

# TRANSPORTE NEUMÁTICO DE MATERIALES SÓLIDOS A GRANEL

Francisco Cabrejos, María Isabel Jofré y Jorge Rojas

Universidad Técnica Federico Santa María  
Departamento de Ingeniería Mecánica  
Avda. España 1680, Valparaíso, Chile  
<director.mec@usm.cl>

## RESUMEN

El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María formó el Centro de Investigación para el Transporte de Materiales (CITRAM) para estudiar experimentalmente el transporte neumático de materiales sólidos a granel, los diferentes tipos de flujo que se pueden generar dentro de una cañería, y para determinar los parámetros más importantes para el correcto diseño y operación de estos sistemas tales como la velocidad mínima de transporte y la caída de presión en la cañería. El presente trabajo describe las características del sistema implementado, el primero en su tipo en Chile, y entrega resultados obtenidos tales como la velocidad mínima y la caída de presión recomendada para el transporte horizontal de diversos materiales a granel ensayados.

Palabras Claves: Transporte neumático, partículas, materiales sólidos a granel.

## 1. INTRODUCCIÓN

Sistemas de transporte neumático se utilizan ampliamente en la industria para transportar materiales secos, finos y a granel porque son extremadamente versátiles, adecuados y económicos para muchos procesos. El transporte neumático de sólidos se ha practicado por más de un siglo en el mundo y hoy se puede encontrar sistemas de este tipo en las más variadas industrias: la minería, industria del cemento y construcción, química y farmacéutica, plásticos, de alimentos, papel, vidrio, energía, etc. Por ejemplo, el transporte y descarga neumática de cemento, cal, azúcar, pellets plásticos en camiones a granel presurizados; sistemas de transporte e inyección neumática de concentrado de cobre seco a convertidores Teniente, y sistemas similares para carbón pulverizado que alimentan calderas y hornos; sistemas de transporte neumático de fertilizantes, yeso, coque, cenizas, sal, alimentos, granos, aserrín, etc. en plantas de procesos; sistemas de captación y transporte neumático de polvo; etc.

El objetivo principal de un sistema de transporte neumático es transportar materiales sólidos a granel desde un punto a otro por medio de un flujo de gas a presión, ya sea positiva o negativa, y a través de una cañería. Materiales particulados finos en el rango de los micrones hasta partículas de 20 mm se pueden

transportar en forma horizontal y/o vertical, desde algunos metros hasta máximo dos kilómetros de distancia, y con capacidades de hasta 1000 t/h a través de cañerías de hasta 500 mm de diámetro.

La principal ventaja del transporte neumático de sólidos a granel es que los sistemas son cerrados, y por lo tanto, no-contaminantes. El material transportado se “encierra” totalmente dentro de la cañería, lo cual protege al producto del medio ambiente y viceversa (al medio ambiente del producto en caso de transportar materiales peligrosos, explosivos, tóxicos, biológicos, etc.). Además, son sistemas muy limpios, adecuados para muchos y variados procesos, flexibles para cambiar de dirección, requieren de un reducido espacio y son fáciles de automatizar.

Dentro de las desventajas es importante destacar que no todos los materiales particulados se pueden transportar neumáticamente a través de cañerías, sino sólo aquellos materiales secos, no cohesivos, de fácil escurrimiento libre por gravedad, y relativamente finos. Materiales frágiles pueden sufrir de excesiva atrición y materiales abrasivos pueden causar desgaste prematuro en las cañerías y codos. Otras limitaciones del transporte neumático son el tamaño máximo de partícula, la capacidad máxima de transporte, la distancia a transportar y el mayor consumo de energía.

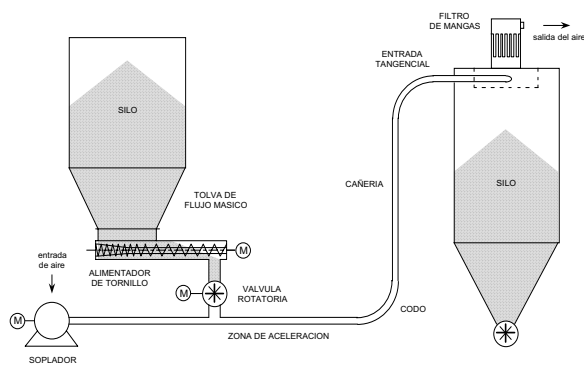
Hoy en día se pueden encontrar sistemas de transporte neumático en las más diversas industrias. Incluso existen algunas aplicaciones algo inusuales como el transporte neumático de gallinas vivas en granjas, transporte neumático de botellas plásticas y/o latas de cerveza, transporte neumático de cubos de hielo en minas subterráneas en Sudáfrica, transporte de pellets para alimentar salmones, etc.

En Chile, quizás una de las aplicaciones más relevantes sea el transporte e inyección neumática de concentrado de cobre seco a los convertidores Teniente en que el material es introducido al reactor bajo el baño de material fundido, con alta presión y capacidades de 100 tph. Otra aplicación muy común es el uso de camiones tolva presurizados para el transporte a granel de diversos materiales tales como cal, cemento, carboncillo, azúcar, harina, yeso, etc. y en que la descarga de la tolva a los silos de almacenamiento se realiza en forma neumática.

**1.1 Sistema de fase diluída y baja presión**

Diversos tipos de sistemas existen para el transporte neumático de materiales sólidos a granel, incluyendo sistemas abiertos o cerrados, de presión positiva o negativa, de flujo diluído o denso, continuos o batch, etc. Actualmente, los sistemas de transporte neumático de baja presión positiva, continuos, de alta velocidad y fase diluída, son los más usados en la industria debido a su mayor capacidad de transporte en cuanto a flujo, mayores distancias de transporte, el flujo es muy estable y se puede controlar y regular fácilmente, y porque permiten transportar materiales desde un punto de alimentación a varios puntos de descarga. Por lo tanto, el presente trabajo aborda este tipo de sistemas de transporte neumático y no se incluyen los sistemas en fase densa ni de presión negativa.

A modo de ejemplo, la Figura 1 muestra esquemáticamente los componentes básicos de un sistema de transporte neumático en fase diluída, continuo y de baja presión positiva (inferior a 1 bar).



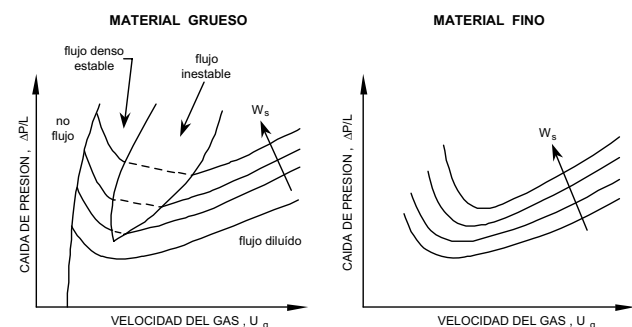
**Figura 1:** Esquema de un sistema de transporte neumático en fase diluída y de baja presión positiva.

En este tipo de sistemas de transporte neumático, el material es transportado en suspensión dentro de la cañería, las partículas se distribuyen uniformemente en toda la sección transversal de la cañería (flujo homogéneo), la concentración de sólidos es relativamente baja (inferior a 10 kgs de sólidos por kg de gas) y la velocidad de transporte es relativamente alta. El soplador provee el flujo y la presión de aire necesario para transportar al material desde el punto de alimentación hasta el punto de descarga. El alimentador introduce las partículas sólidas dentro de la cañería donde se mezclan con el gas de transporte y a un flujo controlado para evitar sobrecargar la línea. Sistemas de presión positiva requieren de un mecanismo de sello para alimentar el material (generalmente a presión ambiente) dentro de la cañería que está presurizada. En el ejemplo se muestra además un tornillo de flujo másico como alimentador (para asegurar flujo másico de descarga en el silo), una válvula rotatoria tipo ‘airlock’, una tee en la unión con la cañería, los silos de almacenamiento, la cañería, codos y un filtro de mangas.

**1.2 Diagrama de estado**

Una de las maneras más sencillas de describir el funcionamiento de un sistema de transporte neumático es mediante el diagrama de estado. En él se grafica para un sistema en particular la caída de presión por unidad de largo de la cañería,  $\Delta P/L$ , en función de la velocidad del gas de transporte,  $U_g$ , para curvas de flujo de sólidos constante,  $W_s$ , como parámetro.

La Figura 2 muestra esquemáticamente el diagrama de estado para materiales gruesos y finos. Claramente, la caída de presión depende de la velocidad del gas de transporte y del flujo de sólidos. En el caso de sistemas en fase diluída, la caída de presión aumenta al aumentar la velocidad del gas, característica típica de este tipo de sistemas. En cambio, en el caso de sistemas en fase densa, la caída de presión aumenta al disminuir la velocidad del gas debido a la mayor fricción de pared y menor área efectiva de la cañería. Existe una zona inestable entre ambos, y una zona bajo la cual ya no es posible transportar un material (velocidad mínima de transporte).



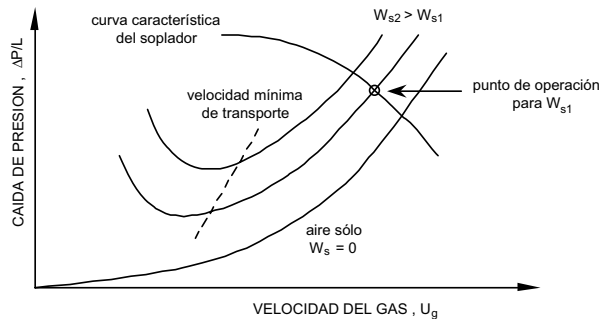
**Figura 2:** Diagrama de estado de un sistema de transporte neumático para materiales gruesos y finos.

### 1.3 Diseño de sistemas de transporte neumático

Para diseñar y/o seleccionar un sistema nuevo de transporte neumático y/o para comprobar si un sistema existente opera adecuadamente, el primer paso es determinar las características físicas y de fluidez del material a manejar. Además, la naturaleza del material a transportar es de vital importancia y puede limitar significativamente la elección de un sistema de transporte neumático. Es imprescindible conocer las siguientes propiedades:

- Tamaño de partículas: máximo, mínimo y la distribución granulométrica,
- Densidad y forma de las partículas,
- Fluidez del material y su permeabilidad,
- Otros: abrasividad, toxicidad, fragilidad, dureza, reactividad, compresibilidad, tendencia a segregarse, efectos electrostáticos, etc.

El segundo paso es realizar ensayos de laboratorio en un sistema de transporte neumático “similar” para determinar experimentalmente parámetros tales como el tipo de flujo desarrollado en la cañería, la velocidad mínima de transporte del material, la relación de carga ( $\mu$ ) y la caída de presión ( $\Delta P/L$ ) en función de la velocidad de transporte ( $U_g$ ). Con estos datos se podrá construir el diagrama de estado para determinar el punto óptimo de operación, y seleccionar y dimensionar los componentes básicos que conforman el sistema, como se ilustra en la Figura 3.



**Figura 3:** Determinación del punto de operación de un sistema de transporte neumático en fase diluida.

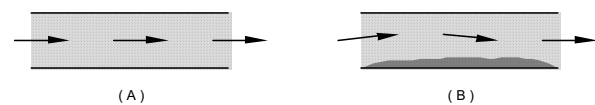
Uno de los parámetros más importantes para el diseño y la operación eficiente de sistemas de transporte neumático en fase diluida es la correcta determinación de la velocidad de transporte para un material y sistema en particular. Este parámetro afecta además el tipo de flujo desarrollado en la cañería y la caída de presión.

Sistemas de transporte neumático diseñados para operar a altas velocidades (flujo homogéneo) están sujetos a un alto consumo de energía, posible degradación y/o segregación del material, y desgaste excesivo de cañerías y codos, lo cual se puede traducir en una operación costosa y poco rentable. Por otro lado, sistemas diseñados para operar a bajas

velocidades o elevados flujos de sólidos pueden sufrir la depositación de partículas sobre el fondo de la cañería, flujo errático de material, e incluso llegar a tapan o embancar la cañería, lo cual detiene completamente el sistema. Por lo tanto, como determinar la velocidad óptima de transporte es considerado uno de los pasos más importantes en el correcto dimensionamiento y operación de sistemas de transporte neumático.

Aún no existe un procedimiento universalmente reconocido para determinar la velocidad mínima de transporte en base a las características de los materiales a transportar, dimensiones y trazado de la cañería, y las condiciones de operación del sistema para un material y sistema de transporte neumático en particular. Una diversidad de correlaciones empíricas y semi-empíricas para estimar este parámetro se han ido acumulando en la literatura especializada junto con una serie de términos y definiciones como velocidad crítica de transporte, velocidad óptima de transporte, velocidad de desprendimiento, velocidad de depositación, etc. que “más que ayudar a un usuario lo confunden” al momento de tener que estimar la velocidad mínima de transporte para un material determinado. Estos términos y definiciones para referirse a la velocidad mínima de transporte se basan en observaciones visuales del tipo de flujo desarrollado, mediciones de la caída de presión y/o mediciones de la velocidad de partícula. [1]

Dos tipos de flujo se pueden distinguir claramente en sistemas de transporte neumático horizontales: flujo sobre la velocidad mínima de transporte y flujo bajo la velocidad mínima de transporte del material, como se mencionó anteriormente. En el primer caso, las partículas fluyen a alta velocidad, en suspensión y homogéneamente dispersas en la misma dirección que el aire (flujo homogéneo). En el segundo caso, algunas partículas se depositan en el fondo de la cañería mientras otras deslizan sobre estas dunas en reposo, como se muestra esquemáticamente en la Figura 4.



**Figura 4:** Flujos en cañerías horizontales: sobre (A) y bajo (B) la velocidad mínima de transporte.

Si bien flujos bifásicos (gas + sólidos) en cañerías obedecen a todas las leyes de la Mecánica de los Fluidos, aún no se dispone de soluciones teóricas a partir de estos principios básicos. Su naturaleza turbulenta, el gran número de variables involucradas, la interacción caótica entre ambas fases, y la gran variedad de materiales manejados hacen todavía muy complejo la modelación teórica de este tipo de flujos. Por lo tanto, estudios experimentales resultan muy necesarios y contribuyen con una base de datos para entender mejor el fenómeno y para poder diseñar y operar sistemas adecuadamente.

Más detalles y un diagrama de bifurcación propuestos para estudiar el flujo de partículas en sistemas de transporte neumático, incluyendo ambos fenómenos de depositación y desprendimiento de partículas sólidas en cañerías horizontales y su relación con la velocidad mínima de transporte, se puede consultar en la referencia [2].

## 2. EXPERIMENTAL

Uno de los proyectos de investigación desarrollados actualmente por el CITRAM es el transporte neumático de materiales sólidos a granel. Para esto se diseñó e implementó un sistema a modo de “banco de pruebas” con la instrumentación necesaria para la determinación experimental de parámetros tales como: velocidad mínima y óptima de transporte, velocidad de depositación, pérdida de carga, fenómeno de atrición, entre otros. La información obtenida puede conformar una base de datos que permita el adecuado diseño y operación de este tipo de sistemas para materiales de uso común en nuestro país. [3]

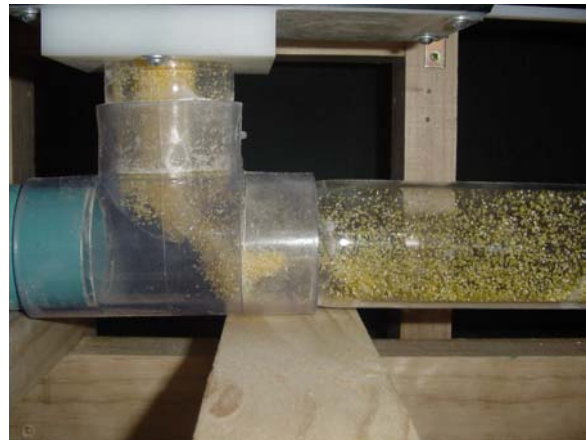
El sistema implementado corresponde a un sistema de transporte neumático horizontal en fase diluída, con cañerías de 57,5 mm (I.D.) con un largo total de transporte de 6 m aproximadamente. El sistema está compuesto por cañerías de acrílico transparente que permiten una mejor visualización del fenómeno de transporte y del comportamiento del material en el interior de la cañería y punto de alimentación.

El sistema cuenta con un silo de almacenamiento y una tolva que permiten asegurar flujo másico de descarga. El sistema de alimentación consiste en una válvula de guillotina de acción on-off. En la descarga de la línea se instaló un filtro de mangas para colectar las partículas transportadas y retornar el aire de transporte al ambiente y limpio.

El flujo de sólidos se mide a través del tiempo de descarga del silo de alimentación (ya que posee flujo másico de descarga). El caudal de aire de transporte se mide mediante una placa orificio instalada antes del punto de alimentación (flujo de aire sólo). La caída de presión se mide con transductores instalados en varios puntos de la línea.

Un soplador equipado con un variador de frecuencia y válvulas dosificadoras de material permiten la realización de pruebas a distintas velocidades y con distintos flujos de material. De esta forma es posible determinar las características de transporte del material bajo distintas condiciones de operación, y recopilar la información necesaria para la representación del diagrama de estado.

A modo de ejemplo, las Figuras 5, 6 y 7 muestran el funcionamiento del sistema durante los ensayos realizados con griz de maíz (material seco y de buena fluidez) para diferentes condiciones de operación.



**Figura 5:** Ensayos con griz de maíz: Punto de alimentación de material a alta velocidad y sin acumulación.



**Figura 6:** Ensayos con griz de maíz: Transporte horizontal en fase diluída a alta velocidad (flujo homogéneo).



**Figura 7:** Ensayos con griz de maíz: Transporte horizontal en fase diluída a baja velocidad (depositación de partículas).

La Figura 8 muestra el diagrama de estado modificado para el griz de maíz ensayado a dos flujos de sólidos de 0,05 y 0,12 kg/s, graficando la caída de presión total del sistema ( $P_{total}$ ) en función de la velocidad del aire de transporte.

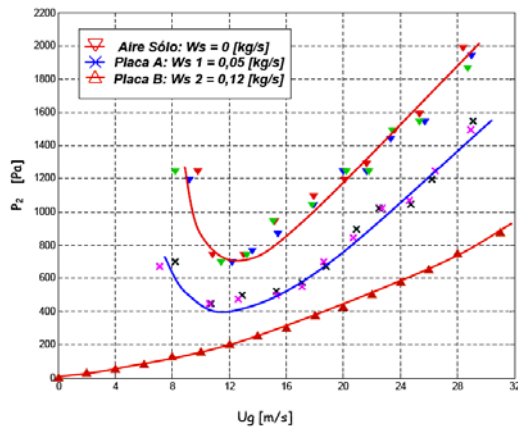


Figura 8: Diagrama de estado modificado obtenido en forma experimental para el griz de maíz. [3]

### 3. RESULTADOS

Diversos ensayos de transporte se realizaron en el sistema implementado e instrumentado con los siguientes materiales: griz de maíz, azúcar granulada y nitrato de potasio prilado. Las características de tamaño y densidad de cada uno de estos productos se entrega en la Tabla 1, desde el punto de vista del transporte neumático.

Tabla 1: Características principales de los productos ensayados. [4]

Material	Tamaño máximo de partícula (mm)	d <sub>50</sub> (mm)
Gritz de maíz	1,4	0,85
Azúcar granulada	2,0	0,80
Nitrato de potasio prilado	3,0	2,50

Material	Densidad real de partícula (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )
Gritz de maíz	1500	800
Azúcar granulada	1500	950
Nitrato de potasio prilado	2000	1150

#### 3.1 Velocidad mínima de transporte

La velocidad mínima de transporte para cada producto ensayado se determinó visualmente (inestabilidad observada en el flujo) y mediante el transductor de presión (oscilación de la señal de ΔP/l). La Tabla 2 entrega los valores recomendados para el transporte neumático de cada uno de los productos y en función del flujo de sólidos y la relación de carga  $\mu = W_s/W_g$ .

Tabla 2: Velocidad mínima de transporte y relación de carga. [4]

Gritz de maíz	U <sub>g min</sub> (m/s)	μ (-)
W <sub>s</sub> = 0.0544 kg/s	22	0.7
W <sub>s</sub> = 0.124 kg/s	25	1.45
W <sub>s</sub> = 0.272 kg/s	28	3.0

Azúcar granulada	U <sub>g min</sub> (m/s)	μ (-)
W <sub>s</sub> = 0.0827 kg/s	24	0.95
W <sub>s</sub> = 0.124 kg/s	26	1.4
W <sub>s</sub> = 0.277 kg/s	30	3.0

Nitrato de potasio prilado	U <sub>g min</sub> (m/s)	μ (-)
W <sub>s</sub> = 0.0771 kg/s	26	1.0
W <sub>s</sub> = 0.1560 kg/s	28	1.75
W <sub>s</sub> = 0.363 kg/s	30	3.9

Claramente, a mayor flujo de sólidos (y relación de carga μ), mayor debe ser la velocidad del aire de transporte para evitar problemas de inestabilidad y eventuales obstrucciones de la cañería.

#### 3.2 Diagrama de estado

Como se mencionó anteriormente, el diagrama de estado se utiliza para describir y representar las características de transporte neumático de un producto y en un sistema en particular. Las Figuras 9, 10 y 11 muestran el diagrama de estado obtenido para cada uno de los materiales ensayados.

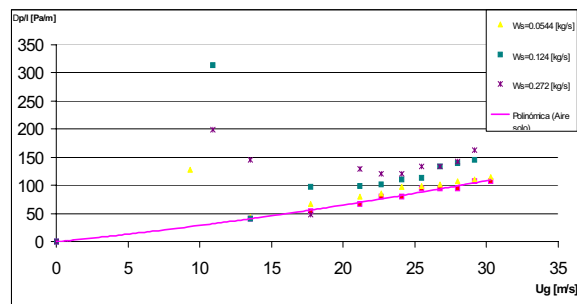


Figura 9: Diagrama de estado obtenido para el griz de maíz. [4]

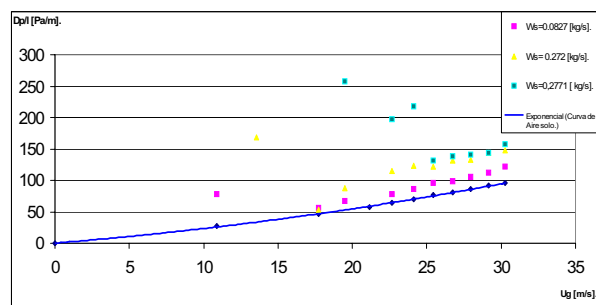
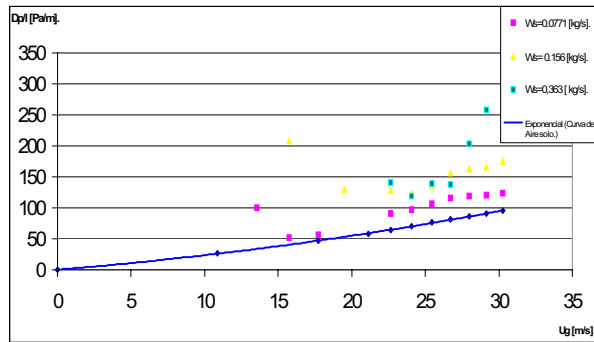


Figura 10: Diagrama de estado obtenido para la azúcar granulada. [4]



**Figura 11:** Diagrama de estado obtenido para el nitrato de potasio prilado. [4]

### 3.3 Caída de presión

Utilizando el modelo propuesto por Weber [5], la caída de presión total en un tramo de cañería horizontal y con flujo desarrollado y diluido se puede representar de la siguiente manera:

$$\Delta P/l_T = (1 + K \cdot \mu) \Delta P/l_G \quad (1)$$

$$\mu = W_s/W_g \quad (2)$$

donde:

- $\Delta P/l_T$  = Caída de presión total del sistema por unidad de largo [Pa/m]
- $\Delta P/l_G$  = Caída de presión del fluido de transporte por unidad de largo [Pa/m]
- K = coeficiente de fricción del material [-]
- $\mu$  = relación de carga [-]
- $W_s$  = flujo de sólidos (kg/s)
- $W_g$  = flujo de aire (kg/s)

La Tabla 3 entrega el valor de K promedio para cada uno de los productos ensayados, y fue calculado en base al promedio de tres mediciones para cada punto ensayado fijando la velocidad del aire de transporte y el flujo de sólidos en el sistema. También se incluye el número de puntos ensayados y el error porcentual obtenido. Cabe destacar que estos valores son válidos para relaciones de carga  $\mu$  inferiores a 4, dadas las limitaciones de capacidad del sistema.

**Tabla 3:** Coeficiente K obtenido para los productos ensayados [4]

Material	N	K [-]	Error (%)
Gritz de maíz	26	0.38	8.0
Azúcar granulada	22	0.32	7.3
Nitrato de potasio prilado	23	0.46	5.5

## 4. CONCLUSIONES

Un nuevo laboratorio especialmente dedicado al manejo y transporte de materiales sólidos a granel (CITRAM) formado por el Depto. de Ingeniería Mecánica de la UTFSM pretende investigar las características y propiedades de transporte neumático de los principales materiales particulados manejados en Chile.

Además de contar con una metodología apropiada para determinar la factibilidad de transportar neumáticamente un determinado producto, el CITRAM permitirá establecer las directrices para modelar analíticamente el flujo bifásico en cañerías y las condiciones necesarias para evitar problemas de flujo, generar y transmitir conocimientos a través de la investigación, apoyar la docencia en ingeniería y formar futuros profesionales expertos en esta disciplina, y colaborar de manera innovadora con la industria nacional aportando tecnologías eficientes y recursos humanos.

Mediante la comprensión de los fenómenos de depositación y desprendimiento de partículas sólidas en cañerías, su relación con la velocidad mínima de transporte, los diagramas de estado y de bifurcación de un sistema y/o material, los diferentes tipos de flujo existentes, es posible transportar eficientemente en forma neumática materiales sólidos a granel.

## 5. REFERENCIAS

- [1] F. Cabrejos and G. Klinzing, "Minimum Conveying Velocity in Horizontal Pneumatic Transport and the Pickup and Saltation Mechanisms of Solids Particles", *Bulk Solids Handling*, Vol. 14, No. 3 (1994), pp. 541-550.
- [2] F. Cabrejos and G. Klinzing, "Incipient Motion of Solid Particles in Horizontal Pneumatic Conveying", *Powder Technology*, Vol. 72 (1992), pp. 51-61.
- [3] M. I. Jofré, "Diseño e Implementación de un Sistema Experimental para el Transporte Neumático de Materiales Sólidos a Granel", memoria para optar al título de Ingeniero Mecánico Industrial, UTFSM, Oct. 2003.
- [4] J. Rojas, "Características del Transporte de Materiales Sólidos a Granel en un Sistema Neumático", memoria para optar al título de Ingeniero Mecánico Industrial, UTFSM, Nov. 2003.
- [5] M. Weber, "Principles of Hydraulic and Pneumatic Conveying in Pipes", *Bulk Solids Handling*, Vol. 1, No.1, Feb. 1981, pp. 57-63.