ambos lados del camino. También es probable que esas partículas fueran demasiado grandes para permanecer pegadas a las cintas adhesivas. Aunque las cintas adhesivas no miden estas partículas de mayor tamaño conviene aclarar que estas partículas no tienen influencia significativa en contaminación atmosférica o en la salud como lo representan el $\text{MP}_{2.5}$ y MP_{10} .

El muestreador MET-1 localizado a 2 m de distancia del camino no pavimentados en la dirección del viento mostró un pico en la concentración inmediatamente

después de que el vehículo pasó la torre. Los análisis de partículas de polvo colectadas a 1.5 m de altura por el sensor MET-1 mostraron que durante los experimentos en UACJ, las concentraciones a E1.5 se incrementaron al aumentar la velocidad del vehículo de 32 a 48 km h⁻¹

(Figura 4). Las concentraciones de polvo a O1.5 permanecieron casi sin cambio a través del experimento al aumentarse la velocidad del vehículo. Esto fue acorde al bajo contenido de arcilla, alta humedad, dirección del viento hacia el este y bajas cantidades de polvo

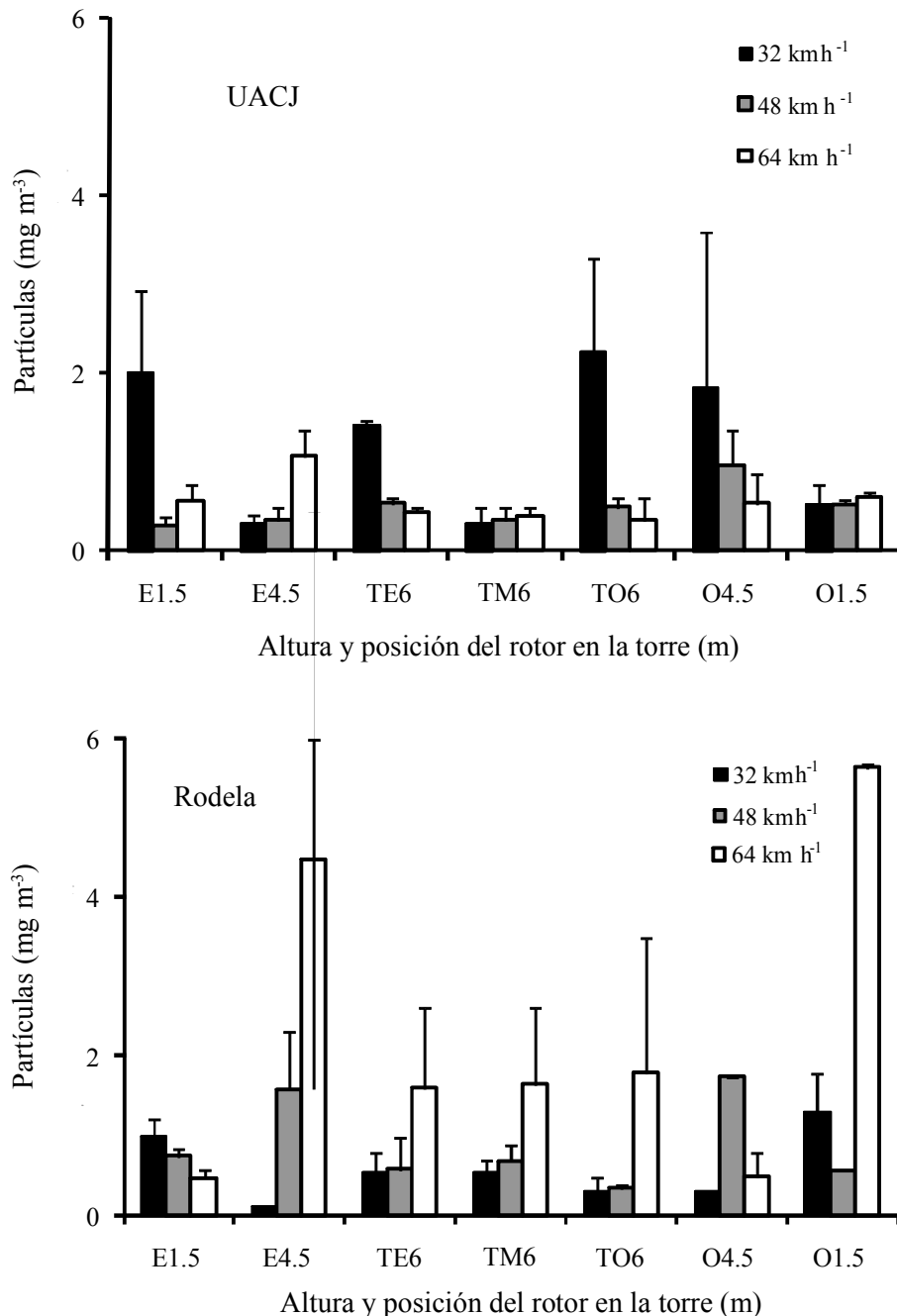


Figura 4. Análisis de las cintas adhesivas para determinar el promedio y desviación estándar de las cantidades de partículas en las cintas adhesivas a diferentes alturas sobre la superficie del terreno y diferentes velocidades del vehículo. E = lado Este y O = lado Oeste de la torre, E1.5 (o O1.5) indica las cintas adhesivas en el lado Este u Oeste de la torre a 1.5 m sobre el nivel del terreno; E4.5 (o O4.5) indica las cintas adhesivas en el lado este u Oeste de la torre a 4.5 m sobre el nivel del terreno; y TE6 (TM6 y TO6) indica las cintas adhesivas en la parte más alta (Este, Medio, Oeste) de la torre a 6 m sobre el nivel del terreno. UACJ = Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

detectados en el camino UACJ. Las concentraciones de polvo se incrementaron solo a 1.5 m cuando la velocidad del vehículo aumento de 32 a 48 km h⁻¹ y ligeramente disminuyó cuando la velocidad se incrementó a 64 km h⁻¹. Esto indica que la nube de polvo no se elevó mucho y esto podría haber sido la razón de la concentración de partículas en las cintas adhesivas

ubicadas a 6 m de altura y los nulos incrementos al aumentar la velocidad del vehículo en el camino UACJ.

En el sitio UACJ, la cantidad medida por el muestreador MET-1 en el punto E1.5 incrementó de 0.07 mg m⁻³ a 32 km h⁻¹ hasta 0.12 mg m⁻³ a 48 km h⁻¹, pero al aumentarse más la velocidad causó una baja ligera de concentración a 0.11 mg m⁻³ (Figura 5). Estos

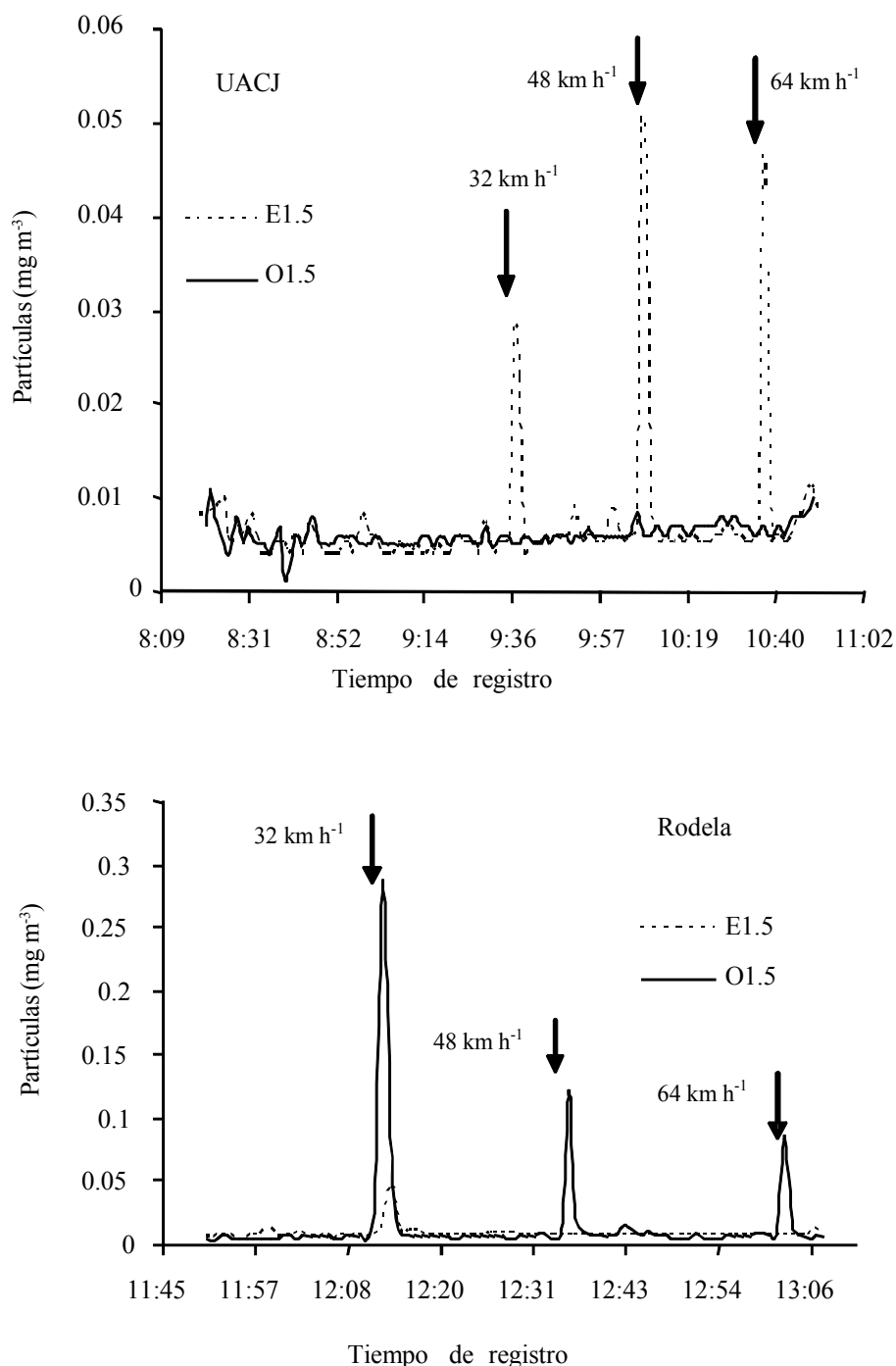


Figura 5. La cantidad de partículas (mg m⁻³) colectadas por el muestreador MET-1 ubicado al Este y Oeste de los caminos a 1.5 m sobre el nivel del terreno.

resultados son consistentes con los datos de las cintas adhesivas y muestran que la nube de polvo no se dispersó en dirección vertical al aumentarse las velocidades. En el sitio del camino Rodela, la concentración total registrada por el muestreador MET-1 fueron de 0.08 mg m^{-3} a 32 km h^{-1} , 0.16 mg m^{-3} a 48 km h^{-1} y 0.13 mg m^{-3} a 64 km h^{-1} . Las cantidades pico registradas por el muestreador MET-1 en el camino Rodela también declinaron de 0.29 mg m^{-3} a 0.09 mg m^{-3} cuando las velocidades del vehículo se incrementaron de 32 a 64 km h^{-1} . Estos resultados indican que a medida que se aumentó la velocidad del vehículo, también se incrementó la dispersión de MP_{10} y más se emitieron al aire y alcanzaron alturas mayores, de tal forma que no pudieron ser capturadas por el muestreador MET-1 ubicado a 1.5 m sobre la superficie del terreno. En general, con el presente estudio se ha demostrado la utilidad de las cintas adhesivas para determinar las concentraciones de PM al variar la velocidad vehicular. Deberían realizarse más experimentos con diferente tipo de vehículos, condiciones de suelo y humedad en caminos no pavimentados para un más completo entendimiento del potencial de las cintas adhesivas para el mapeo y caracterización de PM emitidas al aire en caminos no pavimentados o terracería.

CONCLUSIONES

El contenido de arcilla más limo de ambos caminos no pavimentados fue de 51% y el contenido de humedad del suelo $< 5\%$. Solamente los tamaños de partículas arcilla y limo fueron retenidas en las cintas adhesivas a las tres alturas evaluadas, mientras que la arena fina no es retenida y se deposita a menos distancia, además de que esta tiene menor impacto en la calidad del aire. La altura de inyección se observó como función de la velocidad del vehículo, y la cantidad y tamaño de las partículas de polvo. La altura y amplitud de la nube de polvo se incrementó con la velocidad del vehículo en el camino no pavimentado Rodela. A mayor velocidad del vehículo también se incrementó la concentración de partículas retenidas en las cintas adhesivas especialmente en el sitio Rodela. El factor de emisión estimado para los materiales particulados (PM) totales suspendidas fueron de 3469 , 3918 y 4271 g por vehículo por km recorrido a 32 , 48 y 64 km h^{-1} de velocidad del vehículo, respectivamente. La concentración total de MP a diferentes alturas en las cintas adhesivas fue siempre

más alta que el muestreador MET-1 a 1.5 m , lo cual confirma las ventajas de las cintas adhesivas. En general, este estudio demostró la utilidad, de las cintas adhesivas para el mapeo y caracterización de MP emitido al aire en caminos no pavimentados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a New Mexico State University Agriculture Experiment Station, Las Cruces, NM 880005 por el apoyo brindado. Esta investigación fue financiada por Southwest Center for Environment Research and Policy (SCERP). Un agradecimiento al personal del laboratorio de microscopía electrónica, especialmente al Sr. Rami Al Khatib por su apoyo y atención en el análisis de las laminillas en su laboratorio.

LITERATURA CITADA

- Bremner, J. M. 1996. Nitrogen total. pp.1085-1121. *In*: D. L. Sparks (ed.). Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. ASA and SSSA Book series No. 5. Madison, WI, USA.
- CIEPS, S. C. (Consejo de Investigación y Evaluación de la Política Social, Servicios del Consejo). 1970. Estudio de factibilidad técnica, económica, social y financiera en la rehabilitación del Distrito de Riego. Tomo II. Anexo A. Secretaria de Recursos Hidráulicos. Estudio geohidrológico del Valle de Juárez, Chihuahua, Mexico.
- Cowherd, C. Jr., K. Axetell, C. M. Guenther, and G. A. Jutze. 1974. Development of emission factors for fugitive dust sources, EPA-450/3-74-037, U. S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC, USA.
- Dyck, R. I. J. and J. J. Stukel. 1976. Fugitive dust emissions from trucks on unpaved roads. Environ. Sci. Technol. 10: 1046-1048.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1999. Compilation of air pollutant emission factors. Volume I: stationary point and area sources. U.S. EPA office of Air and Radiation. Research Triangle Park, NC, USA.
- EPA (Environmental Protection Agency). 2006. Unpaved roads. U.S. EPA office of Air and Radiatio. Research Triangle Park, NC, USA.
- Etyemezian, V., H. Kuhn, M. Gillies, M. Green, M. Pitchford, and J. Watson. 2003. Vehicle based road dust emissions measurements (I): methods and calibration. Atmo. Environ. 37: 4559-4571.
- Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. pp.383-412. *In* : A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. ASA Monograph No. 9. Madison, WI, USA.
- Gillies, J., V. Etyemezian, H. Kuhn, D. Nikolic, and D. Gillette. 2003. Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions. In proceedings of 12th International Symposium, "Transport and Air Pollution". Vol 1, Inrets, ed. Arcucil, France, 51-58.
- Hartley, G. S. and I. J. Graham-Bryce. 1980. Physical principles of pesticide behavior. Academic Press. London, England.

- Holmen, B. A., W. E. Eichinger, and R. G. Flocchini. 1998. Application of elastic lidar to PM₁₀ emissions from agricultural nonpoint sources. *Environ. Sci. Technol.* 32: 3068-3076.
- Kuhns, H., V. Etyemezian, D. Landwehr, C. MacDougall, M. Pitchford, and M. Green. 2001. Testing re-entrained aerosol kinetic emissions from roads (TRAKER): A new approach to infer silt loading on roadways. *Atmos. Environ.* 35: 2815-2825.
- Miller, D. R., A. Hiscox, B. A. Holmen, W. Yang, T. Sammis, and R. Bottoms. 2005. Aerosol plumes emitted from planting operations measured with LIDAR. 2005 ASAE Annual meeting. paper number 054050. Tampa, FL, USA.
- Olsen, S. R. and L.E. Sommers. 1982. Methods of soil analysis, Part 2. pp. 403-430. *In: A. L. Page et al.* (ed). Agronomy monograph 9, ASA and SSSA. Madison, WI, USA.
- Rohades, J. D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. pp.417-435. *In: D. L. Sparks* (ed.). Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. ASA and SSSA Book series No. 5. Madison, WI, USA.
- Shukla, M. K., R. Lal, and M. Ebinger. 2004. Principal component analysis for predicting biomass and corn yield under different land uses. *Soil Sci.* 169: 215-224.
- Schwartz, J., D. W. Dockery, and L. M. Neas. 1996. Is daily mortality associated specifically with fine particles?. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 46: 927-939.
- UACJ (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez). 2007. Centro Meteorológico de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Registros climáticos del rancho universitario 2003-2007. www.uacj.mx (Consulta: febrero 17, 2008).
- Veranth, J. M., E. R. Pardyjak, and G. Seshadri. 2003. Vehicle generated fugitive dust transport: analytic models and field study. *Atmos. Environ.*, 37: 2295-2303.
- Wilding, L. P. 1985. Spatial variability: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys. pp. 166-194. *In: D. R. Nielsen and J. Bouma* (eds.). Soil spatial variability. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Williams, D. S., M. K. Shukla, and J. Ross. 2008. Mapping airborne particulate matter emitted by a vehicle running on unpaved road. *Atmos. Environ.* 42: 3899-3905.