Refrigeración artificial en silos, excelentes resultados de ensayos. Acortar el periodo de enfriado y reduce las pérdidas de peso

Publicado el: 21/10/2009

Autor: Rubén Roskopf, INTA AER Totoras, E.E.A Inta Oliveros y Ricardo Bartosik, INTA Balcarce, Argentina

Al almacenar granos, sin importar el sistema usado, el objetivo en primera instancia es retenerlo durante un determinado tiempo tratando de preservar su calidad. Sin embargo existen muchos factores tanto bióticos (insectos, hongos, etc.), como abióticos (temperatura del grano y humedad) además de su calidad intrínseca (granos dañados, partidos, etc.) que pueden condicionar severamente la duración del período de almacenaje y la evolución de la calidad del mismo a través del tiempo.

De todos los factores, la temperatura y la humedad del grano son las dos variables que más afectan la actividad metabólica de los granos y de los organismos que viven entre y dentro de ellos. En la medida que ambos factores sean más elevados mayor será la actividad metabólica, mayor la pérdida de peso y de calidad, y por ende menor el tiempo de almacenamiento Una forma de actuar para extender el período de almacenamiento es a través del control de la humedad del grano. En este caso, si el granel tiene humedad por arriba de la tolerancia de recibo y no se dispone de un buen sistema de aireación, o las condiciones ambientales no lo permiten, es conveniente secarlo para disminuir su contenido de humedad y de esa forma preservarlo del desarrollo de insectos y hongos.

Otra forma alternativa de actuar para aumentar el período de almacenamiento sin disminuir la calidad es disminuyendo la temperatura de la masa de granos. En nuestro país la técnica de enfriamiento artificial de granos es incipiente y escasamente desarrollada, mientras que en otros países de climas tropicales con temperaturas medias más elevadas, en donde las condiciones del aire ambiente no son suficientes para bajar la temperatura de los granos, la utilización de equipos para refrigerar es más habitual.

La refrigeración de granos consiste en modificar y acondicionar artificialmente el aire atmosférico entregándolo al granel a una temperatura más baja que la ambiental. También en algunos casos y según los equipos, se puede modificar el contenido de humedad del aire para evitar el rehumedecimiento o sobresecado de la masa de granos durante el proceso de refrigeración.

Diversas son las ventajas citadas de la refrigeración artificial:

- .- Reduce las pérdidas de peso debido a reducción del metabolismo: al bajar la temperatura, la tasa respiratoria de los granos disminuye, con lo cual disminuye la pérdida de peso, <u>nutrientes</u> y la generación de calor. Esto permite almacenar el granel por un período de tiempo significativamente mayor, conservando la calidad del producto.
- .- Disminuye la reproducción de insectos y la actividad de hongos: la temperatura óptima para el desarrollo y reproducción de los insectos se encuentra entre los 25 y 32 °C. El rango entre los 19 y los 25 °C es subóptimo, mientras que entre los 5 y 15,5 °C se produce la muerte en días, dependiendo de la especie. Diversos autores sostienen que los insectos no pueden reproducirse por debajo de los 15 °C por lo que manteniendo los granos por debajo de esa temperatura y dependiendo de las especies, el metabolismo de los insectos es bajo y se realiza un control parcial, inhibiendo el aumento de las poblaciones. En estos casos puede no ser necesario aplicar insecticidas lo cual ayuda a la reducción de costos y la no aparición de residuos químicos. En el caso de hongos como Aspergillus o Penicillum también disminuye su actividad y con esto también la aparición de toxinas (Bogliaccini, 2006). Sin embargo, en condiciones de almacenamiento con humedad relativa del espacio intergranario mayor a 81 % (17 a 20 % de humedad dependiendo del tipo de grano) los hongos pertenecientes al generó Penicillum son capaces de germinar y crecer a partir de los 8 °C. Esto evidencia que si se almacenan granos a bajas temperaturas pero con humedad, el período de almacenamiento no puede ser excesivo.
- .- El uso de equipos de refrigeración artificial acorta significativamente la duración del ciclo de enfriado y permite independizarse de las condiciones climáticas externas. Estos equipos pueden funcionar aún con elevadas temperaturas, excesiva humedad o hasta con precipitaciones.
- .- En el caso de almacenaje de granos para semillas las ventajas son aun más importante ya que permite mantener el vigor y la germinación de las mismas.
- .- Los granos tienen muy baja conductibilidad térmica, esto es un inconveniente al momento de enfriarlos, pero una vez fríos es un beneficio, haciendo que la baja temperatura alcanzada en el granel perdure en el tiempo. Esta baja

temperatura se mantendrá estable por un determinado tiempo que dependerá de las condiciones climáticas, de las estructuras y su grado de aislación de los factores externos.

- .- Facilita el trabajo del encargado de la planta de acopio: se enciende el equipo y su funcionamiento se puede extender los fines de semana, feriados etc. sin preocuparse por las condiciones climáticas.
- .- Economía: al independizarse de las condiciones climáticas, el funcionamiento del equipo se puede realizar en la horas de menor costo de la energía.

Los objetivos del presente ensavo fueron:

Recopilar información técnica del proceso de refrigeración artificial de un silo de maíz. Determinar el consumo de energía del equipo a lo largo de todo el ciclo de refrigeración y realizar el análisis del costo insumido en el uso de esta tecnología.

La experiencia.

El ensayo se llevo a cabo en la planta de AFA Las Rosas, al sur de la Provincia de Santa Fe. El ciclo de refrigeración se inició el día 29 de abril de 2009 a las 17:30 hs prolongándose hasta el día 4 de mayo del 2009 hasta las 10 hs.

El tratamiento de refrigeración artificial consistió en insuflar aire en condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, a través de toda la masa de granos de maíz almacenados en el silo. Para introducir el aire en el silo se utilizó el sistema de conductos de distribución de aire preexistente en el silo. Se retiró el ventilador de aireación y se conectó en su lugar el equipo refrigerador (IMEG SA, Rosario, Argentina) a través de un conducto de 600 mm de diámetro (Figura 1). Esta operación es rápida y sencilla, solamente se debe adaptar el diámetro de la boca de aireación del silo al conducto proveniente del equipo refrigerador. En los casos que el silo cuente con mas de un ventilador de aireación, es recomendable utilizar un derivador y conectar todas las bocas de aireación con el objetivo de que la distribución del aire frío dentro del silo sea lo más homogénea posible.



Figura 1: Vista de la conexión entre el equipo refrigerador IMEG S.A. y el silo.

Todo el equipo es móvil con cuatro ruedas para facilitar su desplazamiento dentro de playa de silos. El tablero de comando tipo "touch screen" (sensible al tacto) le permite al operador seleccionar las condiciones deseadas de inyección de aire en cuanto a temperatura y humedad relativa. Posteriormente el microprocesador realiza los ajustes necesarios para cumplir con las condiciones impuestas,

adaptando el funcionamiento de todos los componentes (Figura 2). El equipo fue programado para que entregue su caudal en un rango del 40 al 78 % de su capacidad máxima total, a 11 °C y 65 % de humedad relativa.



Figura 2: panel sensible al tacto que informa de las condiciones de funcionamiento del equipo y permite setear la humedad y temperatura de inyección del aire al silo.

Las medidas del silo son:

Diámetro: 12,5 m.

Altura del cono inferior: 4,7 m. Altura del cono superior: 3,6 m. Altura del cilindro: 12,1 m. Numero de bocas de aireación: 1

Dado que no estaba totalmente lleno, el total almacenado en el silo fue de 1200 Tn de maíz, teniendo un cono en la parte superior.

El monitoreo de la evolución de la temperatura a lo largo del ciclo de refrigeración se realizó a través del sistema de termometría instalado en el silo y complementariamente de la extracción manual de muestras usando un calador zonda en la boca de inspección lateral y en la parte superior de la masa de granos. (Figura 3) Estas muestras se extrajeron al inicio y finalización del ensayo, midiéndose también el contenido de humedad.



Figura 3: Extracción de muestras para la medición de la temperatura y humedad del maíz.

El sistema de termometría se programó para que diariamente registre la temperatura del granel a las 11 hs y para evitar interferencias en las lecturas, el equipo refrigerador se detuvo diariamente a las 10 hs reiniciando su trabajo a las 12 hs. De esta forma las termocuplas registraron el verdadero valor de temperatura del grano y no del aire circulando por los espacios intergranarios.

La temperatura de la muestra extraída se midió a través del uso de un termómetro de mercurio. La metodología consistió en extraer una muestra y dejarla estabilizar en un recipiente hasta que el termómetro reporte un valor constante de temperatura (esto demandó entre 5 y 10 minutos).

La velocidad del aire frío insuflado al silo se midió utilizando un anemómetro de cable caliente especialmente adquirido para el ensayo. Este instrumento, al tener un sensor de hilo caliente telescópico y extensible permite medir la velocidad del aire dentro de conductos. Las mediciones se realizaron en la boca de entrada al silo y en la boca de salida del equipo refrigerador (Figura 4). Dado que el equipo varía su caudal en función de las condiciones ambientales, la mediciones de las velocidades del aire se realizaron a 40, 45, 50, 60 70 y 78 % de la capacidad total del equipo. Finalmente, obteniendo el promedio entre los dos puntos de medición y relacionando la velocidad del aire insuflado con el área, se obtuvo el caudal total en m3/h y el caudal especifico en m3 /t/min.





Figura 4: Medición del caudal de aire. Arriba: en la boca de entrada al silo. Abajo: en el conducto de salida del equipo refrigerador IMEG.

Durante la duración del ensayo y en horarios diurnos, aproximadamente desde las 9:30 hs hasta las 17 hs se registraron las siguientes variables:

TA: Temperatura Ambiente (°C) TE: Temperatura del Aire Enfriado (°C)

TSA: Temperatura del Aire de Salida (°C) HR: Humedad Relativa del Aire de Salida

Ve: % de velocidad del ventilador del evaporador (es el encargado de insuflar el aire frío al silo)

CA: Consumo total del equipo (Amperes) a las distintas capacidades del ventilador del evaporador. Para ello se utilizó una pinza amperometrica, posteriormente los valores se llevaron a Kw de consumo.

Al momento de iniciar el ensayo, el silo había recibido aireación por aspiración.

Al finalizar el ciclo de refrigeración se tapó la boca de aireación a fin de evitar el "efecto chimenea" (Figura 5). Esto es el ingreso de aire caliente exterior que circula por la masa de granos produciendo su calentamiento.



Figura 5: cierre de la boca de aireación para evitar el calentamiento del aire por el "efecto chimenea"

Resultados obtenidos.

Durante la duración del ensayo la temperatura ambiente diurna en promedio fue de 23 °C, con picos de hasta 29 °C. Al comenzar el insuflado de aire frío, se observaron insectos saliendo por pequeñas aberturas existentes. Esto evidencia el desarrollo de los mismos dentro del granel, principalmente en las capas inferiores ya que en superficie o en las muestras extraídas no se observaron. Esto podría evidenciar algún grado de deterioro del grano almacenado.

La duración total del ciclo de refrigeración fue de 104,5 hs.

A continuación se muestran las tablas con los datos de temperaturas de las termocuplas correspondientes al silo evaluado para los distintos niveles de altura, al comienzo del ensayo y las 16,5 hs de iniciada la refrigeración.

Tabla nº 1: temperaturas a distintos niveles por nº de cable de termocupla. Miércoles 29/04/2009 - 17:20 hs. (inicio de refrigeración 29/04/2009 - 17:30 hs)

| Cable | Cable 1 | Cable 2 | Cable 3 | Cable 4 | Cable 5 | Cable 6 | Cable 7 | Tm |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------|------|
| Nivel 08 | | ju: | | | | | 25,0 | 25,0 |
| Nivel 07 | 24,0 | 24,0 | 24,0 | 24,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 24,4 |
| Nivel 06 | 24,0 | 24,0 | 24,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 25,0 | 24,6 |
| Nivel 05 | 24,0 | 24,0 | 24,0 | 24,0 | 24,0 | 25,0 | 25,0 | 24,3 |
| Nivel 04 | 25,0 | 25,0 | 24,0 | 25,0 | 25,0 | 26,0 | 25,0 | 25,0 |
| Nivel 03 | 24,0 | 25,0 | 24,0 | 25,0 | 25,0 | 24,0 | 25,0 | 24,6 |
| Nivel 02 | 23,0 | 20,0 | 23,0 | 24,0 | 24,0 | 24,0 | 26,0 | 23,4 |
| Nivel 01 | 20,0 | 21,0 | 26,0 | 21,0 | 24,0 | 28,0 | 23,0 | 23,3 |
| | | | | | | Promedio gral. | | 24,3 |

Tabla nº 2: temperaturas a distintos niveles por nº de cable de termocupla.

Jueves 30/04/2009 - 11:00 hs.

| | Cable 1 | Cable 2 | Cable 3 | Cable 4 | Cable 5 | Cable 6 | Cable 7 | Tm |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|------|
| Nivel 08 | | | | | | | 24 | 24,0 |
| Nivel 07 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 24 | 23,1 |
| Nivel 06 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 25 | 24,1 |
| Nivel 05 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 25 | 24,1 |
| Nivel 04 | 21 | 22 | 22 | 22 | 22 | 23 | 22 | 22,0 |
| Nivel 03 | 15 | 16 | 19 | 16 | 16 | 21 | 16 | 17,0 |
| Nivel 02 | 15 | 12 | 16 | 15 | 15 | 16 | 15 | 14,9 |
| Nivel 01 | 16 | 16 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16,1 |
| | | 3 | | | | Promed | lio gral. | 20,3 |

Temperaturas mayores a 17 °C.

Temperaturas menores o iguales a 17 °C.

En las capas inferiores, a las 16,5 horas de funcionamiento del equipo se registró una baja de la temperatura de los granos, principalmente hasta el nivel 3. El promedio general de temperatura de la masa de granos disminuyó en 4 °C, de 24,3 °C a 20,3 °C.

A continuación se muestra la temperatura final de los granos al finalizar el ensayo el día 4 de mayo del 2009 a las 10 hs

Tabla nº 3:. Temperaturas a distintos niveles por nº de cable de termocupla al momento de finalización del ensayo.

Lunes 4/05/2009 - 10:00 hs.

| Cable | Cable 1 | Cable 2 | Cable 3 | Cable 4 | Cable 5 | Cable 6 | Cable 7 | Tm |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|------|
| Nivel 08 | | | | | | | 15 | 15,0 |
| Nivel 07 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14,0 |
| Nivel 06 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14,0 |
| Nivel 05 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14,0 |
| Nivel 04 | 13 | 14 | 14 | 14 | 13 | 14 | 14 | 13,7 |
| Nivel 03 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14,0 |
| Nivel 02 | 13 | 10 | 14 | 14 | 13 | 14 | 13 | 13,0 |
| Nivel 01 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14,0 |
| | | | | | | Promed | lio gral. | 13,8 |

Temperaturas menores o iguales a 17 °C.

De los datos expuestos se evidencia la disminución de la temperatura de las 1.200 Tn de maíz almacenadas en el silo. El gradiente de disminución de temperatura fué de 10,5 °C, (desde 24,3 °C a 13,8 °C) Es importante mencionar que se logró disminuir uniformemente la temperatura, inclusive en la capa superior de granos y en el corazón del silo, el cual contaba con un cono elevado de granos. La zona central del silo y el cono frecuentemente son más resistentes a la disminución de la temperatura de los granos, esto se produce dada la mayor concentración de material fino que dificulta el pasaje del aire insuflado y la mayor altura total, respecto de los laterales del silo.

Resultado de las variables complementarias medidas durante el ensayo.

Velocidad de aire y caudal especifico.

A continuación se muestra el caudal entregado por el equipo obtenido como promedio de las mediciones a las distintas capacidades del equipo, en la boca de entrada al silo y el conducto de salida del equipo refrigerador.

Tabla nº 4 caudal promedio insuflado al silo.

| Caudal por hora (m3/h) | 19.224 | |
|--------------------------------|--------|--|
| Tn almacenadas | 1200 | |
| Caudal especifico (m³/tn/min.) | 0,26 | |

Diversos autores sostienen que el caudal para refrigeración artificial debe ser igual o mayor a 0,1 m3 /tn/min. El caudal específico relevado en el equipo de 0,26 m3 /tn/min puede considerarse satisfactorio para cumplir con el objetivo para el cual fue diseñado e instalado en el silo.

Cabe mencionar que en condiciones nocturnas en donde la temperatura ambiente es inferior y más cercana a la temperatura de inyección de aire frío, el equipo es capaz de entregar mayor caudal por tener menor necesidad de acondicionamiento del aire.

Consumo del equipo y cálculo de costos.

El consumo del equipo se modifica de acuerdo a la capacidad de entrega de aire según las condiciones ambientales. El promedio de consumo fue de 29,64 Kw, con un máximo de 33,1 Kw y un mínimo de 25 Kw

| Tn almacenadas | 1.200 |
|------------------------------|-------|
| Consumo promedio kw | 29,64 |
| Hs funcionamiento | 104,5 |
| Consumo energético total Kwh | 3.097 |
| Consumo especifico Kw/tn | 2,58 |

El consumo específico de 2,58 (Kw/tn) por tn refrigerada hasta el descenso a 13,8 °C de la temperatura de los granos se considera muy satisfactorio. Otras experiencias nacionales reportan valores de consumo específico levemente menores pero con temperaturas promedios de la masa de granos levente mayores.

Para el costo del Kw se utilizaron los valores suministrados por el encargado de la planta de acopio en base a datos suministrados por una auditoria privada ubicada en Rosario.

Se tuvo en cuenta el aumento de costos comúnmente denominado "costos fijos" surgidos de la necesidad de demandar potencia adicional en caso de estar funcionando el equipo refrigerador conjuntamente con los elementos de la planta. Sin embargo se debe tener en cuenta que la duración del ensayo incluyó un día feriado (1/5/09) en donde la planta estuvo detenida o con un consumo mínimo y un fin de semana en donde se registran menores actividades. Por lo tanto el costo aquí presentado podría considerarse levemente sobreestimado. No obstante para tener el valor máximo de costo de uso del equipo refrigerador cuando la planta está funcionando a plenitud, el cálculo se realizó de la forma mencionada.

Para el costo variable que depende del consumo del equipo, se consideró tarifas diferenciales según el horario y el consumo del equipo, con un costo horario de 3,93 \$/h entre las 18 hs y las 23 hs, de 3,82 \$/h entre las 23 y las 5 hs y de 2,41 \$/h entre las 5 y las 18 hs.

Los valores son sin IVA dado que a través de la descarga impositiva, resulta en un balance neutro a lo largo del año.

Tabla nº 5: análisis económico.

| Horario | 18-23 hs | 23 a 5 hs | 5 a 18 hs | Total |
|----------------|----------|-----------|-----------|--------|
| Costo \$/Kw | 3,93 | 3,82 | 2,41 | |
| hs totales | 25 | 30 | 49,5 | 104,5 |
| costo tot. \$ | 98,2 | 114,6 | 119,3 | 332,1 |
| Costo fijo \$ | 586 | 0 | 158,5 | 744,5 |
| Costo total \$ | 684,2 | 114,6 | 277,8 | 1076,6 |
| Costo de re | 0,9 | \$/tn | | |

El bajo costo por tn refrigerada evidencia la conveniencia de su implementación.

Dado que la disminución de la temperatura de los granos se logra en pocos días, es posible detener el equipo en las hs de máximo costo de energia (en el presente ensayo de 18 a 23 hs) para continuar su funcionamiento en los horarios restantes en donde el costo energético es menor. De esta forma el costo total del ciclo de refrigeración es

menor.

Conclusiones

Se documentó una experiencia nacional de enfriado de un silo mediante un equipo de refrigeración artificial.

El equipo logró reducir uniformemente la temperatura de 1.200 tn de maíz en 10,5 °C, (de 24,3 °C a 13,8 °C) cuando fue programado para suministrar aire a 11 °C.

El tiempo demandado para completar el enfriamiento de toda la masa de granos fue de 104,5 hs, y el consumo eléctrico total fue de 3.097 kwh con un costo total máximo de \$ 1076,6 (0,9 \$/t).

Agradecimientos

A Claudio Genero de AFA Las Rosas por su colaboración y total predisposición. A Juan Mas y Marcelo Terrazzino de IMEG S.A.