

Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

ISSN 1409-2441

Vol. 17 (1)

Ene/Jul 2007

CONTENIDO

Artículos

1. Dimensionamiento y costeo de una planta de lavado de vehículos recolectores de desechos sólidos para los principales cantones del Área Metropolitana de Costa Rica 17-26
Ruiz, Francisco.
2. Caracterización de los registros acelerográficos obtenidos en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica..... 27-41
Schmidt, Víctor; Quirós, Christopher.
3. Optimización aplicada a la calibración y validación de modelos de elementos finitos de puentes 43-59
Rodríguez, Wilson; Muñoz, Edgar; Núñez, Federico.
4. Análisis mediante modelos físicos de interacción suelo-estructura en tuberías encerradas 61-76
Rodríguez, Jorge; Ruiz, Daniel; Coral, Álvaro; Pereira, Mauricio.
5. Pasta hidrotérmica y termoquímica a la soda obtenida a partir de residuos de paste (*Luffa cylindrica Roem*) 77-84
Blanco, María Lorena.
6. Diseño y construcción de un equipo de pruebas para la determinación de la resistencia al flujo de aire en granos y semillas..... 85-96
Aguilar, José Francisco.

Notas técnicas

1. Prototipo didáctico para la enseñanza de la Ingeniería Estructural 99-111
Muñoz, Edgar; Núñez, Federico; Otalora, Camilo.
2. Análisis de los factores que intervienen sobre la resistencia al flujo de aire en granos y semillas en operaciones de manejo poscosecha 113-124
Aguilar, José Francisco.

Trabajos de Graduación

Lista de proyectos de graduación de grado y posgrado del año 2006 de la Facultad de Ingeniería..... 127-140

Normas

Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería 143-150

EDITORIAL
UCR

<http://www.revistaingenieria.inii.ucr.ac.cr>
www.ucr.ac.cr / ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

ENERO/JULIO 2007 - VOLUMEN 17 - Número (1)

Número (1)

Enero / Julio 2007

Volumen 17

REVISTA INGENIERÍA



EDITORIAL
UCR

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN SOBRE LA RESISTENCIA AL FLUJO DE AIRE EN GRANOS Y SEMILLAS EN OPERACIONES DE MANEJO POSCOSECHA

José Francisco Aguilar Pereira

Resumen

Siempre que se diseña un sistema de aeración o de secado, es muy importante incluir la resistencia al flujo de aire (RFA) como un criterio de diseño. La RFA mide la fuerza de resistencia del grano o masa de la semilla al paso del flujo de aire. Este dato es útil como una herramienta de control de proceso, pues mide qué tan bueno es el contacto del aire con el producto, dando lugar a la cuantificación de la eficacia del proceso. Aquí se genera un marco amplio de análisis de la información disponible sobre la resistencia al flujo de aire (RFA) y se enfocan los parámetros que pueden afectarla y la interacción entre ellos, a saber: régimen de flujo, densidad aparente, tamaño y forma, grado de limpieza del grano y contenido de humedad. También, se muestra que actualmente la investigación en este criterio es muy poca con productos tropicales en comparación con productos de zonas templadas. Por lo que, utilizar información de otras latitudes como criterio en el diseño para productos tropicales, podría provocar errores. Por esta razón, se promueven trabajos futuros de investigación con productos tropicales.

En general, se brinda una herramienta útil para profesionales de ingeniería en procesamiento agrícola, especialmente para el diseño, selección y control de procesos de aireación y sistemas de secado.

Palabras clave: granos, semillas, ingeniería en procesamiento agrícola, sistemas de secado, sistemas de aireación, resistencia al flujo de aire.

Abstract

Whenever an aeration or drying system is designed, it is very important to include the air flow resistance (AFR) as a design criteria. The AFR measure the resistance force of the grain or seed mass to the flow and it is also useful as a process control tool, as it also measures how good is the air-product contact, which is directly related to the process efficiency. This paper shows a wide information analysis framework based on available information on resistance to the air flow in grains and seeds focusing in those parameters such as: types of air flow, *bulk density*, *size and shape*, *grade of cleanliness of the grain*, *flow direction and moisture content*, which can affect it in addition to the interaction among them. It is also shown that very little research has been done with tropical products as compared with products of other template zones, and the later is used as design criteria for tropical products which could lead to errors. For this reason, the paper promotes and suggest future research work with tropical products.

As a whole, this paper provides a useful criteria for design, selection and process control of aeration and drying systems specially for agricultural processing professionals.

Key words: grains, seeds, food engineering, drying system, aeration system, resistance to the air flow.

Recibido: 18 de febrero del 2005 • **Aprobado:** 24 de marzo del 2006

1. INTRODUCCIÓN

El aire, al moverse a través de una masa granular, encuentra una resistencia al movimiento que le produce una pérdida de energía y consecuentemente, una reducción

en su presión estática. El conocimiento de este fenómeno y la disponibilidad de la información sobre resistencia al flujo de aire producida por diversos granos, es de vital importancia en el diseño apropiado de sistemas de secamiento y aireación.

La investigación en la resistencia al flujo de aire, en adelante abreviada como RFA, a través de granos y semillas, surge desde 1931 con Stirmiman et al., citados por Ashwini y Muir (1986) y con Henderson S.M. en 1943, quienes brindan aportes principalmente en granos como el maíz (*Zea mays*), frijol de soya (*Glycine max*) y avena (*Avena sativa*). Un investigador que es reconocido en la historia por sus aportes aún de referencia, es Shedd (Akritidis & Siatras, 1979), quien entre 1945 y 1953 estudió ampliamente el fenómeno de la RFA y desarrolló las curvas de caída de presión para una gran cantidad de granos y semillas, las cuales han sido publicadas anualmente en el Manual de Estándares de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas (ASAE, 1982).

En la actualidad, se cuenta con una amplia información sobre la resistencia al flujo de aire, para casi todos los granos y semillas de importancia comercial que se producen en los países desarrollados. Sin embargo, las condiciones con las que se manejan dichos productos y los procedimientos particulares con que se realizaron las pruebas no son especificadas, aspectos que el diseñador y operador de planta debe tener presente al momento de tomar esta información bajo las condiciones propias de su sistema. Esta falta de información es una limitante a la hora de realizar los cálculos de carga de sistema, por lo que se hace necesario un mayor análisis de los factores que intervienen en la RFA, justificándose aún más en productos tropicales de importancia comercial en los países en desarrollo. En Costa Rica en el año 1993, inician los primeros pasos en la generación de curvas de RFA para productos tropicales por medio de varios proyectos de graduación en productos como la almendra de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*), el maíz (*Zea mays*), el café (*Coffea arabica*) y el arroz (*Oryza sativa*), entre otros. Estos trabajos se llevaron a cabo gracias a la coordinación de la Escuela de Ingeniería Agrícola y el Centro de Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS), ambos de la Universidad de Costa Rica, donde el coordinador fue el Ingeniero Ronald Jiménez.

2. ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN SOBRE LA RESISTENCIA AL FLUJO DE AIRE EN GRANOS Y SEMILLAS

Una capa de granos está compuesta por partículas y espacios intergranulares. En un momento determinado, cuando se produce el movimiento de aire a través de la capa de granos, existe un volumen de partículas, el cual ha experimentado el paso de una masa de aire a través de ellas y los espacios vacíos. En este paso se manifiestan dos fuerzas externas: la que actúa sobre la masa del fluido, que depende de la cantidad de partículas, y la fuerza que actúa sobre las partículas.

Agrawal y Chand (1974) establecen que las fuerzas externas que actúan sobre la masa del fluido de aire están constituidas por:

- La fuerza de arrastre debido al paso del fluido a través de las partículas.
- La resistencia de fricción entre el fluido y las paredes de la capa de granos.
- La fuerza asociada con los cambios en la energía mecánica debido a la compresibilidad del fluido. Se da un cambio en el volumen a una presión dada, generándose un trabajo por la fricción y la fuerza de resistencia sobre la partícula.

Para poder solventar la necesidad de los estudios y análisis teóricos que implican la resistencia al flujo de aire, los trabajos se han apoyado en aproximaciones estadísticas, dos de ellas que predicen el comportamiento de la resistencia al flujo de aire en una capa de granos son: las regresiones logarítmicas y las exponenciales. Para la primera regresión, el logaritmo es aplicado tanto a las variables dependientes como independientes, mientras que en la segunda, los datos no sufren ninguna transformación, como se muestra en las ecuaciones (1) y (2):

$$\log Q = b \log P + a \quad (1)$$

o:

$$Q = a P^b \quad (2)$$

donde:

a, b: constantes determinadas para el producto.

P: caída de presión, debida a la resistencia al flujo de aire a través del producto por unidad de profundidad del producto en el contenedor, Pa/m.

Q: caudal específico de aire, $m^3/s/m^2$.

Los datos de caídas de presión para granos y semillas se presentan generalmente en una gráfica, como líneas rectas o segmentos de línea en escala logarítmica. Una de las fuentes más reconocidas de referencia se encuentra en el libro anual de la ASAE, específicamente el estándar "ASAE Data: ASAE D212.1" (ASAE, 1982), que muestra las curvas empíricas de RFA a través de granos y semillas. Muchas de estas curvas se pueden representar utilizando la aproximación estadística dada por la ecuación (1) (ASAE, 1982), desarrolladas principalmente a partir de silos experimentales, anotando para cada curva de RFA cuál producto fue evaluado y en algunos casos, las condiciones de humedad de grano. Basado en la curvas, hay una tendencia lineal, en escala logarítmica, que provee una adecuada representación de los datos. A pesar de lo anterior y para efectos del análisis de la RFA en granos y semillas, es necesario comprender la interacción de factores físicos que intervienen, ya que como se indica en este documento, hay diferencias significativas en la RFA dadas ciertas condiciones del grano, que hacen necesario profundizar en los factores que intervienen y aproximarse en las curvas propias de RFA del sistemas de estudio. En este sentido, se presentan casos de estudio con varios granos y semillas, donde se analizan los resultados que surgen al variar los factores; sin embargo, es importante hacer énfasis que una verdadera evaluación tiene implicaciones multifactoriales.

Los factores que se presentan en el estudio son los siguientes:

- Régimen de flujo.
- Densidad aparente.
- Tamaño y forma.
- Grado de limpieza.
- Contenido de humedad.

2.1 Régimen de flujo

El parámetro número de Reynolds define aproximadamente los límites de los tres regímenes de flujo: laminar, transición y turbulento, por lo que se puede considerar al número de Reynolds como una razón de las fuerzas inerciales y viscosas del fluido, dicho número se define como:

$$R = \frac{D \cdot V}{\mu} \quad (3)$$

donde:

R: Número de Reynolds, adimensional.

D: Diámetro de tubo de conducción, m.

V: Velocidad del flujo de aire, m/s.

μ : Viscosidad cinemática, m^2/s .

El flujo laminar se define como aquel en que el fluido se mueve por capas o láminas, deslizándose suavemente una capa sobre otra capa adyacente, con sólo un intercambio molecular de cantidad de movimiento. Cual quiera que sea la tendencia hacia la inestabilidad y la turbulencia, se amortigua por fuerzas cortantes viscosas que resisten el movimiento relativo de las capas adyacentes. Sin embargo, en el flujo turbulento, las partículas se mueven en forma errática, con un intercambio de cantidad de movimiento transverso muy violento.

El número de Reynolds indica la importancia relativa de las tendencias de turbulento a laminar. Los límites del régimen de transición laminar a turbulento está entre los valores de número de Reynolds de 2000 a 4000.

Streeter y Wyle (1990) encontraron que en régimen de flujo laminar, las pérdidas son directamente proporcionales a la velocidad promedio, mientras que en el de flujo turbulento, las pérdidas son proporcionales a la velocidad elevada a una potencia que varía de 1,7 a 2,0. Estos datos fueron encontrados y validados en el trabajo realizado por Aguilar (1993) quien sugiere que los análisis de RFA deben efectuarse según el régimen, como ocurre en el caso particular de la almendra de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Para analizar la influencia del régimen en la RFA, la Figura 1 muestra tres curvas empíricas típicas de resistencia al flujo de aire en granos y semillas. Dado un flujo aparente se puede afirmar que la curva 1 tiene menor RFA que la curva 2 y esta última tiene menor RFA que la curva 3, esto es claro analizando de una curva a otra, sin embargo, al verificar el comportamiento de los datos de medición, antes de realizar los ajustes para la generación la curva RFA, se encuentran diferentes pendientes

producto de los regímenes de flujo que hace que las líneas de flujo se comporten de una manera particular en respuesta al desprendimiento de la capa límite. Algunas investigaciones como las realizadas por Akritidis y Siatras (1979) analizan las curvas en tres segmentos de línea recta con diferentes pendientes, donde el segmento izquierdo corresponde al flujo laminar, la línea del medio a la zona de transición y la línea derecha a la región de flujo turbulento. En este sentido presentan para efectos de cálculo, tres ecuaciones de ajuste para la determinación de la RFA, según el flujo de trabajo, ya que asegura una mejor correlación entre los datos observados y calculados. Sin embargo, está la tesis de utilizar el procedimiento de modelos lineales generales (GLM) de sistemas de análisis estadístico (SAS), el cual ha sido utilizado para evaluar la heterogeneidad de la pendiente para cada producto, donde estos análisis indicaron que la hipótesis de la homogeneidad de las pendientes podría no ser descartada. En otros trabajos similares, se han analizado, empleando el procedimiento GLM, la idoneidad de la ecuación de regresión de la forma de la ecuación (1), encontrándose coeficientes de correlación r^2 altos y la pendiente de los datos graficados fue esencialmente constante para el producto.

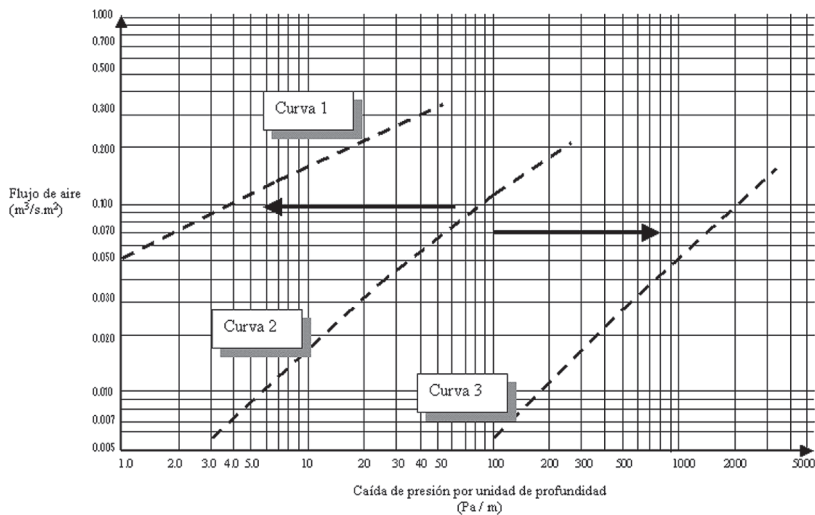


Figura 1. Muestra de curvas empíricas típicas de resistencia al flujo de aire en granos y semillas. Fuente: (El autor).

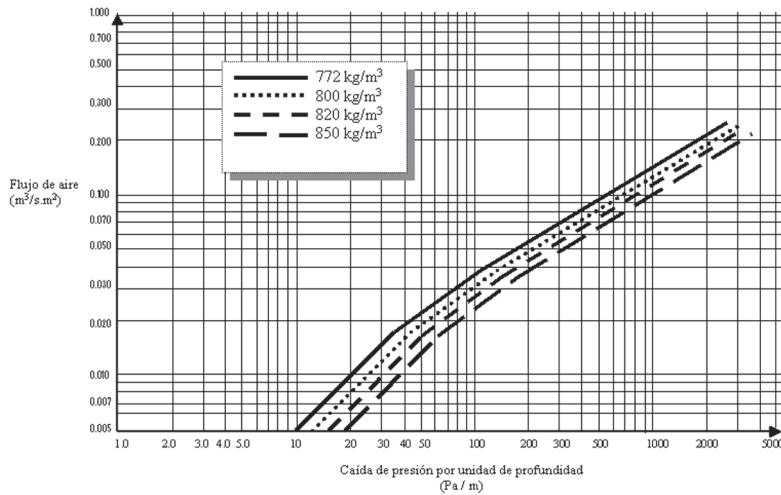


Figura 2. Efecto de la densidad aparente en la resistencia al flujo de aire (RFA) en sorgo (*Sorghum vulgare*).

Fuente: (Yang & Williams, 1990).

2.2 Densidad aparente

Es conocido que las propiedades físicas afectan claramente la caída de presión, entre ellas algunas características físicas del producto: densidad aparente, tamaño y forma, turgencia, maduración y el contenido de partículas finas. De estas características, solo la densidad aparente podría ser determinada fácil y consistentemente. Yang y Williams (1990) realizaron estudios con sorgo (*Sorghum vulgare*) y analizaron claramente la proporcionalidad del efecto de la densidad aparente y la RFA, es decir, a mayor densidad aparente mayor RFA, como se observa en la Figura 2. Es importante recalcar para el lector, que estas pruebas están circunscritas a condiciones controladas, donde, como se mencionó al inicio de esta sección, no se detallan otros aspectos físicos y pueden variar estas tendencias de producto a producto.

En caso del maíz (*Zea mays*), la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas, en sus estándares, muestra que un aumento en la densidad aparente causa que la resistencia al flujo de aire por unidad de profundidad, en una capa de maíz, se incremente. La caída de presión por unidad de profundidad se puede

predecir como una función del caudal de aire y de la densidad aparente del maíz, mediante el uso de la siguiente ecuación empírica (ASAE, 1982):

$$\frac{P}{D} = X_1 + \frac{X_2 \left(\frac{DA}{DP}\right)^2 \cdot Q}{\left(1 - \frac{DA}{DP}\right)} + \frac{X_3 \left(\frac{DA}{DP}\right) \cdot Q^2}{\left(1 - \frac{DA}{DP}\right)^3} \quad (4)$$

donde:

X_1, X_2, X_3 : constantes definidas en el Cuadro 1.

D: profundidad del producto en el contenedor, m.

DA: densidad aparente, kg/m².

DP: densidad de partícula del grano de maíz, kg/m³.

P: caída de presión debido al flujo de aire a través del producto, Pa.

Q: caudal de aire, m³/s.m².

Cuadro 1. Valores de X_1 , X_2 y X_3 para la ecuación (4).

Ámbito de caudal ($m^3/s/m^2$)	X_1	X_2	X_3
0,027 <Q< 0,13	-0,998	88,8	511
0,13 <Q< 0,27	-10,9	111	439
0,27 <Q< 0,60	-76,5	163	389

Fuente: (ASAE, 1982).

Es importante mencionar que diferentes tipos de llenado: compactación, suelto y vibración, entre otros, causan diversos patrones de distribución en los granos, lo que produce diferencias en la densidad aparente y por tanto, en la RFA. Todo esto fue documentado y estudiado por Sokkansanj, Falacinski, Sosulski, Jayas, D. S. y Tang, (1990), en lentejas (*Lens culinaris*), donde la variación en el tipo de llenado resultó en un aumento de la densidad aparente de 814 kg/m^3 a 887 kg/m^3 y disminuyó la porosidad cerca de un 5 %, aumentando la RFA.

En el aspecto de porosidad, factor físico vinculante con la densidad aparente, (Matthies & Petersen, 1974), encontraron también la relación según el tipo de llenado y la caída de presión relativa, en un pequeño contenedor de laboratorio, donde probaron varios métodos de llenado con el fin de obtener un ámbito total de desplazamiento de volumen del espacio poroso. Los resultados mostraron que la RFA fue más alta en el sistema de vibración, cuando se aplicaron 60 s de vibración, lo que permitió obtener la máxima densidad aparente; por otro lado, la más baja fue con el sistema fluido, el cual logra un mayor espacio poroso. Ashwini y Muir (1986) estudiaron tanto la cebada (*Hordeum vulgare*) como el trigo (*Triticum spp*) en cuanto al efecto de la densidad aparente, como se observa en el Cuadro 2, además de otros factores.

2.3 Tamaño y forma

El estudio de los factores del tamaño y la forma que tenga el grano y la semilla en la RFA, hace necesario considerar el manejo de las corrientes

de aire aplicadas a los granos o semillas, de manera que permita añadir un mayor contacto entre el aire y el producto, con el objeto de lograr mayor eficiencia en el intercambio de calor, ya sea con fines de aireación o secado.

Estos factores, entre otros, fueron estudiados por Calderwood (1973) para el arroz (*Oryza sativa*). En cuanto al factor del tamaño el arroz, considerado como grano grande, tiene una longitud promedio de 9 mm y una razón de longitud y ancho mayor a 3; en los granos definidos como pequeños, la longitud varía cercanamente a los 7 mm de longitud y la razón de la longitud y el ancho es menor que 2; por último, los granos medianos varían dentro estos límites. La visión del trabajo de Calderwood (1973) fue determinar las condiciones de RFA en los diferentes procesos del arroz, o sea, para diferentes condiciones del grano, a saber: granza, moreno y pilado. De aquí se desprende la importancia de considerar aspectos como tamaño y forma combinados con aspectos de rugosidad en la superficie del grano. En resumen Calderwood (1973) estableció que la resistencia al flujo de aire (RFA) en granos de arroz de tamaño mediano (granza, moreno y pilado) siempre fue mayor que la observada para granos largos, en un mismo estado de proceso, con el mismo contenido de humedad y el mismo método de llenado.

Diferentes variedades de lentejas (*Lens culinaris*) fueron evaluadas por Sokkansanj et al., (1990) encontrando diversas curvas de resistencia al flujo de aire. Un caso específico de análisis por tamaño se compararon dos cultivos: Laird y Easton, con un contenido de humedad del 12,8 % y del 12,1 %, respectivamente, ambas

en expresadas en base húmeda. La resistencia al flujo de aire, para semillas pequeñas del cultivo Easton, fue más alta que la obtenida con semillas consideradas largas del cultivo de la variedad Laird, entre el 3 % y el 27 % a flujos de aire bajos e intermedios (de 0,0028 m³/s/m² y 0,0272 m³/s/m²), mientras que a flujos de aire altos, (de 0,0272 m³/s/m² a 0,5926 m³/s/m²) la caída de presión fue del 1 % al 6 % menor. Es importante que el lector observe que las curvas no son paralelas. Estos fenómenos fueron también sujetos de análisis para la almendra de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) por

Aguilar (1993), donde la forma redonda tiene una significativa menor resistencia al flujo de aire, que granos de forma irregular como ovalada o quebrada (todas las muestras fueron evaluadas sin impurezas).

Es evidente entonces cómo estos factores inciden en la RFA; sin embargo, es importante mencionar que la dirección de flujo, ya sea vertical u horizontal, y la orientación del grano o bien su ángulo de reposo, son elementos que pueden recaer en un mejor criterio de diseño al momento de concebir un sistema de aireación o secado.

Cuadro 2. Resultados del estudio de RFA debido a la dirección del flujo y contenido de impurezas en cebada (*Hordeum vulgare*) y trigo (*Triticum* spp).

Grano	Método de llenado	Dirección de flujo	Densidad aparente (kg/m ³)	Coeficientes de la ecuación (2)		Resistencia al comparar* (Pa/m)
				a	b	
Trigo sin limpiar	Capas	Vertical	820	8,98	1,15	471
	Fija	Vertical	798	8,22	1,21	369
	Capas	Horizontal	-	6,78	1,15	355
	Fija	Horizontal	809	4,78	1,19	226
Trigo limpio	Capas	Vertical	854	6,69	1,11	389
	Fija	Vertical	827	6,51	1,17	324
	Capas	Horizontal	860	5,85	1,13	323
	Fija	Horizontal	831	4,60	1,21	207
Cebada limpia	ASAE +	Vertical	-	8,68	1,30	310
	Capas	Vertical	680	7,54	1,23	322
	Fija	Vertical	654	6,85	1,31	238
	Capas	Horizontal	683	4,43	1,21	199
	Fija	Horizontal	642	2,60	1,23	111
	ASAE +	Vertical	-	6,48	1,42	170

* La resistencia de comparación fue calculada a un flujo de 0,077 m/s usando la ecuación 2.
+ Coeficientes para la ecuación 2.

Fuente: (Ashwini & Muir, 1986).

Ashwini y Muir (1986) estudiaron el efecto diferencial y significativo de la RFA debido a la dirección de flujo, además, fueron evaluados elementos como tipo de llenado y grado de limpieza en la cebada (*Hordeum vulgare*) y el trigo (*Triticum* spp). Los resultados de la pruebas se encuentran en el Cuadro 2 donde se determinaron los coeficientes de la ecuación (2).

2.4 Grado de limpieza

En los procesos de almacenamiento y secado siempre va a existir un grado de impurezas que debe ser considerado, pues éstas inciden en la RFA con un incremento significativo sobre ella, por lo que debe ser tomado en cuenta tanto en el momento del diseño como para efectos de control. Aguilar (1993) evaluó el manejo de tres plantas de la almendra de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) y encontró que estas producen diferentes grados de impurezas, además del grado de quebrado de la almendra, que conllevan varias consideraciones de diseño y operación, pues la presencia de granos partidos y de material fino aumenta la resistencia al flujo de aire.

Sokhansanj et al. (1990) realizaron estudios al respecto y encontraron que la resistencia al flujo de aire en semillas de lenteja (*Lens culinaris*) aumenta, al incrementar la fracción de partículas finas de la muestra. El incremento en la caída de presión fue más grande a razones de flujo bajos (de 0,0028 a 0,1537 m³/s/m²). Para el ámbito de caudales empleados, se utilizaron fracciones de partículas finas del (5, 10, 15, 20 y 25)% en lentejas Laird, causando aumentos del (14, 41, 77, 137 y 149)% en la resistencia al flujo de aire, respectivamente.

El efecto del grado de la limpieza también fue estudiado por Ashwini y Muir (1986) para el trigo (*Triticum* spp), donde su limpieza resultó en una reducción en la resistencia al flujo de aire, tal y como se muestra en el Cuadro 2; en el trigo sin limpiar, la basura representaba el 1,1 %, y estaba conformada por un 40 % de partículas más grandes y por un 60 % más pequeñas que el

propio grano. El trigo (*Triticum* spp) y la cebada (*Hordeum vulgare*) limpios, contenían cada uno cerca del 0,1 % de basura.

La Asociación Americana de Ingenieros Agrícolas (siglas en inglés ASAE), se refiere a que la presencia de partículas finas en maíz desgranado provoca un aumento en la resistencia al flujo de aire, y que la caída de presión por unidad de profundidad puede ser corregida usando la siguiente ecuación (ASAE, 1982):

$$\frac{P}{D_{CORREGIDO}} = \frac{P}{D_{LIMPIO}} (1 + (14,5566 - 26,418 \cdot Q) \cdot (fm)) \quad (5)$$

donde:

D : profundidad del producto en el contenedor, m.

P : caída de presión debido al flujo de aire a través del producto, Pa.

Q : caudal específico de aire, m³/s/m².

fm : fracción decimal de partículas finas por masa.

2.5 Contenido de humedad

El contenido de humedad puede afectar las características físicas del grano, por ejemplo, expandirse o contraerse al adquirir o perder humedad, y por tanto incide en la densidad aparente y el espacio intersticial de los granos. Por ende, debido a que la RFA está en función de las características físicas del grano, el factor del contenido humedad, en cuanto más varíe más afecta al grano en sus características físicas y por ende, también afectará a la RFA.

Akritidis y Siatras (1979) evaluaron el efecto del contenido de humedad en la RFA en la semilla de calabaza (*Cucurbita maxima*). El contenido de humedad de ella durante la cosecha es considerablemente más alto que el requerido para

su procesamiento o para su almacenamiento seguro; en este sentido, la evaluación se efectuó para cinco niveles de contenido de humedad y las curvas se muestran en la Figura 3, donde se observa que ellas son sustancialmente paralelas y convexas.

La Figura 3 evidencia el comportamiento físico obtenido al contraerse y expandirse la semilla, utilizando diferentes contenidos de humedad. Para este fin, (Akritidis & Siatras, 1979), establecieron caudales de aire de (5, 10, 15, 20 y 25) $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ en su estudio y lo relacionaron con la caída de presión y el contenido de humedad, los resultados se muestran en la Figura 4. Las curvas son polinomios de tercer grado, debido a que describen con mayor aproximación el comportamiento de los datos experimentales. A pequeños flujos de aire, los cambios en el contenido de humedad de las semillas de calabaza no influyeron significativamente en la caída de presión estática. A flujos de aire mayores de 10 $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$, el contenido de humedad sí afectó la caída de presión estática. La caída de presión disminuyó conforme aumentó el contenido de humedad, hasta alcanzar un valor promedio crítico mínimo para un contenido de humedad del 26% en base húmeda. A partir de esta

humedad, la caída de presión se incrementó con el crecimiento del contenido de humedad. En la gráfica se observan dos pendientes diferentes en los extremos del mínimo, el extremo izquierdo presenta una pendiente (cambio de la caída de presión respecto al contenido de humedad) más suave que la del extremo derecho. La posible explicación de esto, es el efecto que puede tener el contenido de humedad en la densidad aparente de las semillas, así como también, sobre la rugosidad de su superficie.

En la Figura 4 se muestra que a un contenido de humedad por encima del 26% en base húmeda, la resistencia aumenta rápidamente, así como también la densidad aparente; mientras que por debajo del 20% en base húmeda, la resistencia se elevó menos rápido que el aumento en la densidad aparente. La causa que se supone explica este fenómeno, es el efecto que se da entre la rugosidad de la superficie y el contenido de humedad. A un alto contenido de humedad, los granos son más rugosos y tienden a pegarse, causando una alta fricción y perdiendo fuerza la corriente de aire. A bajos contenidos de humedad, los granos son más compactos o duros y más lisos, causando una disminución en la RFA por fricción.

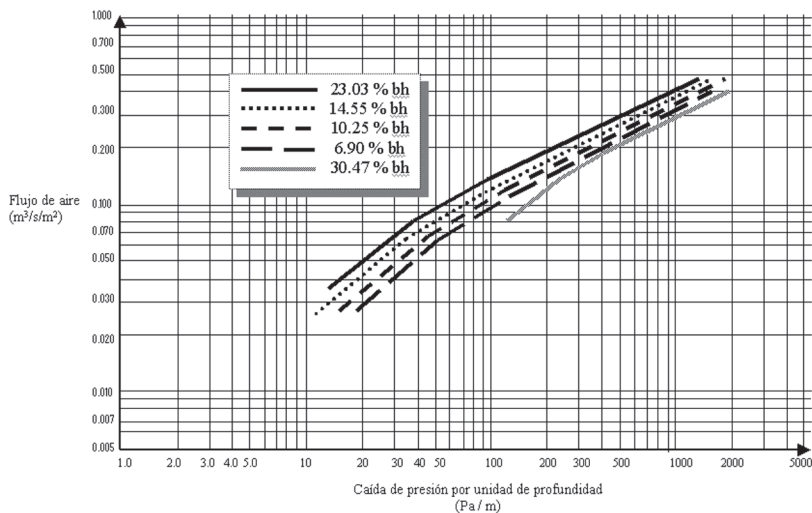


Figura 3. Efecto del contenido de humedad en la resistencia al flujo de aire (RFA) en la semilla de calabaza (*Cucurbita maxima*).

Fuente: (Akritidis & Siatras, 1979).

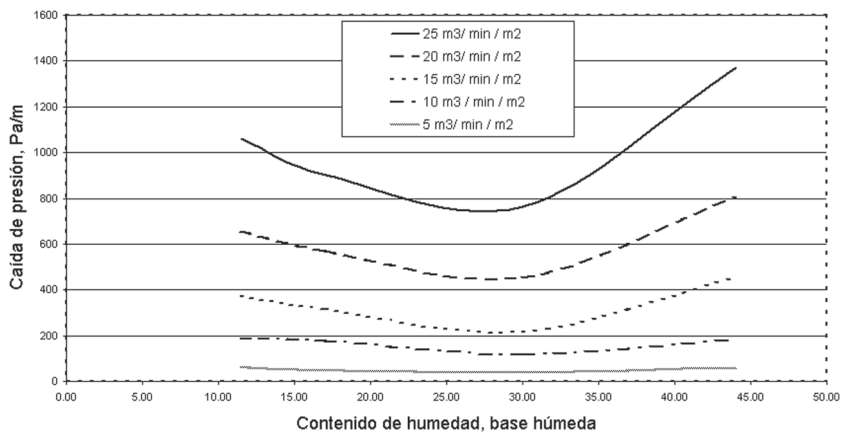


Figura 4. Efecto del contenido de humedad en la caída de presión para cinco niveles de caudal aparente (5, 10, 15, 20 y 25) m³/min/m² en la calabaza (*Cucurbita maxima*).

Fuente: (Akritidis & Siatras, 1979).

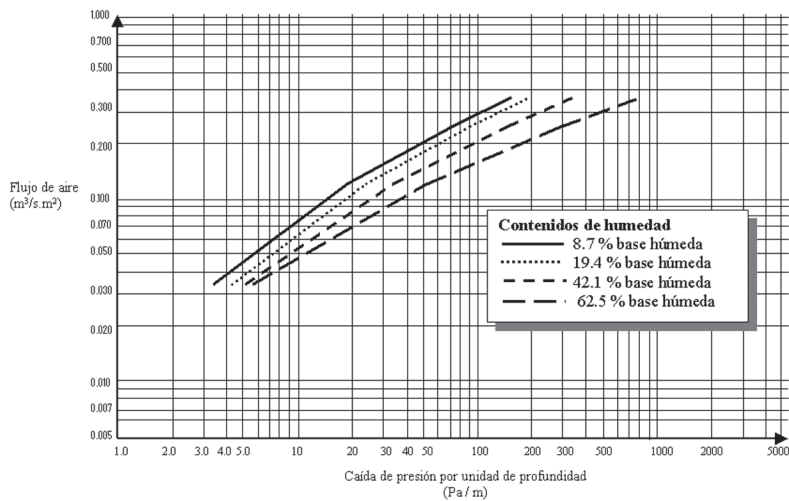


Figura 5. Efecto del contenido de humedad en la resistencia al flujo de aire en maní (*Arachis hypogaea*).

Fuente: (Steele, 1974).

El comportamiento experimental de la densidad aparente debido al contenido de humedad se establece como una curva de segundo grado. La densidad aparente alcanzó el mínimo valor a una humedad cercana al 19% en base húmeda, pero el ámbito de densidades más bajas se da entre los 17% y 23%, ambos en base húmeda. Este ámbito está dentro del espacio poroso más alto y las resistencias al flujo de aire más pequeñas como se muestra en la Figura 4 (Akritidis & Siatras, 1979).

Otras investigaciones, relacionadas con la resistencia al flujo de aire según el contenido de humedad, se realizaron con maní (*Arachis hypogaea*) y con arroz en granza (*Oryza sativa*). Para el caso de maní (Steele, 1974) los resultados se presentan en la Figura 5, los cuales tienen un comportamiento de menor RFA a menor contenido de humedad; para el arroz en granza, mencionado en la sección 2.3, el estudio fue desarrollado por Calderwood (1973) quien encontró una relación de comportamiento semejante a la del maní.

CONCLUSIONES

1. Este documento desarrolla importantes factores que se deben considerar y analizar cuando se realizan estudios de la resistencia al flujo de aire. Así por ejemplo, para determinar la cantidad de aire que se debe utilizar en procesos de secado o aireación, es necesario establecer la cantidad de energía mecánica que el ventilador tiene que transferir al aire para vencer la resistencia que ofrecen los granos.
2. Un buen análisis de requerimientos y de diseño, o bien, el estudio de un sistema ya instaurado, es un factor crítico de éxito cuando se realizan estudios relacionados con la resistencia al flujo de aire (RFA), ya que este es un fenómeno netamente físico, y su valor depende de la variabilidad de condiciones de manejo y de los factores físicos que afecten al producto o material que se esté analizando.
3. Muchos de estos factores están interrelacionados, y puede existir una afectación de unos a otros, modificando a su vez la resistencia al flujo de aire. Este aspecto cobra relevancia debido a que la información con la que se cuenta son las curvas de RFA de los estándares de ASAE, las cuales están desarrolladas para productos de zona templada y bajo condiciones específicas.
4. Por lo anterior, sobre todo para productos tropicales, es que el diseñador o el operador de planta deben conocer en detalle las características físicas del material y su manipulación en los pasos de transformación, o bien, de preservación. En este sentido, para reducir la incertidumbre en la definición de la RFA, es vital considerar las posibles variables físicas que se pueden presentar en los procesos y determinar sus respectivas resistencias al flujo de aire, y por ende, establecer el ámbito de requerimientos de presión para solventar las necesidades en el proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, K. & Prem, Ch. (1974). Pressure drop across fixed beds of rough rice. *Transactions of the ASAE*, T3, 560-563.
- Aguilar, J. F. (1993). *Resistencia al flujo de aire en la almendra de la palma aceitera*. Proyecto de graduación para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agrícola, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Akritidis, C. B. & Siatras, A. J. (1979). Resistance of pumpkin seeds to air flow. *Transactions of the ASAE*, T6, 1414-1416.
- ASAE. American Society of Agricultural Engineers. (1982). *Agricultural Engineers Yearbook*. St. Joseph, Michigan, USA.
- Ashwini, K. & Muir, W. E. (1986). Airflow resistance of wheat and barley affected by airflow direction, filling method and dockage. *Transactions of the ASAE*, 29(5), 1423-1426.
- Calderwood, D. L. (1973). Resistance to airflow of rough, brown and milled rice. *Transactions of the ASAE*, T3, 525-527.
- Matthies, H. J. & Petersen, H. (1974). New data for calculating the resistance to air flow resistance of stored granular materials. *Transactions of the ASAE.*, T6, 1144-1149.
- Sokkansanj, S., Falacinski, A. A., Sosulski, F. W., Jayas, D. S. & Tang, J. (1990). Resistance of bulk lentils to airflow. *Transactions of the ASAE*, 33(4), 1281-1285.
- Steele, J. L. (1974). Resistance of peanut to airflow. *Transactions of the ASAE*, 33(4), 573-577.
- Streeter, V. & Wyle, B. (1990). *Mecánica de los fluidos* (8ª ed.). México, D. F: Editorial McGraw Hill.

Yang, X. & Willians, D.L. (1990). Airflow resistance of grain sorghum as affected by bulk density. *Transactions of the ASAE, T6*, 1966-1970.

SOBRE EL AUTOR

José Francisco Aguilar

Licenciado en Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica y *Magister*

Scientiae en Computación, opción Sistemas de Información del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Profesor de la Escuela de Ingeniería Agrícola e Investigador del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica.

Teléfono: 207-4054

Facsímil: 207-4614

Apartado postal: 36-2060 San José, Costa Rica.

Correo electrónico: jaguilar@ingagri.ucr.ac.cr