

**MATERIAL PARTICULADO DISEMINADO AL REALIZAR
DOS TIPOS DE LABRANZA EN UN SUELO AGRÍCOLA
DEL VALLE DE MESILLA, NUEVO MÉXICO**
**Particulate Matter Generated During Disking and Plowing in an Agricultural Soil
of Mesilla Valley, New Mexico**

Manoj K. Shukla¹ y Juan Pedro Flores Márquez^{2,‡}

RESUMEN

Las actividades agrícolas durante la preparación del terreno son una fuente importante de diseminación de material particulado (MP). Los objetivos del presente estudio fueron evaluar la dispersión de MP causada por actividades de labranza del suelo con diferentes implementos y velocidades del tractor, así como relacionar la dispersión de MP con las propiedades físicas del suelo. El suelo fue cultivado con algodón durante 2008 y se dividió en seis parcelas de 5 × 20 m. Las actividades de labranza fueron rastreo con disco y con arado de cincel, a dos velocidades del tractor (4.8 y 6.5 km h⁻¹). Se utilizaron tres muestreadores para medir el MP diseminado al aire en cada tratamiento. Se concluyó que una menor resistencia a la penetrabilidad y baja humedad del suelo contribuyeron a mayor MP dispersado en el rastreo con disco, mientras que la dispersión de MP con arado de cincel en condiciones similares, de baja humedad del suelo, podría estar más influenciada por la resistencia del suelo a la penetrabilidad y por la densidad aparente, lo cual puede explicarse a que el arado es a mayor profundidad de suelo que el rastreo. Se detectó efecto significativo del método de labranza y la velocidad del tractor en la dispersión de MP, lo cual fue favorecido por la predominancia de partículas finas del suelo (limo y arcilla), con un nivel de compactación intermedio y baja velocidad del viento. La concentración mayor de MP (1.272 ± 0.855 mg m⁻³) fue cuando se utilizó la rastra de discos a 6.5 km h⁻¹ de velocidad del tractor, seguido por el mismo implemento a 4.8 km h⁻¹, mientras que el arado de cincel mostró

concentraciones más bajas. La dispersión de MP en suelos agrícolas no solo depende de la velocidad del tractor y tipo de implemento de labranza, sino también de una menor penetrabilidad y baja humedad en suelos de textura intermedia, lo cual podría tener utilidad en estudios de erosión durante vientos fuertes y formación de tolvaneras, o bien implicaciones en la salud humana durante la exposición de los trabajadores de campo al MP dispersado al aire.

Palabras clave: *resistencia a la penetrabilidad, polvo, preparación de suelo, implemento agrícola.*

SUMMARY

Agriculture is an important source of airborne particulate matter (PM). The objectives of this study were to measure PM emissions due to some agricultural operations and relate PM emission to soil physical properties. The agriculture field for the PM emission experiment was located at Plant Sciences Research Center (PSRC) of New Mexico State University about 12 km south of Las Cruces in the Messiah Valley, Dona Ana County of NM along the Rio Grande River (32° 11' 35.84" N and 106° 44' 08.75" W). A field planted to cotton during 2007 was subdivided into six plots 5 m by 20 m, separated by a 5 m × 5 m strip. The plots were disked using a Massey Ferguson disk plow and chiseled by a Johnson plow. The tillage operations were conducted at two speeds with average tractor speeds of 4.8 and 6.5 km h⁻¹, respectively. Three samplers were used to measure the MP dispersed in air at each treatment. All six plots displayed low variability in sand, silt and clay contents, antecedent soil moisture content as well as penetration resistance. In conclusion, under disking conditions the low resistance to penetration and low soil moisture contributed to high MP dispersion. Significant effect on MP dispersion was detected for tillage method and tractor speed and was favored by large amounts of fine soil particles (clay and silt),

¹ Department of Plant and Environmental Sciences, New Mexico State University. 88003 Las Cruces, Nuevo Mexico.

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Plutarco Elías Calles 1020, Fovissste Chamizal. 32310 Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

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

Recibido: agosto de 2013. Aceptado: mayo de 2014.

Publicado como nota de investigación en
Terra Latinoamericana 32: 241-249.

an intermediate compaction level, and low wind speed. Disk plowing overturns the soil from deeper depths than chisel plowing. The higher concentration of MP ($1.272 \pm 0.855 \text{ mg m}^{-3}$) was caused by disking at 6.5 km h^{-1} tractor speed followed by the same tillage method at 4.8 km h^{-1} , while the chisel plowing method resulted in lower concentrations. MP dispersion in agricultural soils depends on tractor speed and soil moisture for intermediate soil textures. MP emission can be useful for soil erosion studies during dust storms, or its implications for human health during field workers' exposure to MP dispersed to air.

Index words: *resistance to penetration, dust dispersed, soil preparation, tillage.*

INTRODUCCIÓN

Las prácticas agrícolas relacionadas con el manejo del suelo, como la preparación del terreno, son una fuente importante de dispersión de Material Particulado (MP) al aire. Sin embargo, es limitada la información disponible relacionada con las emisiones de partículas finas menores a $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2.5}$) y más gruesas (2.5 a $10 \mu\text{m}$, MP_{10}), cuando se realizan diferentes actividades con maquinaria e implementos agrícolas, los cuales generan polvos en función de las características del suelo y factores climáticos; además, hay duda sobre la contribución real de las actividades agrícolas a las emisiones totales de MP a la atmósfera (Holmen *et al.*, 2008; Madden *et al.*, 2009).

El contenido de arcilla, más que arena o limo, representa un indicador del potencial del suelo para generar MP_{10} en suelos agrícolas del Valle de San Joaquín, California (Carvacho *et al.*, 2001). La exposición a partículas totales en una cabina abierta de maquinaria en sitios de trabajo agrícola varía de 2 a 20 mg m^{-3} , pero también hay exposiciones que exceden 100 mg m^{-3} (Schenker, 2000). Las exposiciones más altas a polvos ocurren durante el barbecho y rastro; por ejemplo, en suelos de zonas áridas la fracción inorgánica de los suelos puede estar dominada por el carbonato de calcio y otras sales solubles. Además, las emisiones de polvos en áreas agrícolas contienen arcilla con una superficie específica grande y con mayor potencial para adsorber y transportar materiales orgánicos y pesticidas. La materia orgánica y la formación de agregados del suelo son propiedades importantes en la reducción de MP en suelos agrícolas

(Baker *et al.*, 2005). También tienen relevancia las variaciones temporales en algunas propiedades físicas del suelo, como el contenido de agua, la densidad aparente y la cantidad de agregación o desagregación (Madden *et al.*, 2009).

Según Wang *et al.* (2010), en suelos cultivados con algodón en Las Cruces, Nuevo México, a mayor humedad del suelo fue menor la dispersión de MP_{10} ; por ejemplo, con 18 y 23% de humedad en el suelo hay partículas de 2 a $75 \mu\text{m}$ y con 34 y 37% de humedad se observaron partículas de 0 a $2 \mu\text{m}$; en diferentes suelos, tipos de labranza y cultivos, los factores de emisión de MP_{10} fueron significativamente diferentes ($P < 0.001$). Estos autores muestran ecuaciones con factores de emisión para modelos de dispersión de polvos en las operaciones agrícolas de labranza:

$$E_i = Qa_i \times 1.4 \times s^{0.6} \times [-86.5 \times \ln(M) - 95.159]$$

donde: Qa_i es el coeficiente para una operación especial en un cultivo, E_i es el factor de emisión (mg m^{-2}), s es la fracción de limo (g g^{-1}), y M es la humedad del suelo (g g^{-1}).

Cada textura de suelo puede retener cantidades de agua variables y tener potenciales de agua diferentes, por lo tanto pueden variar en su potencial para producir MP_{10} . El potencial de emisión de MP_{10} en suelos secados al aire disminuye al incrementarse el contenido de arena; por el contrario, aumenta cuando se incrementa el contenido de arcilla y limo (Zobeck *et al.*, 1999; Funk *et al.*, 2008). Las condiciones secas en regiones áridas permiten que las partículas finas se mantengan suspendidas en el aire y así crear nubes de polvo. Por ejemplo, las emisiones de polvo en caminos no pavimentados están en función directa a las partículas menores de $70 \mu\text{m}$ (Cowherd *et al.*, 1974; Kuhns *et al.*, 2005). En otro estudio, se compararon datos de laboratorio con emisiones de polvo producidas durante actividades de labranza agrícola y se encontró que la humedad del suelo, la materia orgánica y los agregados del suelo son propiedades que afectan la producción de polvos; de tal manera que cuando la humedad del suelo fue de 540 kPa , la producción de polvo MP_{10} fue de 20 a 35 mg m^{-3} en un suelo con 42% de arena, 39% de limo, y 19% de arcilla (Domingo *et al.*, 2010). Incluso en caminos agrícolas rurales y en campos experimentales la dispersión de polvos está en función del contenido de limo del suelo o de la distribución del tamaño de partículas, de la velocidad y del tamaño del vehículo,

y del contenido de humedad del suelo (Gillies *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2008; Flores *et al.*, 2011). Los objetivos del presente estudio fueron evaluar las emisiones de MP causadas por operaciones de labranza con diferentes implementos y velocidades del tractor en un suelo cultivado con algodón, así como relacionar la dispersión de MP con las propiedades físicas del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Plant Sciences Research Center (PSRC) de New Mexico State University localizado a 12 km al Sur de Las Cruces en el Valle de Mesilla, Condado de Dona Ana, Nuevo México (32° 11' 3 5.84" N y 106° 44' 08.75" O). Los suelos del área son clasificados como Glendale conforme a la clasificación Soil Taxonomy-USDA del orden Entisoles (fine-silty, mixed, calcareous, thermic typic Torrifluvents), es decir fino-limoso, calcáreo, mezclado, térmico, típico torrifluvents, y Harkey (coarse-silty, mixed, calcareous, thermic typic Torrifluvents), es decir grueso-limoso, mezclado, calcáreo, térmico, típico, torrifluvents (Bulloch y Neher, 1980). La textura del área experimental es franco-arcillosa, pero en esta área el aluvión es alterado por el viento y material eólico. El clima es árido con temperatura media anual de 20 °C y la precipitación anual varía de 180 a 230 mm (Bulloch y Neher, 1980).

El terreno fue sembrado con algodón durante 2007; el 8 de enero de 2008 se realizaron las operaciones de labranza para el experimento (Figura 1). El área de estudio se dividió en seis parcelas de 5 × 20 m, las cuales fueron consideradas como unidades experimentales, separadas por una banda de 5 m de ancho. Los cuatro tratamientos consistieron de: dos tipos de labranza, rastreo con discos mediante un implemento Massey

Fergusson John Deer 7810 y arado de cincel marca Johnson con 93 cm de altura y 245 cm de ancho, así como dos velocidades promedio del tractor: 4.8 y 6.5 km h⁻¹ en cada actividad de labranza. Los tratamientos se aplicaron en cada parcela en diferentes periodos para permitir la decantación de partículas de polvo o MP, y por ende, la limpieza del aire. El análisis de varianza para los datos de MP dispersado al aire consistió en determinar los efectos independientes de cada tratamiento (rastreo a 4.8 km h⁻¹, rastreo a 6.5 km h⁻¹, arado a 4.8 km h⁻¹ y arado a 6.5 km h⁻¹) y el efecto anidado de velocidad dentro de cada método de labranza. La medición de MP se realizó con tres muestreadores de polvo (Dust Trak[®]) que se instalaron a 100 cm de altura sobre la superficie del suelo en el lado expuesto hacia el viento de las parcelas y separados a una distancia de 2.7 m, además se instaló un anemómetro sónico en la parte Sur (Figura 2). La concentración de MP fue registrado cada segundo, mientras que la velocidad del viento en los planos x-y-z, dirección del viento y temperatura fueron registrados cada 1/10 s mediante un anemómetro sónico. Estos instrumentos se movieron a las parcelas conforme se realizó cada actividad de labranza con un total de nueve repeticiones.

Un total de 30 muestras de suelo fueron colectadas en las seis parcelas, es decir cinco muestras o repeticiones por parcela experimental, los muestreos fueron con barrena cilíndrica para tener muestras compactas y otras fueron colocadas sueltas en bolsas de plástico. A las muestras sueltas se les analizó el contenido de humedad del suelo y textura (Gee y Bauder, 1986). Las muestras de suelo compactas con barrena cilíndrica se utilizaron para determinar la densidad aparente en cada parcela. Estas muestras también fueron utilizadas para medir el contenido de agua a capacidad



Figura 1. Actividades de labranza mediante rastra de discos (izquierda) y arado de cincel (derecha).



Figura 2. Muestreador de polvos (izquierda) utilizado para registrar la concentración de material particulado y un anemómetro sónico (derecha) para registrar dirección del viento en tres planos x – y – z.

de campo, punto de marchitez y contenido de agua disponible (Ulery y Drees, 2008). Tres pruebas de penetrabilidad fueron realizadas por unidad experimental usando un penetrómetro de suelo estándar análogo marca TPM SP06120 para determinar la resistencia a la penetrabilidad a profundidades de 5, 10 y 15 cm. Las variaciones en las propiedades del suelo como textura y densidad pueden ser expresadas por el rango del coeficiente de variación (CV) en diferentes clases, i.e., mínimo (<15%), moderado (15 a 35%) y mayor (>35%), (Wilding, 1985; Shukla *et al.*, 2004). Los análisis de datos de MP dispersado se realizaron mediante un análisis de varianza con factores fijos de método de labranza, velocidad del tractor y el efecto anidado de velocidad dentro de labranza, así como la prueba de comparación de promedios Tukey, esto con el programa estadístico SAS versión 8 (SAS, 1999).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades Físicas del Suelo

La textura del suelo fue similar en las áreas evaluadas y se clasificó de franco limosa a franca (Cuadro 1), con promedio de las unidades experimentales de 26.1% de arena, 47.4% de limo y 26.5% de arcilla. La densidad aparente del suelo varió entre 1.2 y 1.34 g cm⁻³ que coincide para los grupos texturales mencionados, dado que la suma del porcentaje de limo y arcilla fue entre 70 y 76%, lo cual tiene relevancia en la dispersión de MP por la predominancia de partículas con

diámetro a que 0.05 mm (Funk *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2010). El contenido volumétrico de humedad del suelo fue bajo (0.09 a 0.1 cm³ cm⁻³) en todas las parcelas durante el experimento, lo cual podría favorecer la dispersión de MP en las actividades de labranza, ya que está demostrado la relación inversa entre humedad del suelo y erosión eólica (Madden *et al.*, 2009). La penetrabilidad varió entre 10.6 y 15.3 kg cm⁻² (1039 kPa y 1500 kPa) lo cual podría considerarse compactación intermedia, ya que valores mayores a 20 kg cm⁻² (1961 kPa) pueden ocasionar crecimientos radiculares limitados en cultivos como algodónero, alfalfa y maíz (Castellanos *et al.*, 2000).

Con relación a la variabilidad de los factores analizados, el contenido de humedad del suelo al iniciar el experimento mostro mínima variación (Wilding, 1985; Shukla *et al.*, 2004) entre las parcelas con un coeficiente de variación (CV) de 4 a 17%. La baja variabilidad fue también observada para el contenido de arena con un CV que varió de 5 a 12%. Se observaron variaciones bajas para el contenido de limo (CV = 3 a 5%) y el contenido de arcilla (CV = 1 a 7%). Sin embargo, la variabilidad de la densidad aparente del suelo tuvo un rango de bajo a moderado con un CV que varió de 3 a 13%, en rango moderado se observó la variación para la resistencia a la penetrabilidad del suelo (CV = 8 a 19%). El hecho de tener baja a moderada variabilidad en estos parámetros, es un indicador que la emisión de MP pueda atribuirse principalmente a los factores estudiados como el método de labranza y la velocidad del tractor, y no así a la variabilidad del suelo.

Cuadro 1. Contenido de humedad, tamaño de partícula, densidad aparente y resistencia a penetración del suelo antes de iniciar el experimento de dispersión de material particulado.

Parcela	Contenido de humedad	Arena	Limo	Arcilla	Densidad aparente	Penetrabilidad
	cm ³ cm ⁻³	% - - - - -			g cm ⁻³	kg cm ⁻²
1	0.096 ± 0.01	29.6 ± 2.3	45.0 ± 2.0	25.4 ± 1.2	1.32 ± 0.15	15.05 ± 2.87
2	0.101 ± 0.011	26.0 ± 2.5	47.4 ± 2.1	26.6 ± 0.5	1.20 ± 0.16	10.90 ± 1.32
3	0.105 ± 0.004	23.7 ± 2.0	49.4 ± 2.1	26.8 ± 0.4	1.27 ± 0.09	10.69 ± 1.64
4	0.096 ± 0.011	24.1 ± 3.0	48.9 ± 2.6	27.0 ± 0.5	1.34 ± 0.12	15.33 ± 2.21
5	0.100 ± 0.012	24.8 ± 1.6	47.8 ± 1.5	27.4 ± 0.5	1.32 ± 0.04	13.92 ± 1.53
6	0.094 ± 0.016	28.4 ± 1.5	46.0 ± 1.4	25.6 ± 1.9	1.33 ± 0.06	11.46 ± 0.88

Material Particulado Dispersado al Aire Debido a Operaciones de Labranza

La velocidad del viento observada fluctuó de 3.5 a 14 km h⁻¹ (Figura 3). La utilización de factores meteorológicos en tres planos x-y-z ha sido común en estudios de modelos de dispersión para contaminación ambiental porque la velocidad y dirección del viento son factores clave de la emisión de MP (Rojano *et al.*, 2000). Por ejemplo, estos autores indican que paralelo al eje X, la concentración es inversamente proporcional a la velocidad del viento, por lo cual se puede observar en la Figura 3 que se registró mayor variación para el eje X que en las coordenadas Y y Z, lo cual se aprecia por la menor separación de líneas Y y Z. Por su parte, Holmen *et al.* (2008), mencionan que el tamaño y la dinámica de la nube de polvo generada en actividades agrícolas depende de la velocidad y dirección del viento, por lo que la estabilidad atmosférica que se refiere a como el aire es forzado a desplazarse hacia arriba o hacia abajo, es el parámetro clave que determina la altura de la nube de polvo y por ende, la cantidad de MP dispersado al aire.

El rastreo con discos causó impulsos distintos de concentración de partículas de polvo entre parcelas, registrados en los muestreadores de MP (Figura 4). Al analizar las unidades experimentales o parcelas, se observó que la concentración promedio más alta de MP fue de 1.55 mg m⁻³ en la parcela 6 (Figura 4 F), mientras que la menor concentración media fue de 0.88 mg m⁻³ en la parcela 5 (Figura 4 E), ambas con velocidad del tractor de 4.8 km h⁻¹ para el rastreo. Esto puede atribuirse a la menor humedad del suelo en la parcela 6, ya que presentó 0.06 cm cm⁻³ más que la parcela 5. Además, la parcela 6 tuvo menor resistencia a penetrabilidad (2.46 kg cm⁻²) que la parcela 5 y la suma

del porcentaje de limo y arcilla fue mayor en 3.6% en la parcela 5. Esto sugiere que la menor penetrabilidad y la baja humedad contribuyeron a mayor MP dispersado en el rastreo con disco, cuyo valor máximo detectado fue de 1.272 ± 0.85 mg m⁻³ a 6.5 km h⁻¹ de velocidad del tractor durante el rastreo.

Se encontró efecto significativo entre velocidades del tractor para las emisiones máximas y mínimas de MP detectadas ($P \leq 0.01$), es decir los picos observados en las gráficas de los muestreadores (Cuadro 2). En promedio el MP máximo fue a 4.8 km h⁻¹, mientras que el mayor promedio de picos de MP mínimos detectados por los muestreadores fue a 6.5 km h⁻¹ (Cuadro 3). El método de labranza solo mostró efecto significativo ($P \leq 0.01$) para las emisiones de MP mínimas y no se detectó diferencia significativa para el efecto anidado de velocidad dentro del método de labranza (Cuadro 2). La comparación de promedios indica que el rastreo mostró significativamente una emisión de MP mayor que el arado con cincel para los picos máximos detectados en los muestreadores, mientras que para los picos mínimos el arado con cincel tuvo el promedio mayor (Cuadro 3). Los tres muestreadores de MP utilizados mostraron que el rastreo a 6.5 km h⁻¹ generó la mayor dispersión de MP en promedio (1.272 ± 0.855 mg m⁻³).

Cuadro 2. Material particulado (MP) máximo y mínimo en los métodos de labranza y velocidad del tractor.

Fuente de Variación	MP(max)	MP(min)
Método	0.1933	0.0025**
Velocidad	0.0001**	0.0001**
Velocidad (Método)	0.3375	0.4276
Promedio (mg m ⁻³)	0.5550	0.0047
C.V. (%)	63.16	53.00

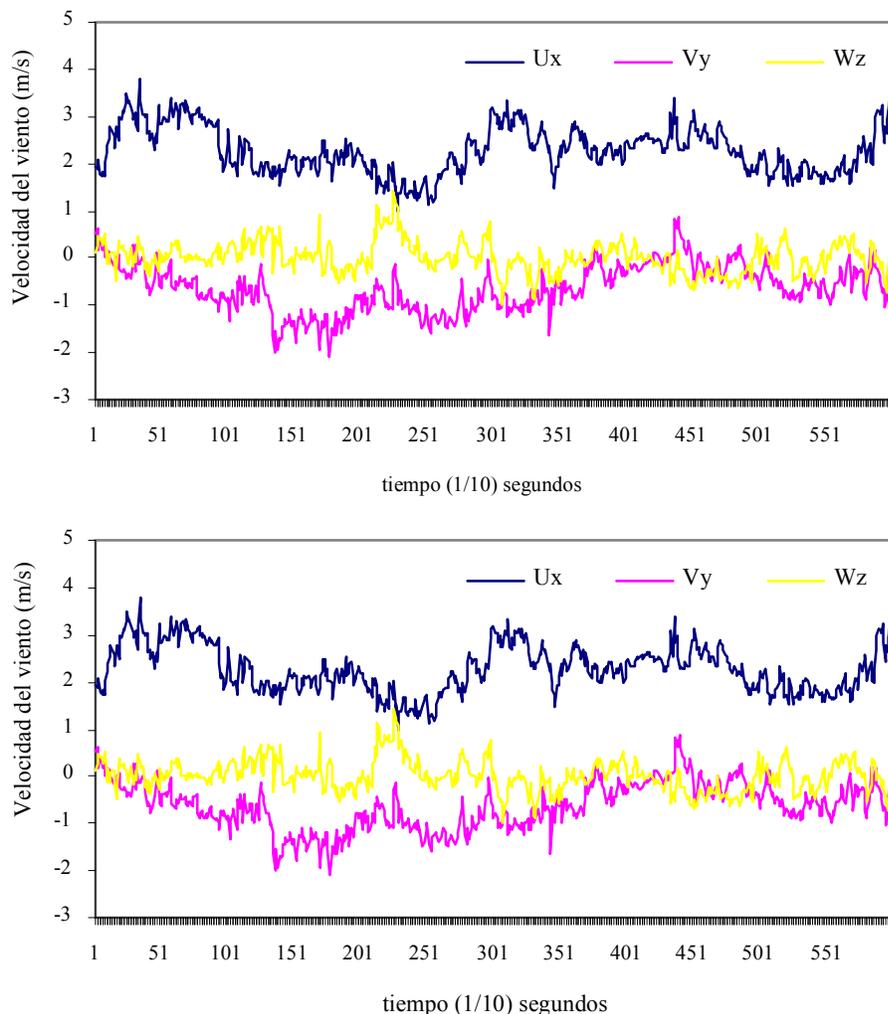


Figura 3. Ejemplos de velocidad y dirección del viento en los planos x-y-z registrados por el Anemómetro sónico.

El arado de cincel, al pasar por las parcelas produjo distintos impulsos en los instrumentos de medición con relación a la dispersión de MP capturado por los muestreadores de polvos (Figura 5). La concentración promedio más alta fue en la parcela 5 (Figura 5E) con una concentración de 0.83 mg m^{-3} , mientras que la más baja fue registrada en la parcela 2 (Figura 5B) con 0.004 mg m^{-3} . Ambas parcelas presentaron humedad del suelo similar ($0.1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) que es de las mayores entre las parcelas evaluadas, sin embargo, la parcela 2 presentó menor penetrabilidad (10.9 kg cm^{-2} o 1068 kPa), menor densidad aparente (1.2 Mg m^{-3}) y relativamente menor porcentaje de limo más arcilla (74%) que la parcela 5, la cual mostró un valor de penetrabilidad de

Cuadro 3. Material particulado (MP) máximos y mínimos detectados por los muestreadores a diferentes velocidades del tractor y métodos de labranza.

Variable	Velocidad del tractor (km h^{-1})	
	4.8	6.5
MP máximo (mg m^{-3})	0.6097 a [†]	0.501 b
MP mínimo (mg m^{-3})	0.0038 b	0.0057 a
	Método de labranza	
	Rastra	Arado de cincel
MP máximo (mg m^{-3})	0.8773 a	0.2334 b
MP mínimo (mg m^{-3})	0.0035 b	0.0059 a

[†] Datos con diferente letra son diferentes estadísticamente ($P \leq 0.01$), prueba de Tukey.

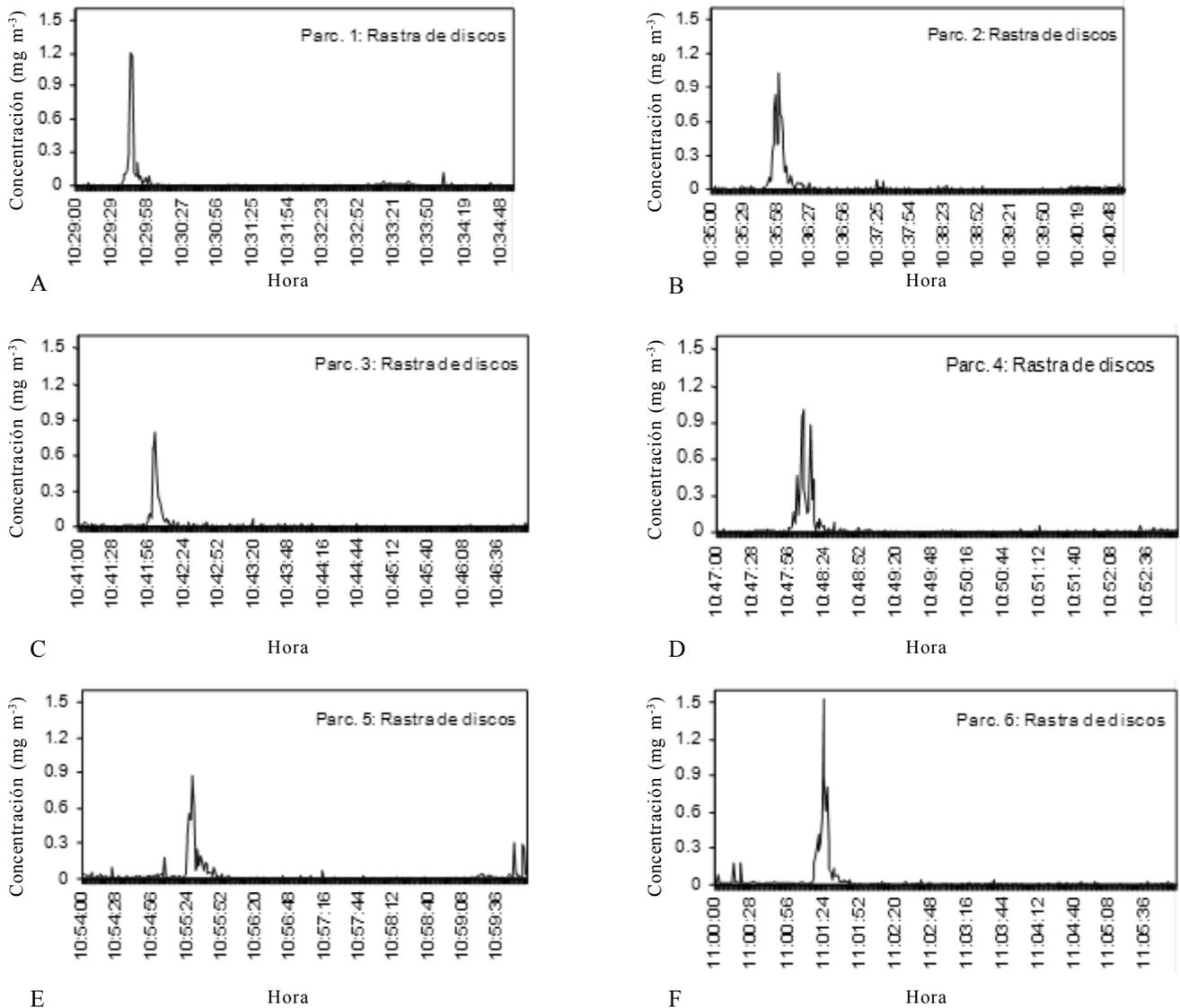


Figura 4. Concentración de material particulado (MP) registrada por el muestreador de polvo en cada parcela durante las operaciones con rastra de discos a 4.8 km h^{-1} .

13.9 kg cm^{-2} o 1363 kPa , densidad aparente de 1.32 Mg m^{-3} y 75.2% de limo más arcilla. Esto sugiere que la dispersión de MP en labranza con arado de cincel en condiciones similares de baja humedad del suelo (0.09 a $0.1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y porcentajes similares de tamaños de partículas pequeños (limo y arcilla) podría estar influenciado por la resistencia del suelo a penetrabilidad y por la densidad aparente. Aunque al comparar las emisiones mayores de MP (1.55 mg m^{-3}) entre los tipos de implementos se observó que la rastra de discos presentó un 47% más de dispersión de MP al mostrarse por el arado de cincel (0.83 mg m^{-3}), lo cual sugiere que

el tipo de implemento en labranza de suelos agrícolas tiene una influencia importante en la dispersión de MP.

Al comparar la parcela 6 con la 5, se observó que la 6 presentó menor humedad del suelo ($0.06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) y menor resistencia a la penetrabilidad (2.46 kg cm^{-2} o 241 kPa) que la parcela 5 y la suma del porcentaje de limo y arcilla fue mayor en 3.6% en la parcela 5. Esto sugiere que la menor penetrabilidad y la baja humedad contribuyeron a mayor PM dispersado en el rastreo con disco. Los análisis de regresión por pasos o step-wise entre las concentraciones de polvo generadas en las operaciones de labranza y las propiedades físicas del

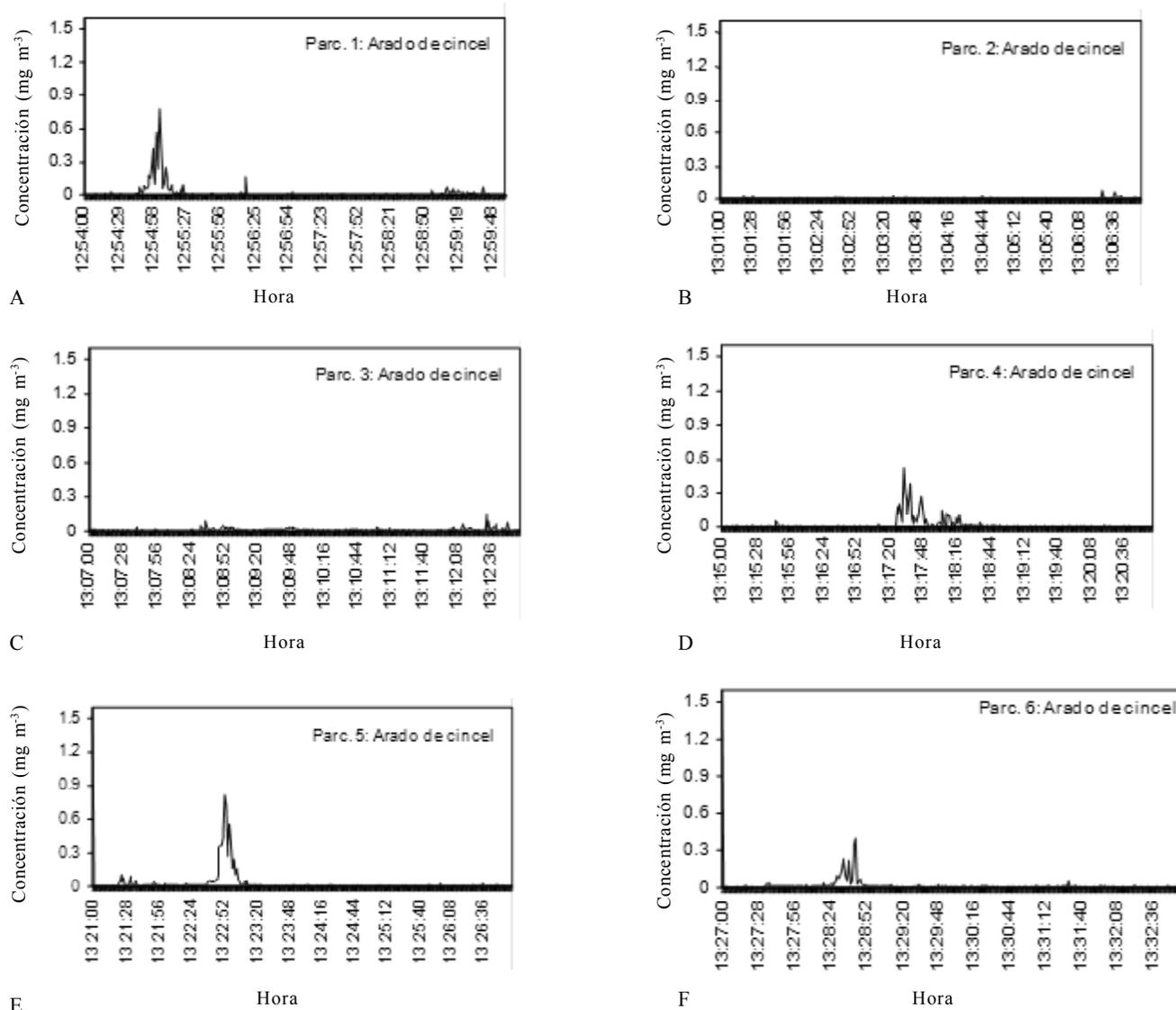


Figura 5. Concentración de material particulado (MP) registrada por el muestreador de polvo en cada parcela durante las operaciones con arado de cincel a 4.8 km h⁻¹.

suelo no mostraron correlaciones significativas para el rastreo con discos, mientras que para la operación con arado de cincel se observaron correlaciones significativas entre las propiedades del suelo y las concentraciones pico de polvo (PicoC), así como con las concentraciones mínimas (MinC); las siguientes ecuaciones de regresión indican como las variables de resistencia a penetrabilidad, humedad del suelo y arcilla explican las concentraciones de polvo detectadas en los instrumentos muestreadores.

$$\begin{aligned} \text{PicoC} &= 0.955 - 7.322 * \text{HS} & R^2 &= 0.23; P = 0.003 \\ \text{PicoC} &= 0.746 - 7.333 * \text{HS} + 0.016 * \text{RP} & R^2 &= 0.28; P = 0.004 \\ \text{MinC} &= 0.029 - 0.001 * \text{Arcilla} & R^2 &= 0.11; P = 0.04 \\ \text{MinC} &= 0.019 - 0.001 * \text{Arcilla} + 0.023 * \text{RP} & R^2 &= 0.20; P = 0.03 \end{aligned}$$

donde: RP es la resistencia a penetrabilidad y HS es contenido de humedad del suelo.

CONCLUSIONES

- La predominancia de partículas finas de suelo (limo y arcilla) con un nivel de compactación intermedio de las mismas y baja velocidad del viento, fueron condiciones que permitieron detectar efectos significativos del método de labranza y la velocidad del tractor en la dispersión de material particulado (MP) al aire.
- La concentración de MP mayor fue cuando se utilizó la rastra de discos a 6.5 km h⁻¹ de velocidad del tractor, seguido por el mismo implemento a 4.8 km h⁻¹, mientras

que el arado de cincel mostró las concentraciones más bajas de MP a las dos velocidades.

- El efecto de las actividades de labranza en la dispersión de MP mostró que la menor penetrabilidad y baja humedad contribuyeron a mayor PM dispersado en el rastreo con disco, mientras que la dispersión de MP con arado de cincel en condiciones similares de baja humedad del suelo y porcentajes similares de limo más arcilla, podría estar más afectado por la resistencia del suelo a la penetrabilidad y la densidad aparente del suelo.

- Sin embargo, al comparar los valores promedios más altos de MP entre los dos tipos de implementos evaluados, se observó que la rastra de discos duplicó la dispersión de MP comparada con el arado de cincel. Se detectaron correlaciones significativas entre la concentración pico de MP y la humedad del suelo y resistencia a la penetrabilidad.

- El presente estudio refleja que la dispersión de MP en suelos agrícolas esta favorecida por la menor penetrabilidad y la baja humedad en suelos de textura intermedia, lo cual podría tener aplicación en estudios de erosión de suelo y dispersión de material particulado al aire durante vientos fuertes y formación de tolvaneras, así como implicaciones en la exposición de los trabajadores de campo al MP dispersado al aire, lo cual es crítico en zonas semiáridas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a New Mexico State University, Leyendecker Agriculture Experiment Station, Las Cruces, NM por el apoyo brindado. Esta investigación fue financiada por Southwest Center for Environmental Research and Policy (SCERP).

LITERATURA CITADA

- Baker, J. B., R. J. Southard, and J. P. Mitchell. 2005. Agricultural dust production in standard and conservation tillage systems in the San Joaquin Valley. *J. Environ. Qual.* 34: 1260-1269.
- Bullock, H. E. and R. E. Neher. 1980. Soil survey of Dona Ana county area New Mexico. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle Bueno y A. Aguilar Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas agrícolas, plantas y ECP. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Chapingo, Edo. de México.
- Carvacho, O. F., L. L. Ashbaugh, M. S. Brown, and R. G. Flocchini. 2001. Relationship between San Joaquin Valley soil texture and PM₁₀ emission potential using the UC Davis dust resuspension test chamber. *Trans. ASAE.* 44: 1603-1608.
- Cowherd, Jr. C., K. Axetall Jr., C. M. Guenther, and G. A. Jutze. 1974. Development of emission factors for fugitive dust sources. Midwest Research Institute. Kansas City, MO, USA.
- Domingo, R. A., R. J. Southard, and K. Lee. 2010. Laboratory system for dust generation from soils. *J. Environ. Qual.* 39: 1254-1261.
- Flores M., J. P., M. K. Shukla, J. Wang y B. C. Hernández A. 2011. Material particulado dispersado al aire por vehículos en caminos agrícolas no pavimentados. *Terra Latinoamericana.* 29: 23-34.
- Funk, R., H. I. Reuter, C. Hoffman, W. Engel, and D. Öttl. 2008. Effect of moisture on fine dust emission from tillage operations on agricultural soils. *Earth Surf. Processes Landforms* 33: 1851-1863.
- Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. pp. 337-382. *In: a. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods.* Agron. Dep. Colorado State Univ. Fort Collins, CO, USA.
- Gillies, J. A., V. Etyemezian, H. Kuhns, D. Nikolic, and D. A. Gillette. 2005. Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions. *Atmos. Environ.* 39: 2341-2347.
- Holmén, 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., J. Gillies, V. Etyemezian, D. Dubois, S. Ahonen, D. Nikolic, and C. Durham. 2005. Spatial variability of unpaved road dust emissions factors near El Paso, Texas. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 55: 3-12.
- Madden, N. M., R. J. Southard, and J. P. Mitchell. 2009. Soil water content and soil disaggregation by disking affects PM₁₀ emissions. *J. Environ. Qual.* 38: 36-43.
- Rojano, R., C. García, N. García, A. Galindo, E. Toncel, J. Pérez, and S. Daza. 2000. Effect of the operational and meteorological variables in the atmospheric dispersion of SO₂. *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia.* 23: 150-160.
- SAS Institute. 1999. Statistical Analysis System, SAS/STAT, user's guide version 8. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Schenker, M. 2000. Exposures and health effects from inorganic agricultural dusts. *Environ. Health Perspect.* 108: 661-664.
- Shukla, M., R. Lal, and M. Ebinger. 2004. Principal component analysis for predicting corn biomass and grain yields. *Soil Sci.* 169: 215-224.
- Ulery, A. L. and R. Drees. 2008. Methods of soil analysis: Mineralogical methods. Part 5. ASA-CSSA-SSSA Book Series. Madison, WI, USA.
- Wang, J., D. R. Miller, T. W. Sammis, A. L. Hiscox, W. Yang, and B. A. Holmén. 2010. Local dust emission factors for agricultural tilling operations. *Soil Sci.* 175: 194-200.
- 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.* Int. Soc. Soil Sci. and Soil Sci. Soc. Amer. Workshop. PUDOC publishers. Wageningen, Netherlands.
- Williams, D. S., M. K. Shukla, and J. Ross. 2008. Particulate matter emission by a vehicle running on unpaved road. *Atmos. Environ.* 42: 3899-3905.
- Zobeck, T. M., T. E. Gill, and T. W. Popham. 1999. A two-parameter weibull function to describe airborne dust particle size distributions. *Earth Surf. Processes Landforms* 24: 943-955.