

PROTOTIPO PARA CAPTURAR VAPOR DE AGUA DEL AMBIENTE MEDIANTE SÍLICA GEL

PROTOTYPE FOR CAPTURING ENVIRONMENTAL WATER VAPOR USING SILICA GEL

María del Carmen González Rangel; Federico Hahn*

Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, MÉXICO. C. P. 56230
Correo-e: fhahn@correo.chapingo.mx (*Autor para correspondencia)

RESUMEN

Los árboles que se plantan para reforestar requieren de agua para su crecimiento y para evitar su muerte en sus primeros tres años de establecimiento. El agua en forma de vapor de agua existente en el aire puede recuperarse para poder regar dichas plantas. Se utilizó la sílica gel un desecante sólido que actúa como esponja adsorbiendo la humedad y soltándola al ser sometida a altas temperaturas posteriormente. Se desarrollaron tres prototipos a escala llenos de sílica gel comparando la cantidad de agua recuperada; uno estaba recubierto de acero inoxidable, otro de cartoncillo y el último de malla. Se realizaron pruebas sobre su capacidad de adsorción, desorción por temperatura, exposición a la intemperie y velocidad de adsorción. La sílica seca fue capaz de adsorber hasta el 36.8 % de su peso como agua. La medición de la humedad relativa cercana a la sílica gel con un sensor no sirvió de indicador de la cantidad de vapor de agua adsorbido por el desecante. La mayor adsorción de $5.3 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ se obtuvo en el cilindro mallado a una velocidad del aire de $2.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, requiriéndose de una gran superficie de contacto del aire húmedo con la sílica gel. Para producir los 4 litros de agua diaria para regar un árbol se necesitarían 13 kg de sílica si el periodo de operación es de 6 horas. El prototipo requiere de un cilindro de 83 cm de largo y 30 cm de diámetro.

PALABRAS CLAVE: Sílica gel, vapor de agua, condensación.

ABSTRACT

Trees planted for reforestation require of water for its survival and growth during the first three years after planting. Water in form of air water-vapor can be recovered to irrigate these plants. Silica gel a solid desiccant behaving like a sponge was used to adsorb air moisture and produce after heated. Three scale prototypes filled up with silica gel were developed comparing the water being recovered; one prototype was rolled by a stainless steel plate, another by cartoon and the last one by a stainless steel mesh. Tests were carried to determine the adsorption capacity, desorption caused by the heat, environmental exposition and adsorption speed. Dry silica gel adsorbed 36.8 % of its dry weight as water. Relative humidity sensor measurements nearby the silica gel did not indicated vapor water content adsorbed by the desiccant. Maximum $5.3 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}$ adsorption was obtained with the mesh prototype at an air speed of $2.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ requiring a big contact surface between the silica gel and the moist air. To produce 4 liters of water daily for irrigating a tree 13 kg of silica are required if the operating time is of 6 hours. The cylindrical prototype will be 83 cm long with a diameter of 30 cm.

KEYWORDS: Silica gel, water vapor, condensation.



doi: 10.5154/r.inagbi.2014.02.003

INTRODUCCIÓN

Las plantas, los animales, los ecosistemas y los asentamientos humanos son sensibles a las variaciones en el almacenamiento, los flujos y la calidad de agua en la superficie de la tierra. Estas variaciones ocurren en la humedad del suelo, las aguas subterráneas, la nieve y el agua superficial en los lagos, los humedales y los flujos hacia y desde la superficie de la tierra siendo sensibles al cambio climático (Lettenmaier *et al.*, 2008).

Se requiere de agua fresca para consumo de agua y riego y se considera que para el año 2025 dos terceras partes de la población carecerán de agua; únicamente mediante la desalinización por osmosis inversa y destilación multi-efecto puede obtenerse la cantidad de agua deseada (Lindblom y Nordell, 2006). Lindblom y Nordell (2007) pasaron aire húmedo por tuberías enterradas en el suelo para obtener $3.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ de agua para consumo humano. En la reforestación se requiere de agua para asegurar el buen crecimiento y la subsistencia de los árboles. En España la reforestación con roble *Quercus suber* en tierras degradadas muestran una mortandad del 45 % comparados contra los de un 20 % cuando son plantados sobre sustratos conteniendo hidrogel (Chirino *et al.*, 2009). Después de cinco años de su establecimiento en la mesa "El Durazno" en el municipio de Iturbide, Nuevo León, México, las especies regionales *Pinus cembroides* y *Pinus greggii* alcanzaron tasas de sobrevivencia, con 64 y 55 %, respectivamente (Dominguez *et al.*, 2001); la región era de temporal con una precipitación promedio anual de 580 mm. Un pino requiere de hasta 4 litros de agua diaria durante sus primeros tres años de vida para su subsistencia (Klett y Whiting, 2001).

Los desecantes pueden ser sólidos o líquidos; los desecantes sólidos como la sílica gel actúan como esponjas adsorbiendo la humedad sin cambios físicos y químicos (Davanagere *et al.*, 1999). La estructura de la sílica gel es extremadamente porosa con un diámetro de nanómetros teniendo una superficie interna por volumen de $250 \text{ m}^2\cdot\text{cm}^{-3}$ (Mazzei *et al.*, 2005). La sílica gel está compuesta de 97 % de sílica y 3 % alúmina; contiene numerosos poros y capilares en donde se condensa el agua, adsorbiendo la humedad y soltándola al ser sometida a altas temperaturas posteriormente. Su largo tiempo de vida, alta afinidad por la humedad, ser inerte y no-tóxica y su optimización energética la hacen muy atractiva en equipos de aire acondicionado.

La capacidad de adsorción del sílica gel decrece rápidamente con el ascenso de la temperatura, especialmente cuando la presión parcial del vapor de agua es baja (La *et al.*, 2010). Cuando el aire es húmedo, éste tiene una presión de vapor más alta. En contraste, hay muy pocas moléculas de agua sobre la superficie seca del desecante, entonces la presión del vapor de agua de la superficie del desecante es muy baja. Las moléculas de agua se mueven del aire húmedo al desecante seco en orden de equilibrar

la diferencial de presión. Con los desecantes, la remoción de vapor ocurre en la fase de vapor y no hay condensación de líquido. En consecuencia, la deshumidificación del desecante puede continuar siempre y cuando el punto de rocío del aire esté por debajo del punto de congelación.

En el presente trabajo se pretende evaluar la capacidad de desecante sílica gel para adsorber y desorber el vapor de agua del medio ambiente. El uso del desecante pretende evaluar la eficacia del sílica gel para capturar vapor de agua del aire atmosférico y mediante un incremento de temperatura liberar la humedad para regar árboles.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de adsorción llevado a cabo por el sílica gel es un proceso reversible. La desorción (proceso inverso a la adsorción) se lleva a cabo mediante un cambio de presión entre el desecante y el ambiente que lo rodea. Es necesario conocer las propiedades que tiene en la adsorción y desorción de vapor de agua la sílica gel para su uso en el riego de árboles. Las pruebas realizadas fueron la capacidad de adsorción, desorción por temperatura, exposición a la intemperie, velocidad de adsorción.

La sílica gel de 3.5 mm de diámetro fue colocada en charolas de papel aluminio y secado en una estufa a $90 \text{ }^\circ\text{C} \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ durante un periodo de dos horas para evaluar la capacidad de adsorción. Para establecer el límite superior de operación de la sílica se procedió a saturarla de humedad mediante inundación. Se colocaron 300 g de sílica en un frasco y se añadieron 280 mL de agua, dejándose reposar por un periodo de 18 horas. La prueba se realizó por triplicado. Después del espacio de tiempo mencionado se procedió a retirar el exceso de agua, para de esta manera cuantificar la cantidad de agua que el sílica fue capaz de adsorber hasta su saturación forzada.

Una vez que se obtuvo la capacidad máxima de adsorción se sometió el material a una desorción mediante temperatura. La desorción se forzó aplicando calor mediante una placa de calentamiento hasta evaporar el agua contenida en el sílica gel. La evaporación se realizó en un recipiente de aluminio, registrándose la diferencia de peso ocasionada por la pérdida de vapor de agua con respecto al tiempo.

$$\theta = \frac{KP}{1 + KP} \quad (1)$$

La relación (1) da lugar a la isoterma de Langmuir, que provee un mejor ajuste a los datos experimentales de los procesos de adsorción y desorción. Donde θ se define como la fracción de la superficie cubierta, su valor se encuentra entre 0 y 1; K es la relación entre las constantes de rapidez de adsorción y desorción ($K=k_a/k_d$) y determina el estado de equilibrio a una presión dada (Tubert y Talanquer, 1997).

El sílica gel se dispuso en un recipiente de aluminio a manera de que estuviese en contacto con la atmosfera

externa, se colocaron 300 g del material y se expuso a la intemperie durante toda la noche (15 horas aproximadamente). Se colocó sobre la sílica un sensor de humedad y temperatura. Una vez que el material se retiró del medio ambiente, se probó la desorción por medio de la aplicación de calor, colocando esta vez un sensor de humedad relativa para monitorear el comportamiento de la humedad durante este proceso y poniendo una cama de algodón para que el sílica no tuviese contacto directamente con el recipiente de aluminio.

Con el objeto de conocer la velocidad de adsorción del sílica, éste se colocó en dos formaciones, la primera en un recipiente cilíndrico vertical de aluminio de 14 cm de diámetro y una altura de 2.5 cm, resultando de un volumen total de 384.8 cm³. En el segundo la sílica se colocó en un recipiente cilíndrico horizontal de 7.5 cm de diámetro y 6 cm de alto, con volumen total de 265.0 cm³. Se registró la ganancia de peso conforme avanzó el tiempo de exposición.

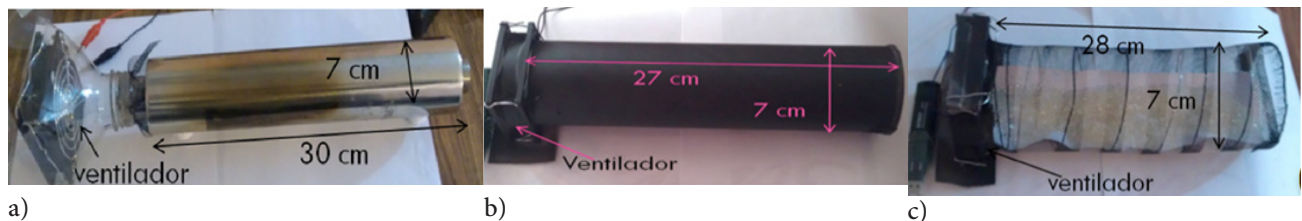


FIGURA 1. Prototipo con cilindro (a) de acero, (b) de cartoncillo y (c) mallado.

La sílica gel saturada de agua se colocó en un tubo de acero inoxidable con una salida para obtener vapor de agua liberada. Por medio de una placa de calentamiento se calentó el tubo forzando a la sílica a liberar el agua adsorbida en forma de vapor. A la salida del tubo se colocó una manguera transparente mediante la cual se dirigió el vapor y el agua condensada hacia el suelo.

Para estimar el área óptima de sílica gel para la adsorción de vapor de agua se propusieron tres prototipos (Figura 1) con tres velocidades de aire diferentes. Los prototipos utilizados fueron de forma cilíndrica con tres diferentes recubrimientos (acero inoxidable, cartoncillo y malla metálica de 400 mesh), colocados en posición horizontal para propiciar una mayor área de contacto entre el aire húmedo y el sílica. La disposición elegida para propiciar una mayor adsorción requiere de una gran superficie de contacto del aire húmedo con la sílica gel siendo el cilindro de 30 cm de largo por 1.5 cm de alto. En cada uno de los cilindros se adaptó un ventilador para empujar el aire hacia la superficie de la sílica e incrementar así la velocidad con la que ésta adsorbe el vapor de agua. Para que el ventilador produzca tres diferentes velocidades de aire se aplicaron tres diferentes voltajes, y así se pudo elegir la velocidad a la cual la adsorción era máxima. La velocidad se midió cada 20 minutos y el tiempo de exposición fue de 1 hora. Se realizaron tres repeticiones por cada uno de los cilindros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La prueba al saturar la sílica gel de agua mostró un incremento de peso promedio de 110.4 g debido al agua adsorbida. La relación entre este peso y el peso inicial de la sílica seca indica que es capaz de adsorber hasta el 36.8 % de su peso como agua. Ng *et al.*, 2001 comentan que la sílica gel absorbe entre 35 y 40 % de su peso fresco.

En la Figura 2a se presenta el comportamiento de los parámetros medidos durante el proceso de desorción de la sílica gel, observándose un comportamiento lineal en la pérdida de humedad (medida como pérdida de peso) al oscilar la temperatura entre 75 y 86 °C. Tres diferentes tipos de sílica gel mostraron un 95 % de desorción a 90 °C y que a medida que la temperatura se incrementó, el tiempo de regeneración disminuyó (Ng *et al.*, 2001). La Figura 2b muestra la tendencia de la humedad relativa del ambiente donde se está secando el sílica gel después de haber sido saturado durante un periodo de una hora y cuarenta minutos.

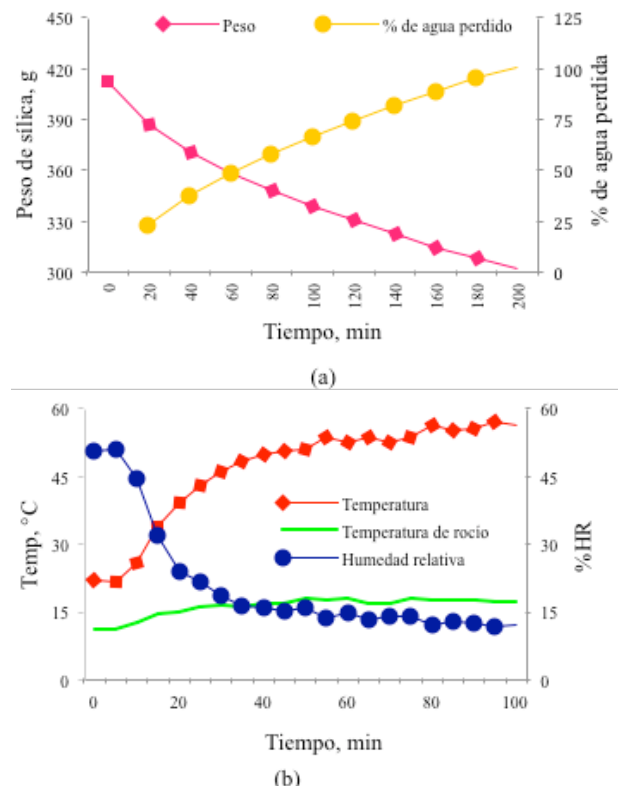


FIGURA 2. Comportamiento en la (a) pérdida de peso del sílica y (b) temperatura y HR durante de la desorción.

La adsorción de las muestras expuestas al medio ambiente mostraron una ganancia en peso variable de 13.5 g por lo que el porcentaje de adsorción promedio fue de 4.53 %. La muestra que menos adsorbió fue de 2.5 % y la que más adsorbió fue de 7.5 %.

En la Figura 3 se utilizó sílica gel sin saturar, tomándose la muestra previamente sometida a hidratación al medio ambiente. En esta prueba el porcentaje de humedad relativa disminuye 2 % después de una hora y media, sin embargo, sí hay pérdida de vapor de agua. Se puede asumir que la humedad relativa dentro o en la cercanía del sílica gel no es un indicador para definir la presencia o ausencia de vapor de agua adsorbido por el material desecante.

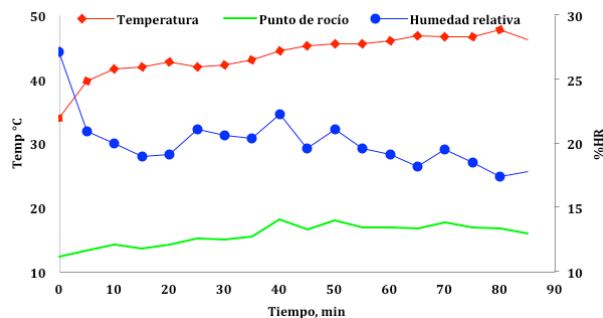


FIGURA 3. Comportamiento de humedad y temperatura durante el secado (desorción) del sílica gel por medio de calor.

El segundo recipiente utilizado es cilíndrico teniendo una mayor cantidad de sílica gel y al hacer fluir una corriente de aire se fuerza una mayor adsorción. De las dos salidas que se tienen en la parte superior del recipiente puede sacarse aire húmedo y cuando se eleva aún más la temperatura de vapor de agua. Al condensarse el vapor de agua, este puede ser directamente inyectado al suelo. El incremento de peso en el prototipo vertical (curva verde de la Figura 4) presenta una mayor pendiente en los primeros 60 segundos; tal incremento de $0.1 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ se muestra en el cuadro naranja. La pendiente que representa el peso ganado por la humedad se mantiene constante durante las 12 horas de muestreo en el prototipo horizontal y su valor máximo de $7 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ esta mostrado en el cuadro rosado. La ganancia de peso al exponerse la sílica gel al medio ambiente para ambos prototipos es de $0.003 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$.

A partir de una muestra de sílica saturada se evaporó el agua adsorbida mediante la aplicación de calor. El agua capturada a la salida se obtuvo como condensado y se condujo mediante una manguera hasta el suelo donde se almacenaba en un frasco sellado con papel film. El resultado obtenido fue la condensación del vapor de agua casi en su totalidad y el vapor que no condensó llegó al suelo en un periodo más largo. El suelo recibió el 50 % del peso perdido por la sílica debido a fugas iniciales de vapor y al condensado remanente a lo largo de la manguera. Con un sistema completamente sellado es posible inyectar el

100 % del vapor obtenido del secado de la sílica hacia el suelo como condensado o vapor.

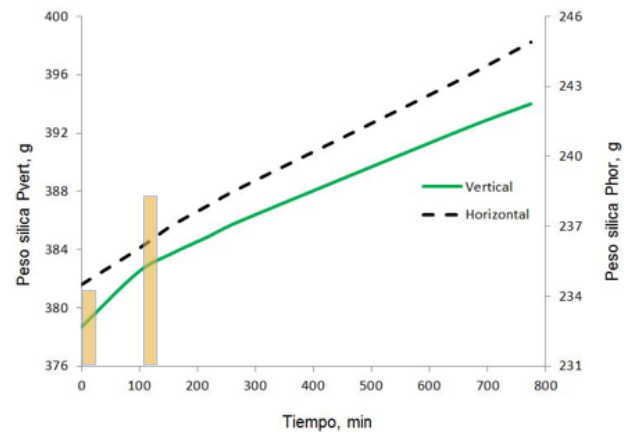


FIGURA 4. Incremento de peso de la sílica gel en los prototipos vertical y horizontal.

La duración del secado se prolongó durante varias horas lo que implica un gasto energético superior para lograr la desorción que el que se requiere para la adsorción. El sílica gel en contacto con la lámina de acero caliente se quemó (Figura 5) y es preferible el secado por aire caliente donde el material desecante no está en contacto directo con la sílica gel evitando daños. En los sistemas de secado en donde se utiliza la sílica gel como desecante (Madhiyanon et al., 2007) es necesario invertir un 40 % aproximadamente de la energía total del proceso en la regeneración de dicho material (entre 13 y 16 $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ de agua), lo cual es considerable si se plantea obtener el agua para el riego de árboles en lugares sin acceso a la red eléctrica. Resulta un reto el producir esta cantidad de energía mediante fuentes alternativas como lo es la energía solar.

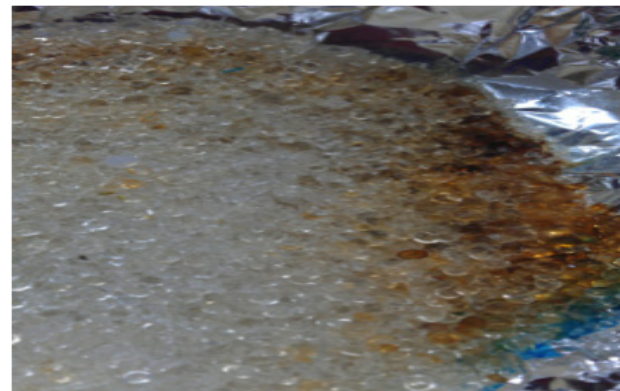


FIGURA 5. Sílica quemada en el cilindro de acero inoxidable.

La prueba para lograr una mayor adsorción en menor tiempo, se realizó forzando a pasar el viento a través de tres cilindros con distintas características, en el que se dispuso una cantidad determinada de sílica gel (Cuadro 1). Las evaluaciones se realizaron por periodos de una hora midiendo la ganancia de vapor de agua como diferencia de peso. Las velocidades del aire son similares a las de $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ reportadas por Mazzei et al., 2005 utilizadas por un

CUADRO 1. Resumen de la prueba realizada para adsorción de sílica con aire forzado

Cilindro	Velocidad del aire(m·s ⁻¹)	Peso ganado(g·h ⁻¹)
Acero	3.4	2
	3.8	1.8
	3.6	2.1
Cartoncillo	1.4	2.4
	1.9	2.1
	2.0	1.7
Mallado	2.1	3.6
	2.6	4.9
	2.8	5.3

deshumidificador para un proceso continuo que utiliza una rueda desecante. La velocidad del aire debe ser moderada para evitar la pulverización del desecante. A grandes rasgos se observa que los cilindros de acero y cartoncillo (Figura 1a y Figura 1b) pierden capacidad de adsorción a medida que la velocidad del aire aumenta. De forma contraria en el cilindro mallado (Figura 1c) la capacidad de adsorción por unidad de tiempo aumenta cuando la velocidad del viento es mayor.

El cilindro mallado fue el de mayor adsorción obtenida debido a la mayor exposición de la sílica al medio ambiente. Adsorbió el 5.3 % de su peso en un periodo de una hora a una velocidad de aire de 2.8 m·s⁻¹ cuando la humedad relativa del aire era de 43 %. En comparación con un 2 % por hora en promedio alcanzado con los cilindros de acero y cartoncillo.

Se observa una tendencia positiva en los periodos en los que la humedad relativa es mayor y una tendencia negativa en las horas con menor humedad. Esto se explica por la diferencia de concentración de vapor de agua entre la sílica gel y el ambiente que le rodea por diferencia de presiones se da un flujo de vapor de agua del sitio de mayor concentración al de menor concentración, es decir, que cuando el aire posee menor humedad relativa que la sílica, el vapor de agua se mueve de la sílica gel al aire.

Al requerirse 4 litros de agua por día para regar un árbol de un año de edad, se requiere exponer la sílica gel al medio ambiente. En el periodo entre las 2 y las 8 de la mañana cuando la humedad relativa se encuentra por encima del 70 % se puede captar 4 litros de agua. Si se distribuyen los 4 litros entre las 6 horas de mayor humedad relativa el requerimiento se vuelve de 667 mL por cada hora, para lo cual se necesitarían 13 kg de sílica seca. Si la densidad de 0.885 g·cm⁻³, el volumen requerido para 13 kg es de 14,690.3 cm³.

El prototipo propuesto de 83 cm de largo y 30 cm de diámetro presenta mucho espacio para una mejor distribu-

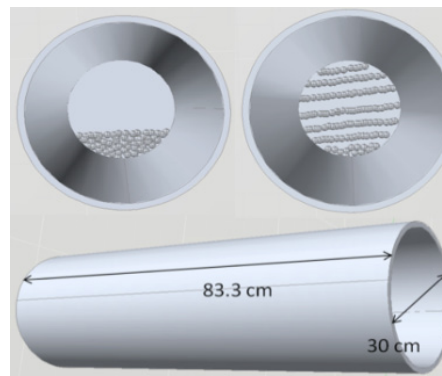


FIGURA 6. Prototipo para almacenar 13 kg de sílica gel.

ción del material, bajo el mismo principio de forzar la adsorción de vapor de agua. El flujo del aire debe ser perpendicular al largo del tubo y el cilindro debe tener una sola entrada y una salida para minimizar pérdidas.

CONCLUSIONES

Utilizando el cilindro mallado, se obtuvo la mayor cantidad de agua por unidad de tiempo, siendo de 5.3 g·h⁻¹, considerando el volumen a través del cual se hizo circular el aire de 135 cm³, se obtuvo un 0.04 g·cm⁻³·h⁻¹ forzando el aire a una velocidad de 2.8 m·s⁻¹. En condiciones normales, es decir, sin aire forzado la misma sección adsorbe 0.003g·cm⁻³·h⁻¹ que representa solo el 7.5 % de la adsorción con aire forzado, o dicho de otra manera el obligar el paso del aire húmedo incrementa la adsorción hasta un 92.5 %.

Respecto a la ganancia de humedad que puede adquirir el suelo, ésta depende de las condiciones bajo las que se lleve a cabo la desorción, si se realiza por temperatura en un sistema cerrado y solo una salida disponible para el vapor liberado. Este último se condensa en su mayoría y el vapor también puede inyectarse al suelo; bajo el entendido que la salida está insertada en el suelo o muy cercana a él. La temperatura del vapor de agua liberado disminuye conforme recorre la manguera de salida provocando la condensación de la mayor parte del vapor, por lo que el agua que llega hasta el suelo posee una baja temperatura.

LITERATURA CITADA

- Chirino E.; Vilagrosa A.; Cortina J.; Valdecantos A.; Fuentes D.; Trubat R.; Luis V. C.; Puértolas J.; Bautista S.; Baeza M. J.; Peñuelas J. L.; Vallejo V. R. 2009. Ecological restoration in degraded drylands: the need to improve the seedling quality and site conditions in the field. In: *Forest Management*. Ed. Steven P. Grossberg. Nova Science Publishers, Inc. Cap 4: 85-158.
- Davanagere B. S.; Sherif S. A.; Goswani D. Y. 1999. A feasibility study of a solar desiccant air conditioning system Part I: Psychometrics and analysis of the conditioned zone. *International Journal of Energy Research* 23: 7-21.
- Domínguez P. A.; Nívar J. J.; Loera J. A. 2001. Comparación del rendimiento de pinos en la reforestación de sitios marginales en Nuevo León. *Madera y Bosques* 7(1):27-35.

- Klett J. E. Whiting D. E. 2001. Care of Young Transplanted Trees. Bulletin No. 7.226. Colorado State University.
- La D.; Dai Y. J.; Li Y.; Wang R. Z.; Ge T. S. 2010. Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1): 130-147.
- Lettenmaier D.; Major D.; Poff L.; Running S. 2008. Water Resources. In: *The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources, and biodiversity*. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the subcommittee on Global change Research. Washington, DC., USA, 362 pp.
- Lindblom J.; Nordell B. 2007. Underground condensation of humid air for drinking water production and subsurface irrigation. *Desalination* 203: 417-434.
- Lindblom J.; Nordell B. 2006. **Water production underground condensation of humid air.** *Desalination* 189: 248-260.
- Madhiyanon T.; Adirekrut S.; Sathitruangsak P.; Soponronnarit S. 2006. Integration of a rotary desiccant wheel into a hot-air drying system: Drying performance and product quality studies. *Chemical Engineering Process* 46: 282-290.
- Mazzei P.; Minichiello F.; Palma D. 2005. HVAC dehumidification systems for thermal comfort: a critical review. *Applied Thermal Engineering* 25(5): 677-707.
- Ng K. C.; Chua, H. T.; Chung C. Y.; Loke C. H.; Kashiwagi T.; Akisawa A; Saha B. B. 2001. Experimental investigation of the silica gel-water adsorption isotherm characteristics. *Applied Thermal Engineering* 21: 1631-1642.
- Tubert, I.; Talanquer, V. 1997. Para saber, experimentar y simular sobre adsorción, *Educación química* 8: 186-190.

