

velocidades mínimas de fluidización para semillas*

P.I. Alvarez G. y A.E. Reyes S.**

RESUMEN: En un trabajo anterior¹ se observó que las velocidades mínimas de fluidización calculadas con la correlación de Wen y Yu² están por debajo de los valores experimentales, aumentando esta desviación con el tamaño de las partículas; los autores concluyeron que esta desviación podría deberse a una caracterización inadecuada del tamaño de las partículas.

En este trabajo se determinó la velocidad mínima de fluidización de partículas de origen agrícola. Se comparó estos resultados con los obtenidos por Wen y Yu, empleando como diámetros representativos de partículas: diámetro medio geométrico de las aberturas de los tamices, diámetro basado en las dimensiones reales de las partículas y finalmente un diámetro equivalente basado en el volumen de las partículas.

Los resultados mostraron que la desviación entre los valores experimentales y aquellos obtenidos con la ecuación de Wen y Yu son menores cuando se utiliza el diámetro equivalente basado en el volumen de las partículas.

SUMMARY: In a previous work¹ it was observed that the minimum fluidization velocities calculated with the correlation of Wen and Yu² are lower than the experimental values with increasing deviation with particle size. The authors conclude that this deviation may be due to an inadequate characterization of particle size.

In this work the minimum fluidization velocity was determined using seeds. The results were compared to those of Wen and Yu, obtained by using as representative particle diameter: the geometrical mean diameter of screen aperture, the diameter based on the real particle dimension and finally using an equivalent diameter based on particle volume.

The results showed that the deviation among the experimental values and those obtained by Wen and Yu are lower when using the equivalent diameter based on particle volume.

* Manuscrito revisado y aprobado en forma definitiva en Noviembre de 1981.

** Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile (ex-Universidad Técnica del Estado).

INTRODUCCION

La fluidización es una técnica que consiste en el paso de un fluido (gas o líquido) a través de un lecho constituido por partículas sólidas. La velocidad del fluido debe ser tal que los sólidos “floten” en él, chocando unos con otros, originando altas velocidades de transferencia de calor y masa. Debido principalmente a esto último es que la fluidización se ha constituido en una técnica de gran potencialidad, lo que ha originado una voluminosa literatura, tanto teórica como empírica. La aplicación de esta técnica se encuentra en numerosos procesos físicos, metalúrgicos y químicos (combustión y gasificación de carbones, secado de materiales, etc.).

En el diseño y operación de equipos de fluidización juega un rol importante el conocimiento de la “velocidad mínima de fluidización” (velocidad de flujo a la cual el lecho de partículas cambia bruscamente de un estado de lecho fijo a lecho fluidizado). Para evaluar este parámetro, en la literatura se proponen numerosas correlaciones, las que han sido obtenidas en su mayoría para partículas uniformes, de pequeño tamaño y forma aproximadamente esférica.

En un trabajo anterior¹, en el cual se determinó la velocidad mínima de fluidización para partículas irregulares, se observó que los valores obtenidos con la correlación de Wen y Yu² están bajo los valores obtenidos experimentalmente, aumentando esta diferencia con el tamaño de las partículas; los autores concluyeron que esta desviación podría deberse a una caracterización inadecuada del tamaño de las partículas.

En este trabajo se determinaron velocidades mínimas de fluidización en sistemas gas-sólido, en que los sólidos son granos irregulares (cereales principalmente) de tamaño relativamente grande y con una distribución de tamaños dada por la abertura de los tamices correspondiente al corte usado. Se comparan los valores experimentales con los obtenidos con la correlación de Wen y Yu, utilizando diversos diámetros característicos.

Se analiza, además, la probable influencia de la altura del lecho en la velocidad mínima de fluidización.

Velocidad mínima de fluidización (Vmf)

La determinación experimental de la velocidad mínima de fluidización se realizó utilizando un método adoptado por la mayoría de los investigadores, descrito detalladamente en un trabajo anterior¹ el cual consiste en trazar rectas en las zonas de lecho fijo y lecho completamente fluidizado en un gráfico Δp vs. V , dando a la intersección de estas dos rectas el valor de Vmf.

De todas las correlaciones para predecir Vmf, Gupta y Rao³ concluyeron que la correlación de Wen y Yu² es la más general, simple y precisa. Esta es:

$$\text{Remf} = \sqrt{(33,7)^2 + 0,0408 \cdot \text{Ga}} - 33,7$$

con Remf entre 0.001 y 4000.

Caracterización de partículas

En las correlaciones propuestas para el cálculo de Vmf, el diámetro representativo de las partículas es un parámetro importante, el cual no siempre es fácil de establecer.

Para partículas de pequeño tamaño de origen mineral, el diámetro geométrico (D_{p1}) basado en el promedio geométrico de las aberturas superior e inferior de los tamices, constituye un valor representativo de la muestra. Sin embargo, para las partículas irregulares de gran tamaño y, con geometría bastante alejada a la de una esfera, como es el caso de los cereales, el diámetro geométrico no es representativo.

Klassen y Gishler⁴ encontraron que un diámetro que considere las dimensiones reales de las partículas (largo, ancho o espesor) es más adecuado que el diámetro geométrico. Para

arroz y trigo recomiendan utilizar un diámetro que considere las dos dimensiones más pequeñas, es decir:

$$D_{p2} = \sqrt{\text{ancho} \times \text{espesor}}$$

Foust⁵ cita otra forma para determinar el diámetro de las partículas, el que consiste en utilizar la media aritmética de dos aberturas de tamices, sin embargo este diámetro es recomendable sólo para partículas regulares, de forma aproximadamente esférica.

Otros autores proponen utilizar un diámetro basado en el volumen de una esfera equivalente dado por:

$$D_{eq} = \left(\frac{6 \cdot V_p}{\pi}\right)^{1/3}$$

En este caso, el volumen de las partículas (V_p) se obtiene experimentalmente.

TRABAJO EXPERIMENTAL

Equipo y materiales

El equipo experimental consiste en una columna de vidrio de 9,4 cm de diámetro interno y 90 cm de longitud, provista de una malla fina como soporte de sólidos y un lecho de relleno de anillos Raschig para homogeneizar el gas a la entrada. Para medir la caída de presión se instaló una toma piezométrica bajo la malla. El flujo de gas (aire) fue medido con un medidor de orificio.

En todas las experiencias se usó como fluido aire a temperaturas entre 18 y 31°C. Los materiales sólidos usados, junto a sus propiedades, se detallan en tabla 1.

TABLA 1
Propiedades de las partículas

Partícula	Rango de D_p (mm)	Densidad ($\frac{gr}{cm^3}$)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
1 Cebada	4.00 - 3.36	1.033	9.210	3.840	3.040
2	3.36 - 2.83	1.1549	8.210	3.220	2.240
3	2.83 - 2.38	1.0532	8.660	2.840	1.920
4	2.38 - 2.00	0.9719	8.540	2.800	1.550
5 S. Cñamo	4.00 - 3.36	0.6894	5.140	4.150	3.380
6	3.36 - 2.83	0.8063	4.700	3.050	2.820
7	2.83 - 2.38	0.5418	3.830	3.050	2.380
8 S. Raps	2.38 - 2.00	1.1390	2.290	2.250	2.275
9	2.00 - 1.68	1.0482	1.960	1.925	1.925
10 S. Linaza	2.38 - 2.00	1.1046	5.375	2.820	1.250
11	2.00 - 1.68	1.1522	4.750	2.360	1.120
12 C. Malteada	4.00 - 3.36	0.9283	9.137	3.925	3.450
13	3.36 - 2.83	1.0150	8.387	3.375	2.775
14 Arroz (alargado)	2.38 - 2.00	1.5721	6.450	3.200	1.800
15	2.00 - 1.68	1.5821	5.960	1.975	1.725
16 Arroz (redondeado)	2.38 - 2.00	1.4336	5.325	2.525	2.100

Procedimiento

El procedimiento experimental, constó de cuatro partes:

- Clasificación de las partículas.** La selección y clasificación de partículas se realizó en una serie de tamices Saulas, en un rango de 1.0 a 4.76 (mm) de abertura. En cada caso el tiempo de tamizado fue de 15 a 20 minutos.
- Determinación de la densidad de las partículas.** Para la determinación experimental de la densidad de las partículas se utilizó un picnómetro, usando como fluido glicerina.
- Dimensiones de las partículas.** Para determinar las dimensiones de las partículas se utilizó un microscopio polarizado, para este efecto se seleccionaron partículas (5 ó 6) representativas de cada fracción de rango, midiéndole a cada una sus dimensiones.

- d) **Velocidad mínima de fluidización (V_{mf}).** Para determinar V_{mf} , el procedimiento consistió en cargar la columna con una determinada fracción de sólidos, luego se somete a fluidización intensa, sin arrastre, para conseguir una buena mezcla. Posteriormente se comenzó a pasar aire lentamente, aumentando en forma gradual, hasta obtener un lecho completamente fluidizado. Para cada caso, se anotó la caída de presión (Δp) y la velocidad del aire (V). El procedimiento descrito se repitió para dos alturas de lecho en cada caso (figuras 1, 2, 3 y 4).

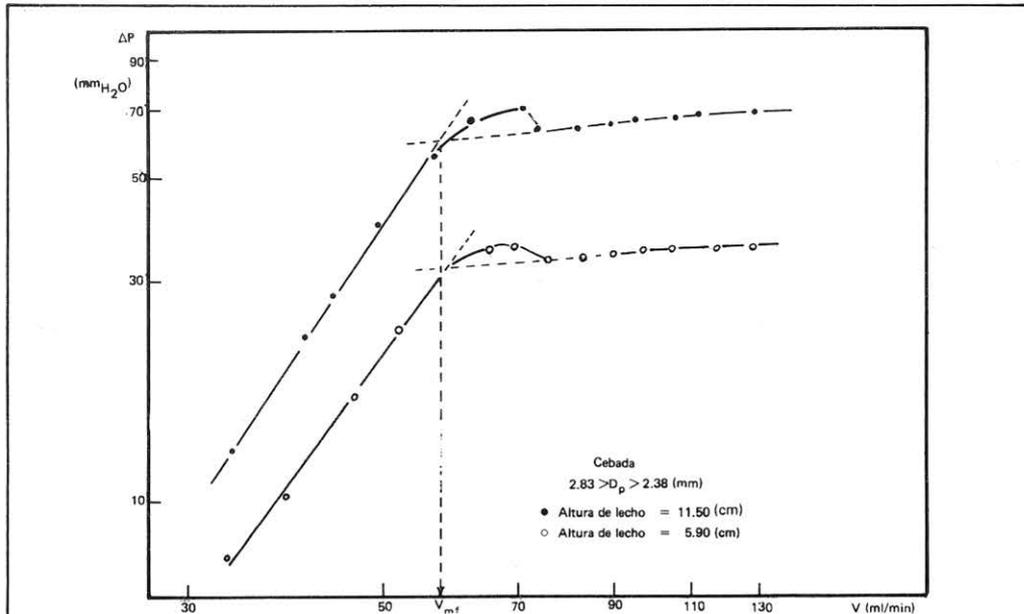


Figura 1. Caída de presión (ΔP) en función de la velocidad del aire (V).

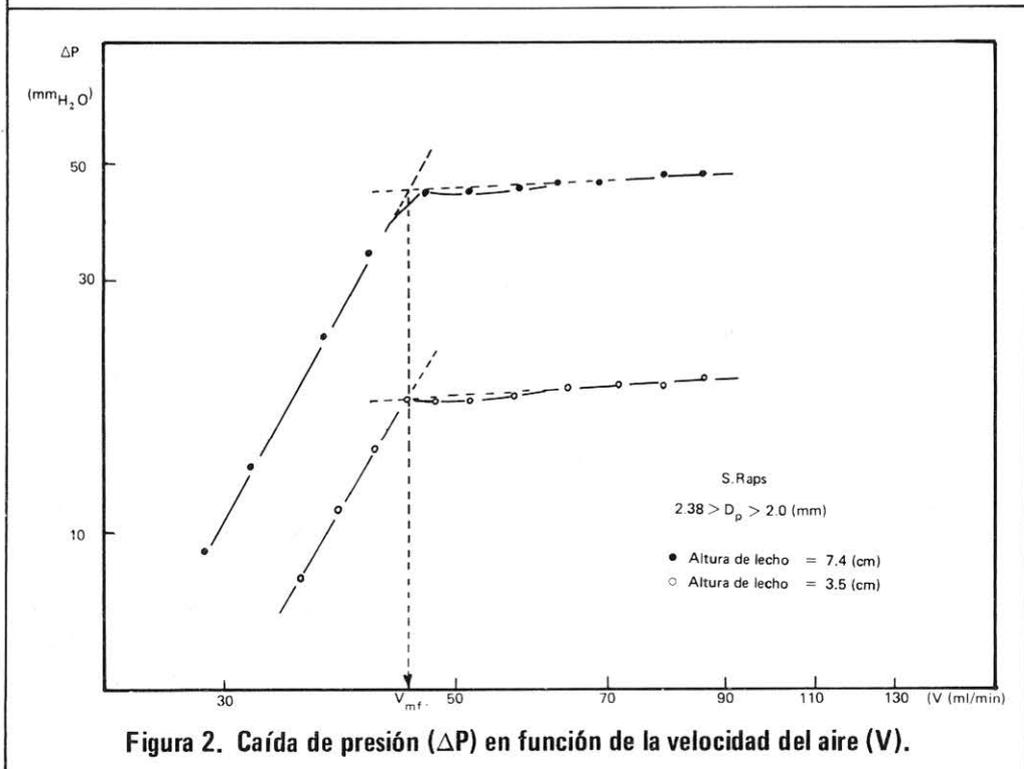


Figura 2. Caída de presión (ΔP) en función de la velocidad del aire (V).

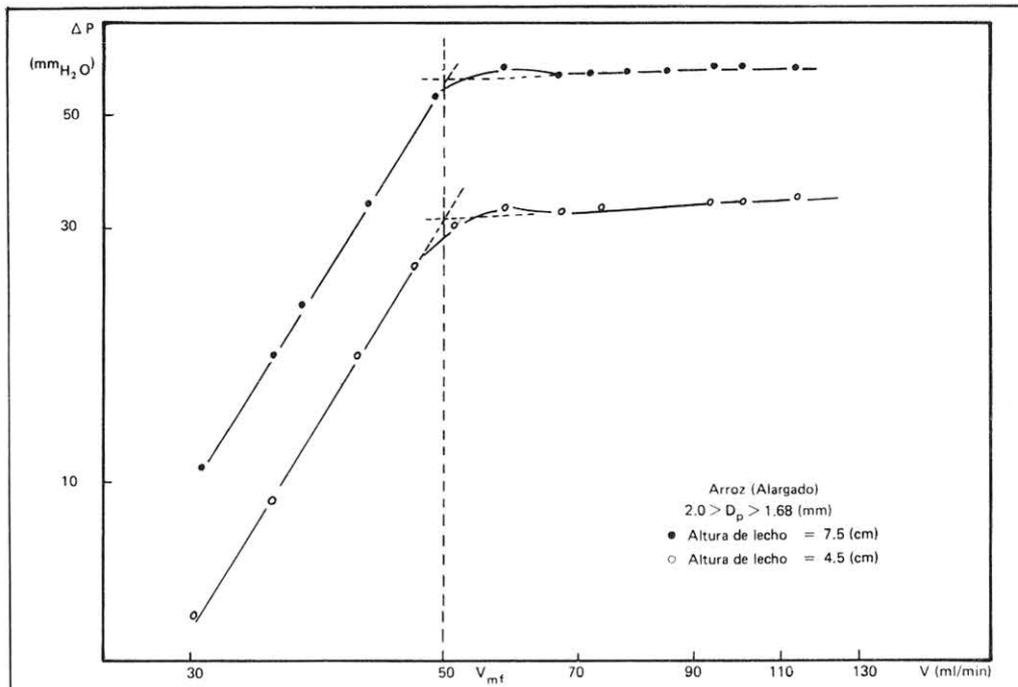


Figura 3. Caída de presión (ΔP) en función de la velocidad del aire (V).

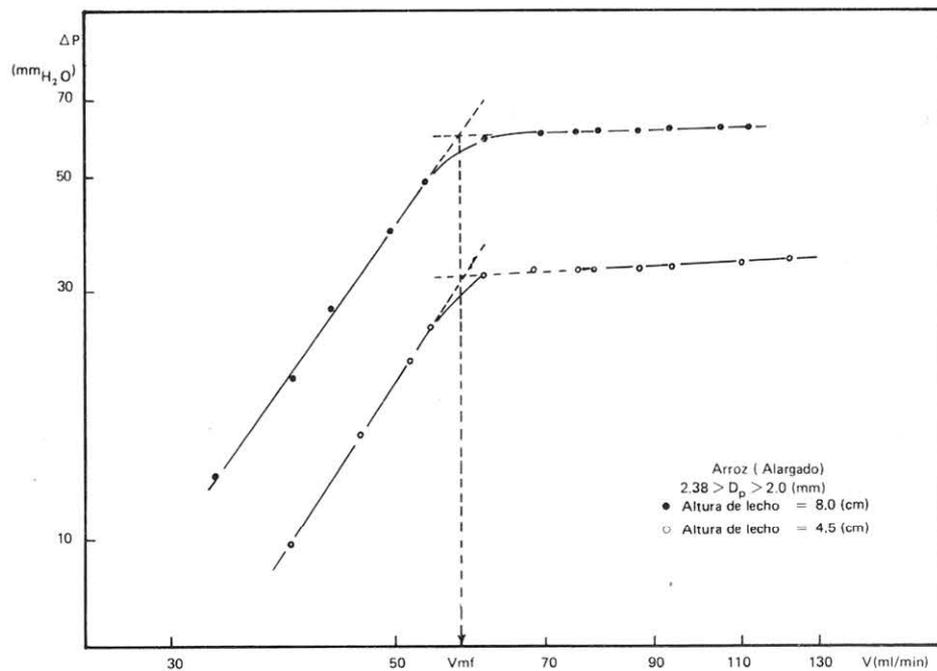


Figura 4. Caída de presión (ΔP) en función de la velocidad del aire (V).

Observaciones y Resultados

La determinación experimental de la velocidad mínima de fluidización se realizó utilizando gráficos de Δp vs V . La forma de las curvas así obtenidas depende del tipo de partículas. No se observó ninguna influencia de la altura del lecho en el valor de la velocidad mínima de fluidización, y las pequeñas diferencias en V_{mf} son atribuibles a errores de tipo experimental.

En tabla 2, se muestran los diferentes diámetros característicos para cada corte de partículas. D_{p2} (diámetro basado en las dimensiones de las partículas) se calculó sólo para granos alargados como cebada, malta y arroz, ya que según Klassen y Gishler⁴ sería adecuado sólo para partículas de esta geometría.

TABLA 2
Diámetros característicos de partículas

Exp.	Partícula	D_{p1} (mm)	D_{p2} (mm)	D_{eq} (mm)
1	Cebada	3.666	3.417	4.217
2		3.084	2.686	3.671
3		2.595	2.335	3.430
4		2.182	2.083	3.174
5	S. Cñamo	3.666	—	3.885
6		3.084	—	3.379
7		2.595	—	3.019
8	S. Raps	2.182	—	2.139
9		1.833	—	1.985
10	S. Linaza	2.182	—	2.512
11		1.833	—	2.278
12	C. Malteada	3.666	3.680	4.440
13		3.084	3.060	3.908
14	Arroz (alargado)	2.182	2.400	2.948
15		1.833	1.846	2.745
16	Arroz (redondeado)	2.182	2.303	3.324

En las tablas 3, 4 y 5 se comparan valores de $Remf$, utilizando diferentes diámetros característicos, con valores de $Remf$ obtenidos con la ecuación de Wen y Yu.

TABLA 3
Comparación de Remf exp., con Remf obtenido con ec.
de Wen y Yu, usando D_{p1} .

Exp.	Partícula	V_{mf} (m/min) (experimental)	G mf (Kgr/m ² min)	Ga x 10 ⁻⁵	Remf _{exp}	(Remf) _{Wen y Yu}
1	Cebada	65.1	72.89	17.049	246,06	232,18
2		64.8	71.88	11.000	208,89	180,81
3		60.5	66.55	5.900	156,86	125,07
4		55.3	61.99	3.500	123,87	90,46
5	S. Cafiama	49.3	56.64	12.000	193,88	190,12
6		51.4	57.10	7.607	160,38	145,6
7		45.4	51.77	3.930	124,39	97,33
8	S. Raps	45.1	49.65	3.808	98,67	95,42
9		36.5	40.54	2.205	68,76	66,96
10	S. Linaza	37.9	42.08	3.726	83,62	94,12
11		37.9	42.48	2.351	71,32	69,87
12	C. Malteada	69.3	76.22	14.56	253,10	212,35
13		63.6	70.58	9.667	198,24	167,74
14	Arroz (alargado)	58.4	64.85	5.305	128,87	117,23
15		52.7	58.46	3.165	97,55	84,83
16	Arroz (redondeado)	54.6	61.19	4.934	122,27	112,13

$$\text{Remf}_{\text{exp}} = \frac{\rho \cdot V_{mf \text{ exp}} \cdot D_{p1}}{\mu} \quad \text{Remf}_{\text{Wen y Yu}} = \sqrt{(33,7)^2 + 0.0408 \cdot \text{Ga}} - 33,7$$

TABLA 4
Comparación de Remf exp. con Remf obtenido con ec. de
Wen y Yu, usando D_{p2} .

Exp.	Partícula	Ga x 10 ⁻⁵	Remf _{exp}	(Remf) _{Wen y Yu}
1	Cebada	13.806	229,5	206,02
2		7.27	175,86	141,79
3		4.29	141,14	102,82
4		2.909	118,25	80,34
12	C. Malteada	14.72	254,07	213,67
13		9.44	196,70	165,43
14	Arroz (alargado)	7.059	141,75	139,32
15		3.23	98,26	85,94
16	Arroz (redondeado)	5.80	129,05	123,78

$$\text{Remf}_{\text{exp}} = \frac{\rho \cdot V_{mf \text{ exp}} \cdot D_{p2}}{\mu} \quad ; \quad \text{Remf}_{\text{Wen y Yu}} = \sqrt{(33,7)^2 + 0.0408 \cdot \text{Ga}} - 33,7$$

TABLA 5
Comparación de Remf exp., con Remf obtenido con ec. de
Wen y Yu, usando D_{eq}

Exp.	Partícula	Ga x 10 ⁻⁵	Remf _{exp}	(Remf) _{Wen y Yu}
1	Cebada	25,95	282,91	293,43
2		18,55	240,32	243,46
3		13,60	207,33	204,26
4		10,29	180,21	174,03
5	S. Cãñamo	14,28	205,46	210,02
6		10,00	175,72	171,08
7		5,13	144,72	114,85
8	S. Raps	3,58	96,72	91,77
9		2,66	73,26	75,79
10	S. Linaza	5,69	96,29	122,35
11		4,51	88,65	106,07
12	C. Malteada	25,86	306,55	292,86
13		19,67	251,23	251,59
14	Arroz (alargado)	13,09	174,15	199,84
15		10,63	146,09	177,26
16	Arroz (redondeado)	17,43	186,26	235,1

$$\text{Remf}_{\text{exp}} = \frac{\rho \cdot V_{\text{mf exp}} \cdot D_{\text{eq}}}{\mu} ; \text{Remf}_{\text{Wen y Yu}} = \sqrt{(33,7)^2 + 0.0408 \text{ Ga}} - 33.7$$

DISCUSION Y CONCLUSIONES

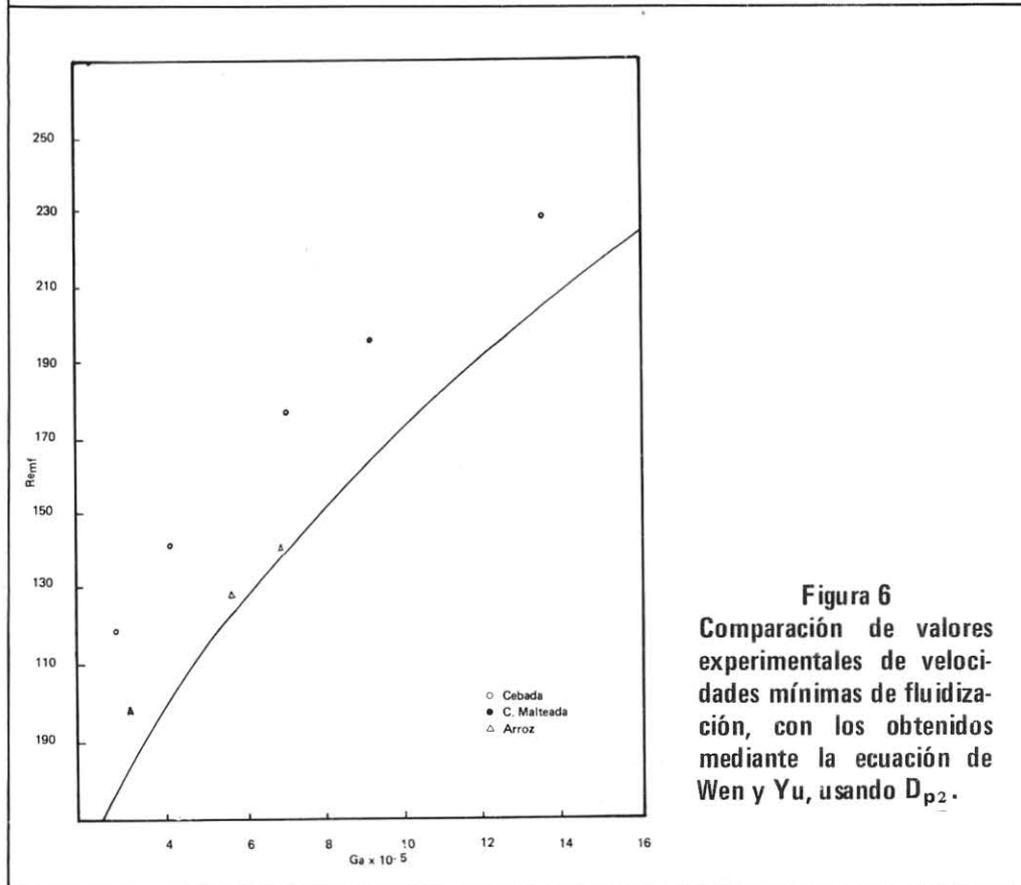
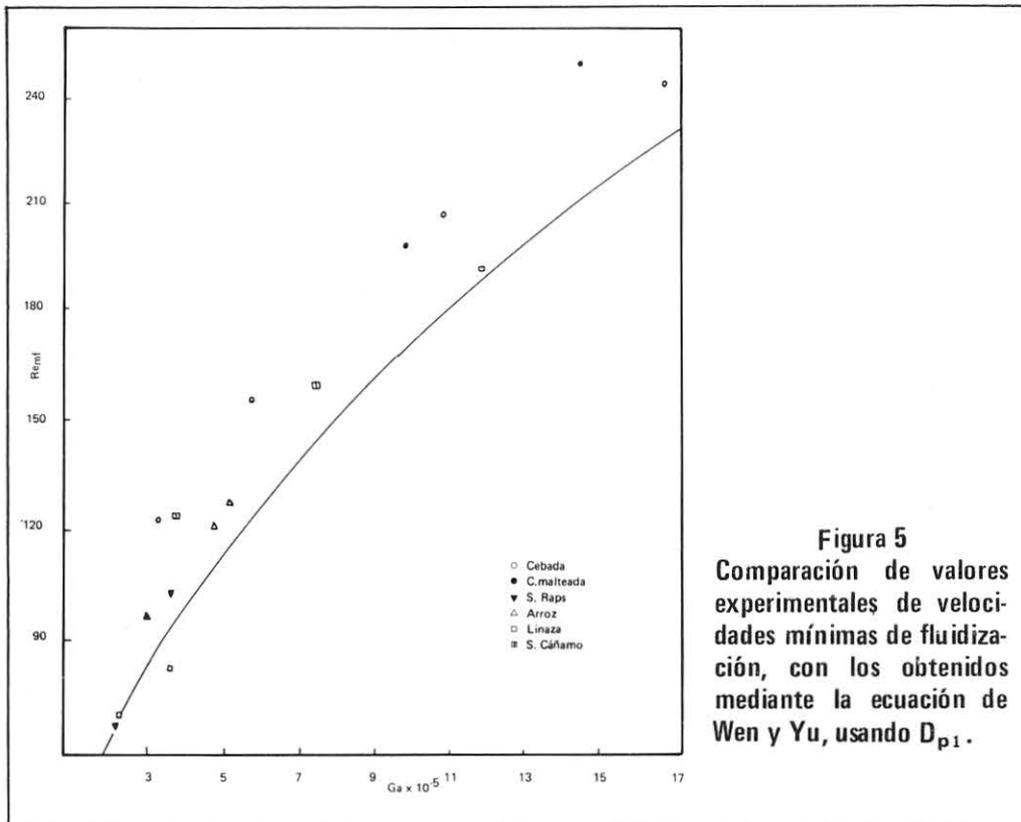
Al analizar las curvas de caída de presión versus la velocidad del fluido (curvas típicas en figuras 1, 2, 3 y 4) se encuentra que éstas se desvían bastante del comportamiento ideal, descrito detalladamente en un trabajo anterior.¹ En las curvas experimentales se observa una gran región de transición entre el lecho fijo y lecho completamente fluidizado; la curvatura que presenta la línea de lecho fijo, antes de alcanzar la V_{mf} , se debe a que se producen flujos preferenciales de fluido en áreas determinadas, dando como resultado una coexistencia de regiones fijas y fluidizadas. La forma de cada una de estas curvas depende de las características de las partículas que se están fluidizando.

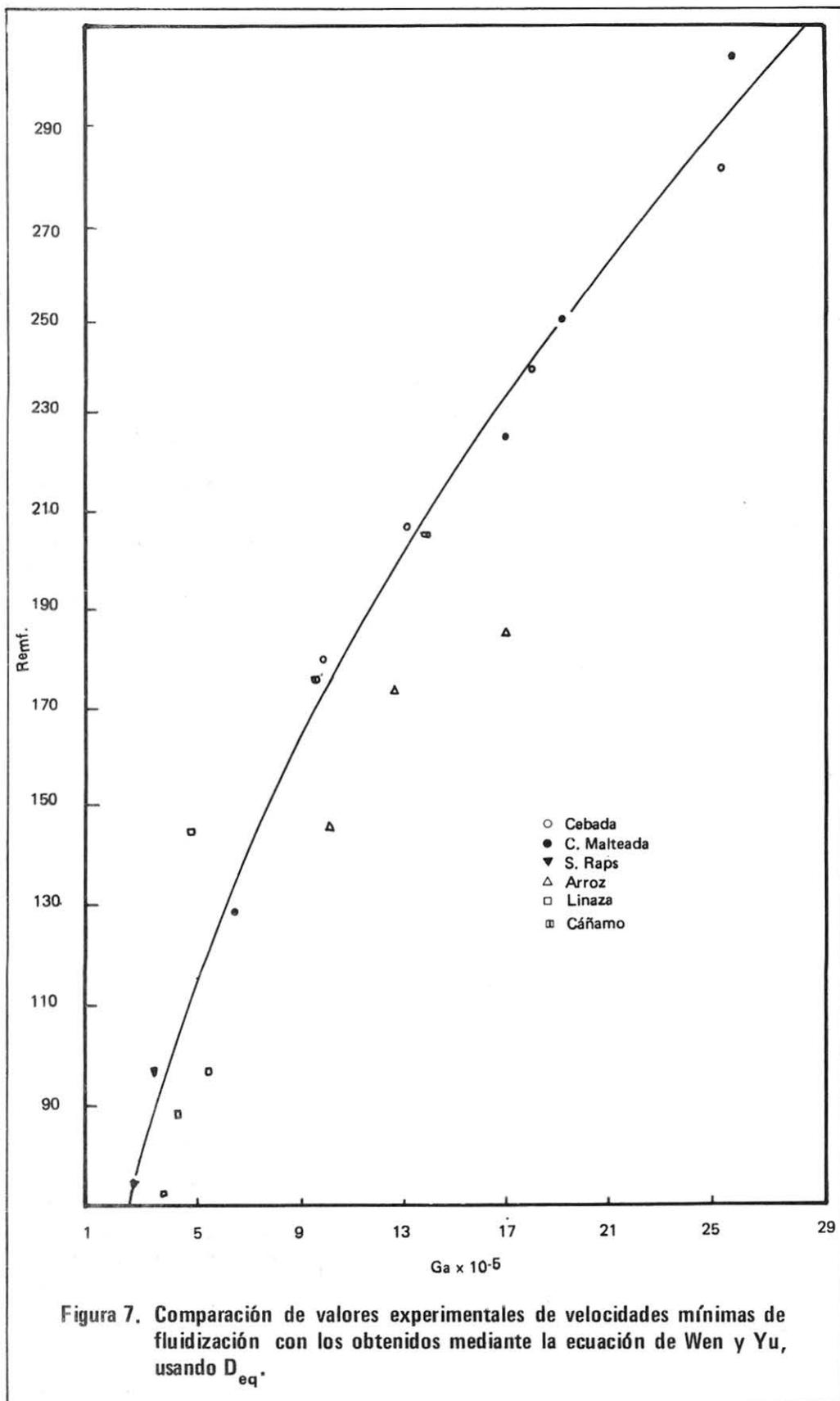
Se comprobó que la velocidad mínima de fluidización es independiente de la altura del lecho. Las pequeñas variaciones en V_{mf} con la altura de lecho, para algunas partículas, son debidas probablemente a errores de naturaleza experimental.

Con respecto a la densidad de los granos, se ha encontrado que ésta varía con el tamaño de las partículas para las fracciones de un mismo producto.

Al utilizar los diferentes diámetros característicos en la correlación de Wen y Yu² para calcular Re_{mf} , se observa que el diámetro basado en la media geométrica de la abertura de tamices, no es apropiada ya que los valores calculados están bajo los experimentales (figura 5). Se observa además que el diámetro basado en las dimensiones de las partículas, el que según Klassen y Gishler⁴ sería apropiado para cebada, cebada malteada y arroz, no es adecuado para ser utilizado en la correlación de Wen y Yu, ya que los valores calculados están bajo los valores experimentales (figura 6).

El diámetro basado en medidas de volumen, D_{eq} , resultó ser el más adecuado, ya que los valores calculados son en cierto modo un promedio de los puntos experimentales (figura 7). Por este motivo es aconsejable este tipo de diámetro, especialmente en partículas de gran tamaño y forma irregular.





NOMENCLATURA

V_{mf}	=	Velocidad mínima de fluidización, $L\Theta^{-1}$
Δp	=	Caída de presión a través del lecho, FL^{-2}
V	=	Velocidad del gas, $L\Theta^{-1}$
$Remf$	=	$\frac{d_p V_{mf} \rho}{\mu}$ = N° de Reynolds en punto de fluidización
D_p	=	Diámetro de esfera del mismo volumen que la partícula, L
ρ	=	Densidad del fluido, ML^{-3}
μ	=	Viscosidad del fluido, $ML^{-1}\Theta^{-1}$
Ga	=	$\frac{g d_p^3 \cdot \rho \cdot (\rho_s - \rho)_g}{\mu^2}$ = N° de Galileo
ρ_s	=	Densidad de la partícula, ML^{-3}
g	=	Aceleración de gravedad
D_{p1}	=	Diámetro de la partícula basado en el promedio geométrico de las aberturas superior e inferior del tamiz, L
D_{p2}	=	Diámetro de la partícula basado en 2 de sus dimensiones menores, L
D_{eq}	=	Diámetro de la partícula basado en medidas de volumen de partícula, L
V_p	=	Volumen de la partícula, L^3

BIBLIOGRAFIA

1. Vega, R. y Álvarez, P.I., Contribuciones, 32, 29 (1978).
2. Wen, C.Y. y Yu, Y. H., Chem. Eng. Prog. Symps., serie 62, 100 (1966).
3. Gupta, S. y Rao, M.N., "The prediction of minimum fluidization velocity", Indian Chem. Eng., vol. 13, 11 (1971).
4. Klassen, J. y Gishler, P.E., Can. J. of Chem. Eng., 35, 12 (1957).
5. Foust, A.S., "Principios de Operaciones Unitarias", Ed. Continental, México, 4a Ed. (1970).