

DISEÑO DE UN TÚNEL DE VIENTO PORTÁTIL PARA EL ESTUDIO DE LA EROSIÓN EÓLICA

JUAN CRUZ COLAZO^{1*}; MARIANO JAVIER MÉNDEZ²; LAURA ANDREA DE ORO²; FERNANDO AVECILLA²;
JUAN ESTEBAN PANEBIANCO² & DANIEL EDUARDO BUSCHIAZZO²

Recibido: 05-12-15

Recibido con revisiones: 22-03-16

Aceptado: 21-04-16

RESUMEN

La erosión eólica (EE) es un proceso de degradación irreversible de suelos de regiones áridas y semiáridas. Con el uso de túneles de viento portátiles es posible simular la EE controlando variables críticas como la velocidad y dirección del viento, la duración de los eventos erosivos; además de parámetros del suelo en condiciones naturales como los niveles de humedad, rugosidad y cobertura. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) describir los principales aspectos del diseño y la operación de un túnel de viento portátil para estudios de erosión eólica, y 2) Calibrar el túnel para cumplir con los criterios aerodinámicos relacionados con el desarrollo de un perfil vertical de viento y de distribución de material erosionado similares a las condiciones naturales. Los principales componentes del túnel son: chasis, motor, hélice, sección curva, placa cribada y las secciones del túnel propiamente dicho. Cada una de estas secciones tiene 2 m de largo; 0,5 m de ancho y 1 m de alto. El túnel fue calibrado en un Haplustol Éntico con una superficie lisa y sin cobertura vegetal. La velocidad máxima alcanzada medida a 0,6 m fue de 22,5 m s⁻¹. Esto significa que el túnel permite simular velocidades consideradas erosivas a campo. El perfil vertical de viento y la distribución de material erosionado son similares a los producidos en condiciones naturales. El túnel de viento desarrollado cumple con las condiciones de diseño para la simulación de eventos de erosión eólica a campo. El uso del mismo mejorará el estudio de procesos básicos y el desarrollo de tecnología para el control de la erosión eólica en suelos de Argentina, además de ser una fuente de consulta para la construcción de futuros túneles de viento para el estudio de la erosión eólica.

Palabras clave. Metodología de medición; perfil vertical de viento; distribución vertical de material erosionado por el viento.

DESING OF A PORTABLE WIND TUNNEL FOR THE WIND EROSION STUDY

ABSTRACT

Wind erosion (WE) is an irreversible soil degradation process of arid and semiarid regions. With portable wind tunnels it is possible to simulate WE controlling critical variables such as wind speed and direction, duration of erosive events; and soil surface parameters under natural conditions as moisture, roughness and cover level. The objectives of this study were: 1) to describe the main aspects of the design and operation of a portable wind tunnel to study WE, and 2) to calibrate the wind tunnel to fit the aerodynamics criterions related to the development of a vertical wind profile and an eroded material distribution similar to natural conditions. The main components of wind tunnel are chassis, engine, wind fan, s-shaped section, honeycomb diffusor, the stabilization section and the working sections. These sections have 2 m length; 0.5 m width and 1 m height. The wind tunnel was calibrated in an Entic Haplustoll in a bare and flat surface. The maximum measured velocity reached at 0.6 m was 22.5 m s⁻¹, implying that the wind tunnel allows simulating field erosive wind velocities. The vertical wind profile and eroded material distribution are similar to those produced under natural field conditions. The use of this wind tunnel will improve the study of basic processes and technology for wind erosion control of soils of Argentina, also it will serve as a guide for future wind tunnel developments to study wind erosion.

Key words. Measurement methodology; vertical wind profile; vertical distribution of wind-eroded material.

1 INTA - EEA San Luis

2 INCITAP (Instituto de Ciencias de la Tierra y Ambientales de La Pampa)

*Autor de contacto: colazo.juan@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

La erosión eólica (EE) es un proceso de degradación irreversible de suelos de regiones áridas y semiáridas (Lal, 2001). La medición de la EE permite determinar su impacto ambiental, cuantificar la eficiencia de la tecnología para su control y desarrollar modelos de predicción.

La medición de la EE en condiciones naturales presenta la dificultad de que los factores que la regulan son altamente variables y, en general, incontrolables (Stroosnijer, 2005). En este sentido, las mayores dificultades que existen para cuantificar la EE a campo son la variabilidad de la dirección del viento y el efecto simultáneo de diversos factores durante la medición del evento, lo que dificulta la ponderación de sus efectos específicos. La variabilidad de la dirección del viento modifica el movimiento unidireccional del flujo de material en el espacio, incrementando la cantidad neta de material erosionado hacia el centro del lote de medición, lo que produce errores al momento de cuantificar el fenómeno (Buschiazzo & Zobeck, 1999).

A fin de resolver estas dificultades, los túneles de viento portátiles aparecen como una herramienta esencial para simular procesos de erosión eólica en condiciones controladas. Mediante este equipamiento es posible simular la EE manteniendo constantes variables críticas como la velocidad y dirección del viento, la duración del evento erosivo, y parámetros del suelo como el contenido de humedad, la rugosidad y el porcentaje de cobertura, en condiciones naturales (van Pelt & Zobeck, 2013).

La obtención de datos provenientes de experimentos con túneles de viento es esencial para entender los mecanismos de la erosión eólica y para el desarrollo de modelos numéricos y su validación. De hecho, la identificación y la cuantificación de la influencia de las distintas variables y el posterior desarrollo de los principales modelos de erosión eólica utilizados en la actualidad como la Wind Erosion Equation (WEQ), la Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) o la Wind Erosion Prediction System (WEPS), fueron desarrollados en túneles de viento (Tatarko & Sporic, 2013; Wagner, 2013).

Existen dos tipos principales de especificaciones técnicas al diseñar un túnel de viento portátil para el estudio de la erosión eólica. Por un lado, existen criterios prácticos: el túnel debe generar velocidades similares a los eventos erosivos naturales; ser de fácil transporte, de rápida instalación y seguro de usar (van Pelt *et al.*, 2010). Por otro lado, se deben cumplir criterios aerodinámicos, para permitir una

correcta reproducción, a escala, de las condiciones naturales. Para ello, el perfil vertical de velocidades de viento, o perfil vertical de viento, debe ser logarítmico, el flujo de aire debe ser homogéneo y la sección de medición debe ser lo suficientemente larga y alta para simular un adecuado proceso de saltación (Shao & Raupach, 1992; White & Moula, 1991).

La capa límite atmosférica es aquella región de la tropósfera que es afectada por los intercambios de masa y energía por su interacción con la superficie (Shao, 2008). Durante los eventos de erosión eólica el perfil vertical de viento en la capa límite atmosférica puede ser descripto por la Ec. 1, denominada ecuación de Prandtl (Zobeck & van Pelt, 2014).

$$U(z) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

donde $U(z)$ es la velocidad de viento a la altura z (m s^{-1}), u^* es la velocidad de fricción (m s^{-1}), k es la constante de Von Karman ($\approx 0,4$) y z_0 es la altura de la rugosidad aerodinámica (m).

Para el correcto escalado a condiciones naturales y para que las fuerzas aerodinámicas del flujo de aire actúen de manera correcta sobre las partículas superficiales, el flujo dentro del túnel debe poseer una capa límite lo suficientemente profunda para contener a las partículas en movimiento en una región donde el perfil vertical de viento sea logarítmico y uniforme sobre la superficie a erosionar.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) describir los principales aspectos del diseño y la operación de un túnel de viento portátil, desarrollado por CONICET en el Instituto de Ciencias de la Tierras y Ambientales de La Pampa (INCITAP), para estudios de erosión eólica, y 2) Calibrar el túnel para cumplir los criterios aerodinámicos relacionados con el desarrollo de un perfil vertical de viento y de distribución de material erosionado similares a las condiciones naturales.

DESCRIPCIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

Secciones del túnel de viento

Los principales componentes del túnel de viento portátil son: chasis, motor, hélice, sección curva, placa cribada y las secciones del túnel propiamente dicho (Fig. 1). El chasis posee 3,8 m de largo; 2,3 m de ancho; 2,3 m de alto y está

construido de hierro de sección cuadrada de 5 mm de espesor. En la parte delantera posee una lanza para el transporte y un bastidor sobre el cual se realiza la nivelación del túnel por medio de elevadores mecánicos.

El impulsor es un motor Honda, que se ubica en la parte superior del chasis y posee una potencia de 24 HP. Por medio de una correa y poleas reductoras (relación 2,5:1) acciona la hélice que se encuentra por debajo. Esta tiene 1 m de diámetro y está compuesta por 8 palas de 35 cm de largo, 12 cm de ancho y un ángulo de 40°. La hélice se encuentra protegida por una malla metálica para seguridad del operador.

El aire impulsado por la hélice es conducido hacia la sección curva de chapa galvanizada de 1 mm de espesor que desciende 50 cm el flujo de aire, llevándolo a un movimiento horizontal a la altura del suelo. El aire circula luego a través de una placa cribada de 1 m de alto; 0,5 m de ancho; 0,5 m de largo y que posee 196 orificios de chapa moldeada de 35 mm de ancho por 58 mm de alto cada uno. La función de la misma es homogeneizar el flujo de viento.

El flujo atraviesa posteriormente la sección del túnel propiamente dicha formada por tres secciones de chapa galvanizada, cada una de 2 m de largo; 0,5 m de ancho y 1 m de alto. La primera sección es totalmente recubierta y a la entrada de la misma se ubica un conjunto de placas deflectoras móviles que se encargan de orientar el flujo

permitiendo ajustar el perfil de velocidad de viento con la altura. Por último, se encuentran la zona de medición formada por dos secciones sin piso y con ventanas a ambos lados que permiten realizar modificaciones en la superficie sin necesidad de desacoplar los mismos.

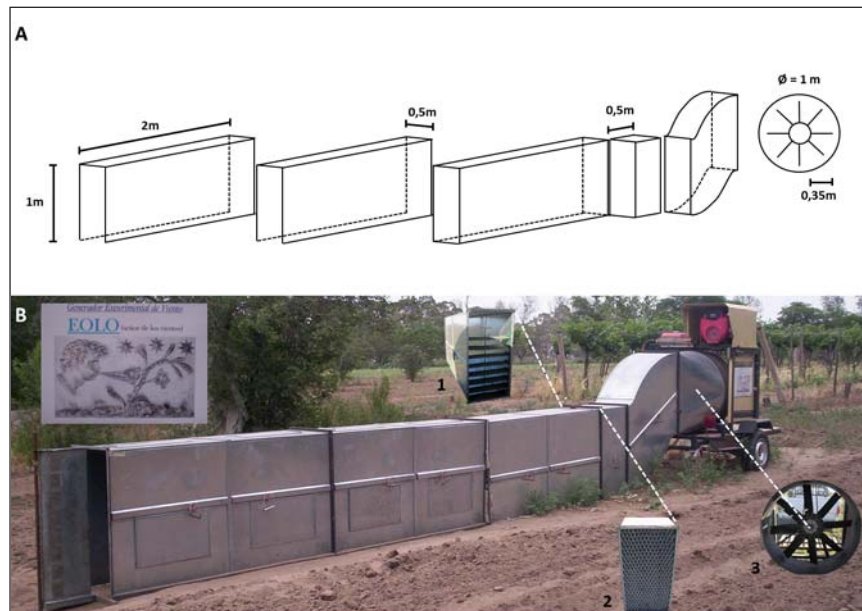
Instrumentos utilizados en el túnel de viento

Colectores

Pueden ser utilizados colectores especialmente diseñados para el túnel o aquellos comúnmente utilizados para mediciones de campo. Los primeros poseen una abertura continua que coincide con la altura del túnel y tienen la ventaja de no requerir un cálculo de integración para determinar el transporte de masa horizontal. Mientras que la desventaja es que no permiten separar partículas que se mueven según distintos modos de transporte de material (Colazo, 2012). Los colectores de campo más utilizados son los Big Spring Number Eight (BSNE) y los Wilson & Cook Modificados (MWAC) (Zobeck *et al.*, 2013), para los cuales existen ecuaciones que permiten ajustar entre las mediciones de uno y otro (más detalles en Mendez *et al.*, 2012).

Figura 1.
A) Diagrama de los componentes del túnel de viento portátil.
B) Vista del túnel de viento portátil y detalles de 1) Placas deflectoras, 2) Placa criba y 3) Hélice.

Figure 1.
A) Diagram of the portable wind tunnel components. B) View of the portable wind tunnel and details of 1) Flaps, 2) Honeycomb and 3) Propeller.



Tolva para simular saltación

Para realizar simulaciones de tormentas de viento con inyección de un flujo determinado de partículas de saltación, puede ser utilizada una tolva que permite introducir en el flujo de viento, dentro del túnel, una determinada cantidad de material (Fig. 2). La tolva fue construida con chapa galvanizada de 1 mm de espesor y se ubica en la parte superior del túnel en la primera sección. El material se inyecta al flujo de aire por gravedad, a través de un tubo de 1 cm de diámetro, cuyo extremo inferior se ubica 15 cm por encima del piso del túnel. El material se agrega con un determinado caudal que puede ser regulado por medio de un sistema de planchuelas deslizables con orificios coincidentes, donde el máximo caudal se logra cuando el orificio de la planchuela deslizable coincide con el orificio fijo de la tolva (Fig. 2). El deslizamiento de la planchuela permite disminuir el caudal suministrado debido a la coincidencia parcial de ambos orificios. El caudal máximo que se puede suministrar es de 11 g s^{-1} .

Rutina de medición

La rutina de medición con el túnel es simple y la misma puede ser realizada por dos operarios. En primer lugar, una vez elegida la superficie de medición, el chasis debe nivelarse para asegurar un adecuado montaje de las secciones. Luego, las secciones se acoplan en el siguiente orden: sección curva, placa cribada, sección cubierta, secciones de medición. Esta

operación se realiza con la ayuda de agarraderas ubicadas en los costados de cada sección. Al final del túnel se ubica el colector o los instrumentos adecuados al estudio que desea realizarse.

El túnel se enciende y se alcanza la intensidad deseada mediante un acelerador ubicado en el tablero de mando. El control de velocidad se realiza relacionando el régimen de giro del motor con la velocidad de viento a 0,6 m de altura a la salida. Una vez establecida esta asociación, la velocidad del viento deseada es estimada. Finalizada la simulación, las secciones, a excepción de la sección curva, son colocadas en el chasis del túnel para su correcto transporte.

CALIBRACIÓN DEL TÚNEL DE VIENTO

MATERIALES Y MÉTODOS

La calibración del túnel de viento fue realizada sobre un suelo Haplustol Éntico en el predio de la Facultad de Agronomía de la UNLPam ($36^{\circ}5'S$; $64^{\circ}W$). Para realizar la misma la superficie se mantuvo sin rugosidad ni cobertura vegetal.

Calibración de la velocidad del viento a la salida del túnel en función del régimen de giro del motor

Se realizaron cinco simulaciones para relacionar el régimen de giro del motor y la velocidad del viento a la salida del túnel. Los valores de régimen de giro seleccionados fueron 1500,



Figura 2.
Vista de la tolva para saltación.
Figure 2.
View of the saltation device.

2000, 2500, 3000 y 3500 rpm. El mismo fue medido con un tacómetro digital. En tanto que la velocidad de viento fue medida a la salida del túnel y a una altura de 0,6 m con un anemómetro portátil. Ambas variables fueron relacionadas mediante un análisis de regresión lineal.

Calibración del perfil vertical de velocidades de viento

La calibración del perfil vertical de viento es un proceso iterativo que se logra mediante el ajuste del ángulo de las placas deflectoras hasta que el perfil vertical de viento logre un ajuste adecuado a la Ec. 1. La velocidad del viento fue medida durante 1 minuto a 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 cm de altura desde la superficie del suelo. Estos resultados de velocidades de viento a diferentes alturas se graficaron junto a la Ec. 1 para determinar el grado de ajuste.

Distribución vertical del material erosionado

Para analizar la distribución vertical del material erosionado en el túnel se realizaron dieciocho simulaciones. A la salida del túnel de viento se instalaron cinco colectores BSNE a 10, 20, 30, 40 y 50 cm de altura. El material recolectado se pesó en una balanza analítica ($\pm 0,0001$ g). El flujo de masa horizontal, la cantidad de suelo pasando por unidad de área en un plano vertical, para cada uno de los colectores fue calculado según la Ec. 2:

$$f(z) = \frac{P}{A} \quad (2)$$

donde, $f(z)$ es el flujo de masa horizontal de un colector ubicado a una altura específica z , P [kg] es el peso de sedimento recolectado y A [m²] es el área del orificio de entrada del

colector. Una vez calculado $f(z)$ para cada colector, su distribución vertical fue estimada mediante el ajuste a la Ec. 3 propuesta Stout & Zobeck (1996) para mediciones de campo:

$$f(z_e) = f_0 \left(1 + \frac{z}{\sigma} \right)^{-2} \quad (3)$$

donde, f_0 es el flujo horizontal de masa a la altura cero [kg m⁻²], z es la altura [m] y σ , la altura media de la capa de saltación [m]. Por último, el transporte de masa horizontal, Q [kg m⁻¹], fue estimado mediante la integración de los valores de $f(z_e)$. La estimación de los parámetros de la Ec. 3, el ajuste entre los datos medidos y estimados de la distribución vertical de $f(z)$ y el cálculo de Q fueron realizados mediante algoritmos desarrollados con Microsoft Excel© facilitados por el Dr. Zobeck de la unidad de estudio de la erosión eólica del ARS-USDA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra la relación entre la velocidad a la salida del túnel y el régimen de giro del motor. Se observa un ajuste lineal adecuado para la estimación de la velocidad, alcanzando un valor máximo de 22,5 m s⁻¹. Estos valores de velocidad permiten trabajar por encima de la velocidad umbral establecida para los suelos de la región en 7,5 m s⁻¹ a 2 m de altura (de Oro & Buschiazzi, 2009). La velocidad alcanzada por el túnel permite simular los principales eventos erosivos ocurridos en condiciones naturales, desde eventos de baja intensidad hasta ráfagas de alta velocidad.

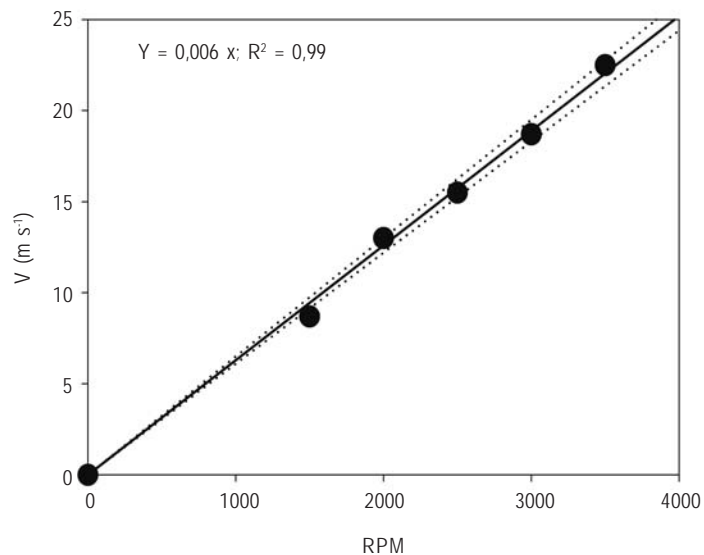


Figura 3.
Relación entre la velocidad (m s⁻¹) a los 0,6 m de altura a la salida del túnel y las revoluciones por minuto del motor (RPM).
Figure 3.
Relationship between wind speed (m s⁻¹) at a height of 0.6 m at the end of the tunnel and the revolutions per minute of the engine (RPM).

El análisis del perfil vertical de viento indica que fue posible ajustar el perfil logarítmico propuesto por la Ec. 1 (Fig. 4). Esto significa que el perfil de viento simula las condiciones naturales. Los valores de la capa límite (altura donde se alcanza el 99% de la velocidad máxima) alcanzada para este estudio supera los 0,5 m; altura recomenda-

da para los estudios de erosión eólica (Van Pelt & Zobeck, 2013).

La Tabla 1 muestra el Q para las diferentes simulaciones. La cantidad de material erosionado varió entre 0,01 y 87,7 kg m⁻¹. Los coeficientes de determinación para la distribución vertical de f(z) variaron entre 0,33 y 0,98; siendo

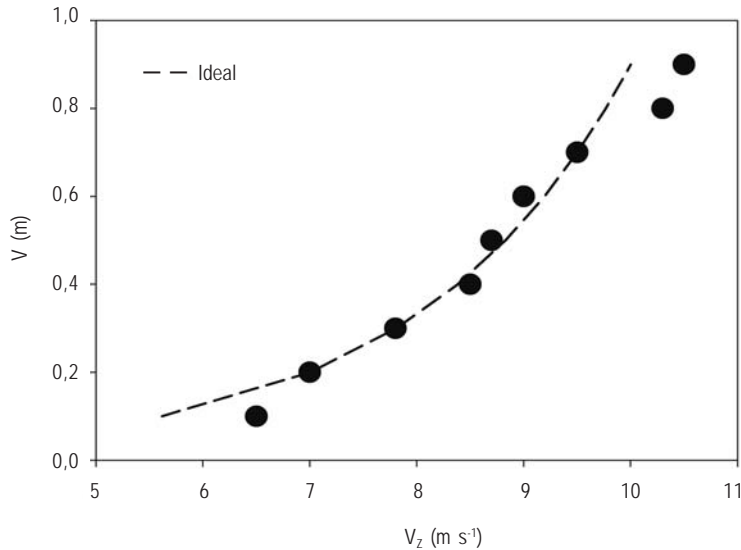


Figura 4.
Perfil vertical de velocidades de viento. Altura de medición (Z) y velocidad en función de la altura (V_z). La línea rayada indica el perfil ideal en función de la ecuación de Prandtl.

Figure 4.
Vertical wind speed profile. Measurement height (Z) and speed in function of height (V_z). The dashed line indicates the idealized profile according to Prandtl's equation.

Simulación	Q (kg m ⁻¹)	Bondad de ajuste (R ²)
1	87,74	0,85
2	0,05	0,90
3	0,18	0,96
4	0,05	0,91
5	0,16	0,92
6	0,76	0,98
7	0,26	0,70
8	0,15	0,97
9	0,24	0,91
10	0,04	0,92
11	0,22	0,54
12	0,01	0,85
13	5,31	0,33
14	0,07	0,87
15	0,66	0,98
16	0,03	0,77
17	0,08	0,88
18	0,02	0,87

Tabla 1.

Transporte de masa horizontal (Q) para 18 simulaciones con el túnel de viento portátil y coeficiente de determinación para ajustar la distribución vertical del flujo de masa horizontal según la ecuación de Stout & Zobeck (1996).

Table 1.

Horizontal mass transport (Q) of 18 portable wind tunnel simulations and the coefficient of determination to adjust the vertical distribution of horizontal mass flux according to equation of Stout & Zobeck (1996).

16 de las mismas significativas al 1%, 1 al 5% y 1 al 10%. Estos resultados indican que la distribución de material en función de la altura dentro del túnel es similar a la distribución en condiciones naturales, ya que ambas pueden ser explicadas por la Ec. 3.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

El túnel de viento desarrollado en el INCITAP cumple con las condiciones de operatividad y diseño para ser utilizado en estudios de erosión eólica a campo, dado que el perfil vertical de la velocidad del viento y del material erosionado en el túnel se ajustó a los encontrados en condiciones naturales. Además la operación del túnel es sencilla y puede ser llevada a cabo por dos personas. El uso del túnel permitirá el estudio y entendimiento de los procesos básicos de la erosión eólica y el desarrollo de tecnología para el control de la misma.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por las siguientes instituciones: el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). El túnel de viento fue construido por el Sr. Omar Andreoli.

BIBLIOGRAFÍA

- Colazo, JC. 2012. Selección de indicadores de sostenibilidad relacionados con la erosión eólica para la región Semiárida Central Argentina. Tesis para optar al grado de doctor en agronomía. UNS, Bahía Blanca. 141 pp.
- de Oro, LA & DE Buschiazzo. 2009. Threshold wind velocity as an index of soil susceptibility to wind erosion under variable climatic conditions. *Land Degrad. Develop.* 20(1): 14-21.
- Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degrad. Develop.* 12(6): 519-539.
- Mendez, MJ; R Funk & DE Buschiazzo. 2012. Field wind erosion measurements with Big Spring Number Eight (BSNE) and Modified Wilson and Cook (MWAC) samplers. *Geomorphology* 129: 43-48.
- Shao, Y & MR Raupach. 1992. The overshoot and equilibration of saltation. *J. Geoph. Res* 97(D18): 20559-20564.
- Shao, Y. 2008. Physics and modelling of wind erosion. 2nd Edition. Springer. 452 pp.
- Stout, JE & TM Zobeck. 1996. The Wolfforth field experiment: a wind erosion study. *Soil Sci.* 161(9): 616-632.
- Stroosnijder, L. 2005. Measurement of erosion: It is possible? *Catena* 64: 162-173.
- Tatarko, J; MA Sporic & EL Skidmore. 2013. A history of wind erosion prediction models in the United States Department of Agriculture prior to the Wind Erosion Prediction System. *Aeolian Research* 10: 3-8.
- Van Pelt, RS & TM Zobeck. 2013. Portable wind tunnels for fields testing of soils and natural surfaces. Pp 59-73. In: N Ahmed (ed), Wind tunnels designs and their diverse engineering applications. InTech.
- Van Pelt, RS; TM Zobeck; MC Baddock & JJ Cox. 2010. Design, construction, and calibration of a portable boundary layer wind tunnel for field use. *Trans. ASABE* 53(5): 1413-1422.
- Wagner, LE. 2013. A history of Wind Erosion Prediction Models in the United States Department of Agriculture: The Wind Erosion Prediction System (WEPS). *Aeolian Research* 10: 9-24.
- White, BR & H Mounla. 1991. An experimental study of Froude number effect on wind tunnel saltation. *Acta Mech. (Suppl.)* 1: 145-147.
- Zobeck, TM; MC Baddock & RS Van Pelt. 2013. Anthropogenic environments. Pp 395-413. In: J Shroder; N Lancaster; DJ Sherman; ACW Baas (eds), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, Aeolian Geomorphology 11.
- Zobeck, TM & RS Van Pelt. 2014. Wind erosion. Publications from USDA-ARS/UNL Faculty. Paper 1409. Disponible en: <http://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1409>. Acceso el 20 de noviembre de 2015.

