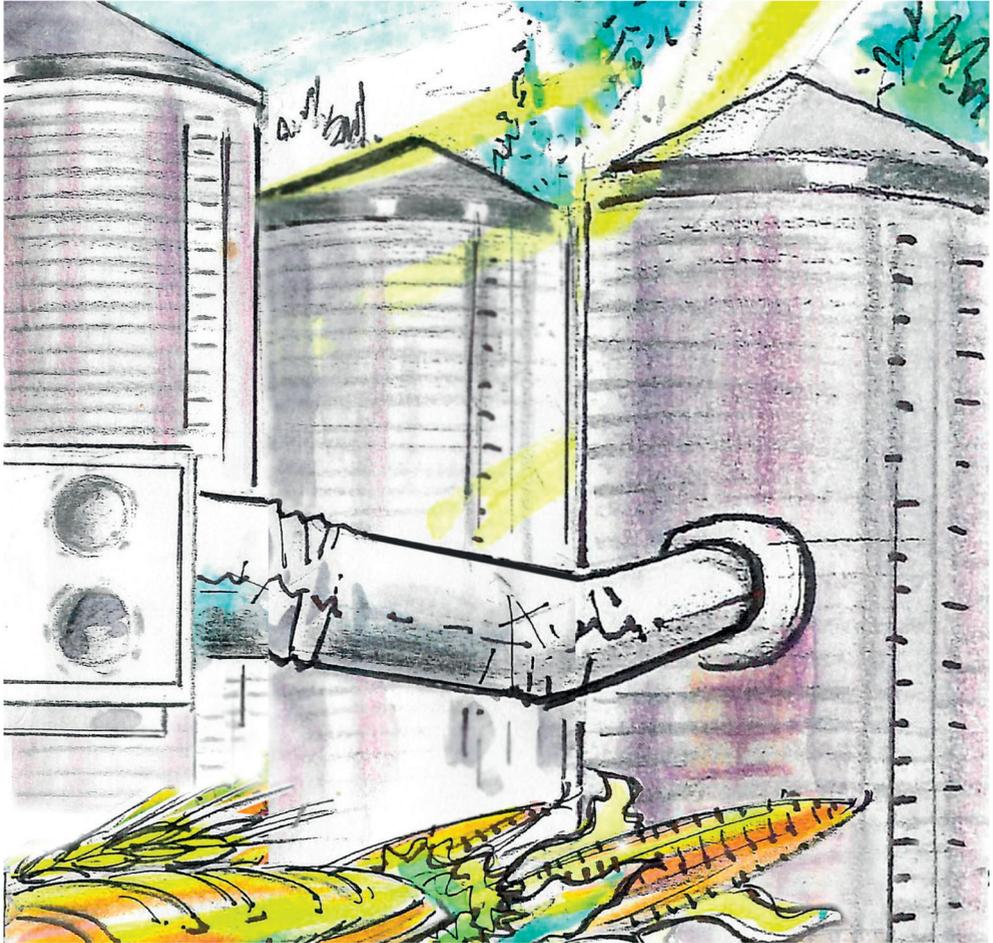


Refrigeración artificial de granos en poscosecha

Rubén Darío Roskopf

INTA | Ediciones

Colección
INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN



Ricardo Porta

Refrigeración artificial de granos en poscosecha

Rubén Darío Roskopf



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina

INTA Ediciones
Centro regional Entre Ríos / EEA Paraná
2022

631.56 Roskopf, Rubén Darío
R73 Refrigeración artificial de granos en poscosecha / Rubén Darío Roskopf.-
Buenos Aires : Ediciones INTA, Centro Regional Entre Ríos, EEA Paraná,
2022.
64 p. : il. (en PDF)

ISBN 978-987-679-333-9 (digital)

i. título

GRANOS – TECNOLOGIA POSTCOSECHA – ALMACENAMIENTO – REFRIGERACION – EQUIPO FRIGORIFICO

DD-INTA

Este documento es resultado del financiamiento otorgado por el Estado Nacional, por lo tanto, queda sujeto al cumplimiento de la Ley N°23.899.

Agradecimientos:

A Dios, porque: “en verdad todo viene de Él, ha sido hecho por Él y ha de volver a Él. A Él sea la gloria para siempre. ¡Amén!” (Romanos 11:36)

A los encargados de las plantas de acopio de granos donde se realizaron los ensayos, quienes estuvieron dispuestos, sin importar el día ni el horario.

A todas las empresas proveedoras de equipos de refrigeración artificial de granos.

Al Grupo Poscosecha de la EEA Balcarce, por la confianza y el acompañamiento técnico en la temática.

Este libro fue realizado en el marco del Proyecto Nacional 2019-PE-E7-I147-001 “Inocuidad de alimentos para consumo humano y animal”.

Diseño: Laura Palacios Machado

Editores: Diego de la Torre y Rubén Darío Roskopf

Colaboradores: Ricardo Bartosik y Bernadette Abadía

Contenido

PRÓLOGO.....	6
CAPÍTULO I:	
HISTORIA Y FUNDAMENTOS.....	7
1. Pasado y contexto actual de la refrigeración artificial de granos	8
2. Calidad, pérdida de materia seca y tiempo de almacenamiento seguro.....	10
3. Efecto de la temperatura sobre los hongos y el TAS.....	10
4. Efecto de la temperatura sobre los insectos de los granos almacenados.....	11
5. Aireación con aire natural.....	12
6. Limitaciones de la aireación con aire natural.....	12
7. El proceso de enfriamiento artificial de los granos: el ciclo de refrigeración...	13
8. El caudal específico.....	15
9. Caudal específico recomendado para enfriar.....	15
10. Duración del ciclo de refrigeración.....	16
11. ¿Cuándo está frío todo el grano?.....	16
12. Otros factores que afectan la duración del ciclo de refrigeración.....	17
CAPÍTULO II:	
APLICACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN ARTIFICIAL DE GRANOS.....	18
1. Componentes.....	19
2. Funcionamiento.....	20
3. Mantenimiento del equipo de frío.....	20
4. Conexión del equipo de frío a silos.....	22
5. Conexión del equipo de frío a una cámara de almacenamiento.....	24
6. Programación del equipo de frío.....	24
7. Medición del caudal específico.....	25
8. Metodología práctica para estimar la duración del ciclo de refrigeración.....	27
9. Elección de la capacidad del equipo refrigerador de granos.....	28
10. Drenaje del agua condensada.....	29
11. El equipo refrigerador no es una secadora de granos.....	30
CAPÍTULO III:	
COMPORTAMIENTO DE LOS GRANOS REFRIGERADOS.....	31
1. ¿Cuánto tiempo permanece frío el grano?.....	32
2. ¿Cuándo repetir el ciclo de refrigeración?.....	35
3. Precaución en la extracción de los granos refrigerados.....	35

CAPÍTULO IV:	
MONITOREO DE LA TEMPERATURA DE LOS GRANOS REFRIGERADOS.....	36
1. Monitoreo de la temperatura, termometría.....	37
2. Alternativas para el monitoreo de la temperatura del grano.....	38
a. Extracción de muestras.....	38
b. Medición con instrumental adaptado.....	39
CAPÍTULO V:	
USO EFICIENTE Y OPERATIVIDAD DEL EQUIPO DE FRÍO.....	42
1. Aislación de los conductos de conexión con la estructura de almacenaje.....	43
2. Ubicación del equipo refrigerador.....	44
3. Control de la humedad relativa del aire insuflado.....	45
4. Refrigeración de granos húmedos.....	48
5. Enfriamiento evaporativo y sobre secado.....	49
6. Uso combinado: secado con refrigeración artificial de granos.....	49
7. Refrigeración de granos secos.....	51
8. Efecto del clima sobre el desempeño de la refrigeración artificial de granos.	52
9. Influencia del clima en el consumo de energía.....	53
CAPÍTULO VI:	
ASPECTOS ECONÓMICOS	54
1. ¿Cuánto cuesta enfriar artificialmente un silo?.....	55
2. Experiencias de refrigeración artificial de granos en Argentina.....	56
CAPÍTULO VII:	
EVOLUCIÓN DE LOS EQUIPOS: Propuestas técnicas para fabricantes de equipos refrigeradores de granos.....	58
1. Monitoreo de la temperatura del aire que ingresa al silo.....	59
2. Uso de sensores localizados en la entrada del aire al silo.....	60
3. Adecuaciones del equipo refrigerador para el funcionamiento a baja temperatura ambiente.....	60
4. El equipo refrigerador inteligente y al servicio del operario de la planta de acopio.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	63

La humedad y la temperatura son los factores que más afectan la calidad de los granos y el tiempo que pueden ser almacenados sin sufrir pérdidas. Si la humedad y la temperatura son elevadas, la actividad biológica del grano y los organismos que lo acompañan (hongos, bacterias e insectos) aumentan, provocando disminución de la calidad y viabilidad de las semillas, incremento de la pérdida de materia seca de los granos y, por lo tanto, una reducción del tiempo de almacenamiento seguro.

Dado que los hongos son los principales causantes de daño y debido a su alta sensibilidad a la disponibilidad de agua, el secado de los granos, es la principal herramienta para su preservación. Al reducir el agua disponible los hongos asociados al grano no pueden desarrollarse y dañar el grano.

Una vez que el grano está seco el segundo factor para controlar es la temperatura. Enfriar los granos minimiza el desarrollo de insectos plaga de los granos almacenados y genera condiciones inadecuadas para el desarrollo de hongos. Normalmente los granos se enfrían y se mantienen fríos utilizando sistemas de aireación forzada con aire ambiente. Cuando las condiciones climáticas lo permiten, es una técnica muy eficiente de conservación recomendada en el marco de las buenas prácticas en la poscosecha de granos. Sin embargo, esta técnica es muy dependiente del clima, lo que limita su eficacia en zonas o épocas del año con alta temperatura ambiente. En estos casos la alternativa es superar las limitaciones climáticas acondicionando el aire ambiente artificialmente.

En este sentido, la refrigeración artificial consiste en el enfriamiento de los granos usando un equipo refrigerador para acondicionar artificialmente el aire ambiente, entregándolo al granel a una menor temperatura, a expensas de un consumo eléctrico. Algunos equipos, además de la temperatura, permiten controlar la humedad relativa del aire para evitar el rehumedecimiento o sobrecado de parte de la masa de granos durante el proceso de refrigeración.

La utilización de los equipos de refrigeración permite insuflar aire frío al silo en un rango acotado de temperatura evitando las oscilaciones de la temperatura ambiente en el exterior de la estructura de almacenamiento de los granos.

El objetivo del presente manual es recopilar y ordenar la información técnica generada y disponible sobre la refrigeración artificial de granos en la poscosecha. La temática se aborda en siete capítulos, a través de conceptos teóricos y prácticos basados en las experiencias desarrolladas en Argentina. Se incorporan ilustraciones y fotografías inéditas. Además, se incluye bibliografía para que el lector pueda profundizar en el tema y se brindan propuestas de diseño para colaborar en la evolución técnica y aumento de la eficiencia de funcionamiento de los equipos refrigeradores de granos.



CAPÍTULO I: HISTORIA Y FUNDAMENTOS

1. Pasado y contexto actual de la refrigeración artificial de granos

De acuerdo a Reimann (1927), la idea de enfriar artificialmente el grano fue propuesta por primera vez por un ingeniero alemán en el año 1917, pero sin embargo parecía impracticable y costoso para la época. En Francia, en el año 1950 un técnico de apellido Leroy ideó un equipo de refrigeración que simultáneamente podía secar el grano de 20 % a 16 % de humedad. Posteriormente, ya en 1958, la firma alemana Escher-Wyss (adquirida posteriormente por Sulzer) vendió el primer equipo de secado con aire frío. Seguidamente, en 1963, la compañía Sulzer comienza la producción comercial de equipos destinados exclusivamente a la refrigeración de granos con el nombre comercial Granifrigor (Figura 1).

Estos equipos estaban destinados a preservar la calidad del grano húmedo mediante la reducción de su temperatura después de las cosechas. Dado que en aquella época era limitada la capacidad de las secadoras, el incremento de la capacidad de trilla necesitaba de un método alternativo para preservar la calidad del grano.

En el año 1992 (Maier y Bakker-Arkema, 1992), se reportó que la tecnología de refrigeración había sido exitosamente utilizada en más de 50 países durante los últimos 30 años, con una capacidad anual de refrigeración de más de 20 millones de toneladas de granos. Una década después, Maier y Navarro (2002) estimaron que más de 80 millones de toneladas se enfriaban anualmente en todo el mundo, empleando sistemas de refrigeración artificial de granos.

En Argentina en el año 1983, se documentó un ensayo de refrigeración de 400 t de semilla de girasol a una temperatura promedio final de 16,5 °C. Después de 9 meses, la acidez del girasol permaneció en los valores iniciales de 1,3 % y el ensayo concluyó que la principal ventaja de refrigerar fue la mejora de la calidad del aceite procesado (Maier y Navarro, 2002). Un reporte de difusión del año 1994 de INTA Pergamino (De Dios, 1994) menciona un consumo de energía de 7 kW por tonelada refrigerada. Diez años más tarde, Gornatti y Apro (2004) realizaron ensayos utilizando silos con trigo y maíz y concluyeron que la tecnología de refrigeración brinda ventajas técnicas sobre la aireación tradicional, pero sin realizar un análisis económico de la tecnología.

Posteriormente Roskopf *et al.* (2009) realizaron un ensayo de refrigeración de 2500 t de maíz y reportaron un consumo específico de energía de 3,34 kWh.t⁻¹. Al año siguiente se documentó un ensayo de refrigeración artificial en un silo con 1200 t de maíz, desde una temperatura inicial de 24,3 °C a una temperatura final de 13,8 °C, siendo el consumo específico de energía de 2,6 kWh.t⁻¹ (Roskopf y Bartosik, 2010). Los mismos autores en el año 2011 ensayaron la técnica sobre un silo con 1000 t de

trigo, con una temperatura inicial del grano de 24,4 C y final de 15,6 °C, siendo el consumo específico de 4,1 kWh.t⁻¹. Posteriormente Roskopf *et al.* (2015) reportaron un consumo específico de 4 kWh.t⁻¹ al enfriar y disminuir 7,2 C la temperatura promedio de un silo con 1238 t de trigo, en condiciones de elevada temperatura ambiente durante los días de refrigeración.

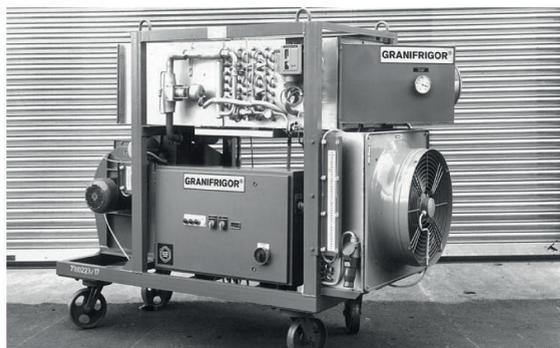


Figura 1.
Primer equipo de refrigeración de granos de principios de la década de 1960.



Planta de producción de equipos refrigeradores de granos en la década de 1970.

En los últimos años la refrigeración artificial de granos en Argentina ha retomado impulso, causado por la mejora tecnológica de los equipos, con mayor eficiencia energética, y el corrimiento de la frontera agrícola a zonas de temperatura más elevadas (noroeste argentino) donde el uso de estos equipos constituye una herramienta indispensable.

Otro aspecto importante es la creciente presión del consumidor por la seguridad alimentaria. Así el sector de la poscosecha de granos necesita de nuevas tecnologías que sean limpias, inocuas, amigables con el medioambiente y viables económicamente. De modo que reduzcan el uso de insecticidas y pérdidas de calidad, proporcionando granos saludables para la alimentación humana y animal.

En Argentina se comercializan equipos nacionales e importados con una capacidad de refrigeración que varía desde menos de 100 a más de 700 t grano.día⁻¹. Los

principales granos que son enfriados mediante esta tecnología son trigo, soja, maíz, cebada, girasol y arroz.

2. Calidad, pérdida de materia seca y tiempo de almacenamiento seguro

Por una parte, la calidad de los granos está definida por diferentes propiedades que le dan valor de acuerdo con su transformación y uso final: contenido de proteína y aceite, acidez, contenido de granos dañados, calidad panadera, entre otros. La industria y los consumidores exigen a los proveedores que los granos cumplan con diferentes niveles de estos parámetros, de acuerdo a la especie y al uso final, mediante contratos específicos. Por otro parte, existe una norma de comercialización que define estándares de calidad generales mínimos para comercializar cada grano, definiendo la calidad comercial de estos (SAGPYA, 1994).

La pérdida de materia seca (PMS) consiste en la pérdida de peso de un grano o lote de granos a humedad constante. Es un indicador de la pérdida de calidad, dado que la pérdida de materia seca está asociada al consumo de materia orgánica del grano por procesos respiratorios del propio grano, microorganismos e insectos. Para la mayoría de los granos commodities, una PMS del 0,5 % está asociado a una alteración de la calidad que determina la pérdida de una condición de grado al momento de la comercialización del grano. Por ejemplo, si un lote de maíz que de acuerdo a la norma de comercialización es grado 2, sufre una PMS de más del 0,5 %, perderá una condición de grado (por la pérdida de calidad) y será grado 3.

El tiempo de almacenamiento seguro (TAS) es el tiempo máximo que el grano puede ser almacenado, a determinadas condiciones de temperatura y humedad, sin disminuir su calidad comercial.

3. Efecto de la temperatura sobre los hongos y el TAS

La temperatura afecta la tasa respiratoria de los granos y los hongos asociados afectando a su vez la conservación de la calidad. Los hongos pueden desarrollarse a temperaturas muy bajas, sin embargo, su rango óptimo de crecimiento está entre 20 °C y 35 °C. Por debajo de estas temperaturas, su velocidad de crecimiento se reduce retrasando la pérdida de calidad del grano. Cuanto más baja sea la temperatura de almacenamiento, más prolongado podrá ser el tiempo de almacenaje seguro (sin pérdida de calidad). Por ejemplo, cuando la temperatura de los granos de maíz con 15 % de humedad disminuye de 25 °C a 15 °C, el TAS aumenta hasta tres veces (Tabla 1).

Temperatura del grano (°C)	Humedad del grano (%)						
	12	13	14	15	16	17	18
0	40957	13764	5648	2702	1458	866	557
5	19757	6640	2724	1303	703	418	269
10	9531	3203	1314	629	339	202	130
15	4598	1545	634	303	164	97	62
20	2666	896	368	176	95	56	36
25	1582	532	218	104	56	33	21
30	938	315	129	62	33	20	13
35	557	187	77	37	20	12	8
40	330	111	46	22	12	7	4

Temperatura del grano (°C)	Humedad del grano (%)						
	19	20	21	22	23	24	25
0	381	275	208	163	132	110	93
5	184	133	100	79	64	53	45
10	89	64	48	38	31	26	22
15	43	31	23	18	15	12	10
20	25	19	15	12	10	8	7
25	15	11	9	8	6	6	5
30	9	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
35	5	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
40	3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3

Tabla 1. Tiempo de almacenamiento seguro en días para maíz bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad.

El TAS es diferente para cada grano almacenado y es un indicador del tiempo de almacenamiento por lo que no debe tomarse como un valor absoluto.

Siempre que el grano es almacenado húmedo los microorganismos estarán activos y en algún momento afectarán la calidad del grano. La recomendación es que el almacenamiento de grano húmedo sea temporario. El grano se debe secar para su almacenamiento definitivo y prolongado.

4. Efecto de la temperatura sobre los insectos de los granos almacenados

Los insectos se alimentan directamente de los granos provocando la reducción del peso y aumentando el contenido de granos dañados. También disminuyen su calidad por el mal aspecto, olor, color o sabor que les imparten, volviéndolos

inaceptables para el consumo humano.

Los insectos que infestan los granos son sensibles a la temperatura. Entre 25 °C y 32 °C su desarrollo es óptimo, se multiplican rápidamente, se mueven y alimentan vigorosamente. Entre 17 y 25°C la mayoría de las especies de insectos disminuye drásticamente su actividad y el desarrollo de estos es bajo o nulo a temperaturas por debajo de 17 °C. Por esto la principal estrategia para minimizar las pérdidas por insectos, en el marco de un control integrado de plagas, es disminuir la temperatura del grano almacenado tanto como sea posible. Por debajo de la temperatura óptima de desarrollo de los insectos en primera instancia, y por debajo de los 17 °C en segunda instancia.

En Argentina, debido a que los granos por norma deben comercializarse libre de insectos vivos y por la falta de implementación de buenas prácticas de manejo de granos en poscosecha, se abusa del uso de insecticidas, tanto preventivos como curativos. Esto trae aparejados excesos de residuos en los granos, con consecuencias potencialmente negativas para la salud de los consumidores y la comercialización. La prohibición del uso de diclorvos (DDVP), a partir de noviembre del 2018, obligó a replantearse la implementación de programas de control integrado de plagas. En este sentido, tanto la refrigeración artificial como la aireación son herramientas fundamentales para disminuir los daños ocasionados por los insectos sobre los granos, sin comprometer su inocuidad.

5. Aireación con aire natural

La aireación es un método de enfriamiento de los granos en donde se utiliza el aire ambiente. A través del uso de ventiladores y conductos instalados en el silo, el aire es obligado a pasar por entre los granos. En este proceso, siempre que el aire esté más frío que los granos, se transferirá calor de estos al aire para luego ser expulsado al exterior lo que disminuirá paulatinamente la temperatura de los granos. El objetivo es reducir la temperatura del grano a la más baja posible, en un tiempo de aireación razonable en función del costo y del riesgo de ataque de insectos. La temperatura objetivo depende entonces de la época del año y la región geográfica. Así, por ejemplo, en el sur de Argentina, la temperatura del grano que podrá alcanzarse será menor respecto de la región centro-norte.

6. Limitaciones de la aireación con aire natural

En condiciones climáticas de elevadas temperaturas ambiente, la aireación no permite enfriar el grano para un almacenamiento seguro. Tales temperaturas ocurren en regiones productivas del centro-norte de Argentina durante el verano y parte del

otoño. En esta época del año los valores diarios de temperaturas son muy elevados, inclusive de noche, con lo que la aireación tradicional se utiliza muy poco o no se puede utilizar. Usando aireación y seleccionando las horas más frías de los días mediante un controlador puede esperarse enfriar el granel levemente por debajo de la temperatura promedio de la localidad en la época del año correspondiente. Por un lado, a modo de ejemplo, un trigo cosechado en Paraná (Entre Ríos) a fines de noviembre se podrá enfriar a 17 °C con aireación recién en marzo (Figura 2). Por otro lado, en el norte del país, por ejemplo en Presidencia Roque Sáenz Peña (Chaco) un trigo cosechado a fines de octubre se podrá enfriar a 17 °C recién en el mes de abril. Dicho de otra forma, únicamente en el periodo abril-septiembre sería posible enfriar el grano hasta 17 °C o menos, mediante aireación. El resto del año (6 meses), para enfriar hasta 17 °C o menos debería utilizarse refrigeración artificial.

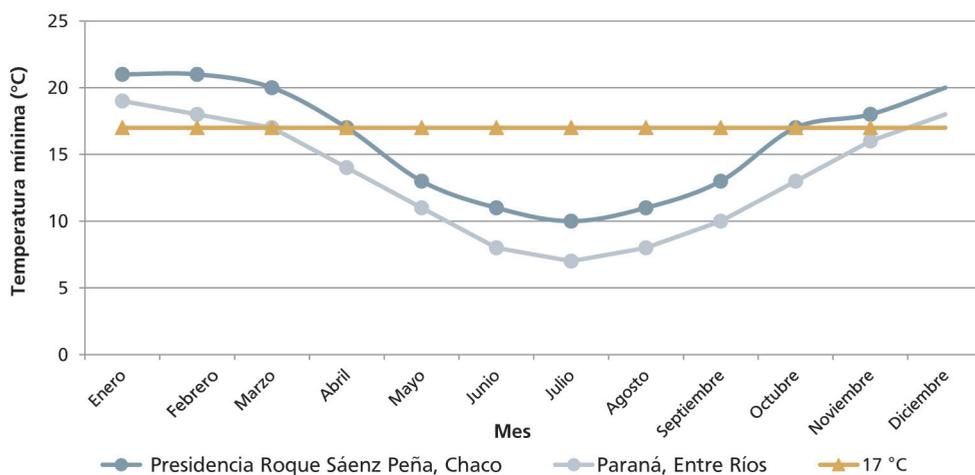


Figura 2. Temperatura ambiente mínima en las localidades de Paraná (Entre Ríos) y Presidencia Roque Sáenz Peña (Chaco). Serie histórica 1981 a 2010 del servicio meteorológico nacional.

7. El proceso de enfriamiento artificial de los granos: el ciclo de refrigeración

Al conectar un equipo refrigerador a los conductos de aireación e insuflar aire acondicionado se conforma un sistema de aireación de presión positiva, es decir, con un flujo ascendente de aire a través de la masa de granos. Este flujo de aire genera a su vez un frente de enfriado en el silo que avanza en el sentido de circulación del aire (de abajo hacia arriba). La capa más cercana a la base del silo será la primera en enfriarse, mientras que la capa cercana a la superficie del granel será la última en enfriarse.

Veamos con mayor detalle como ocurre el proceso de refrigeración. Al refrigerar un silo lleno de grano caliente, apenas se encienda el equipo refrigerador, el aire comienza a circular por el silo a través del espacio entre los granos y sale por las aberturas del techo. Luego de transcurrido cierto tiempo con el equipo encendido, quedarán delimitadas tres zonas diferentes en el granel (Figura 3):

1. La zona inferior, en la cual el aire ya enfrió al grano y ambos se encontrarán en equilibrio a la temperatura a la que ingresa el aire al silo; por ello, el aire que atraviesa esta capa de grano no sufre modificaciones importantes en su temperatura.

2. La zona de transición, en donde el grano y el aire intercambian calor. En esta capa el grano se encuentra más caliente que el aire refrigerado, de modo que, al circular por el espacio poroso entre los granos, el aire toma calor del grano y lo enfría. Simultáneamente, todo el calor que pierde el grano es absorbido por el aire, calentándose a medida que avanza en dirección ascendente.

3. En un momento dado, el aire habrá tomado todo el calor posible y entrará en equilibrio con la temperatura del grano que aún se encuentra caliente en la parte superior del granel, delimitándose una zona superior. Como la temperatura del aire y del grano ya se ha igualado, el aire ya no puede enfriar más al grano a su paso, por mayor que sea el recorrido del aire en esta tercera zona.

El proceso de refrigeración debe continuarse hasta que el frente de enfriado o la zona de transición salgan del granel por la parte superior. De esta manera se garantiza que la totalidad de la masa de granos ha sido enfriada. Cuando esto ocurre puede decirse que se ha completado un ciclo de refrigeración.

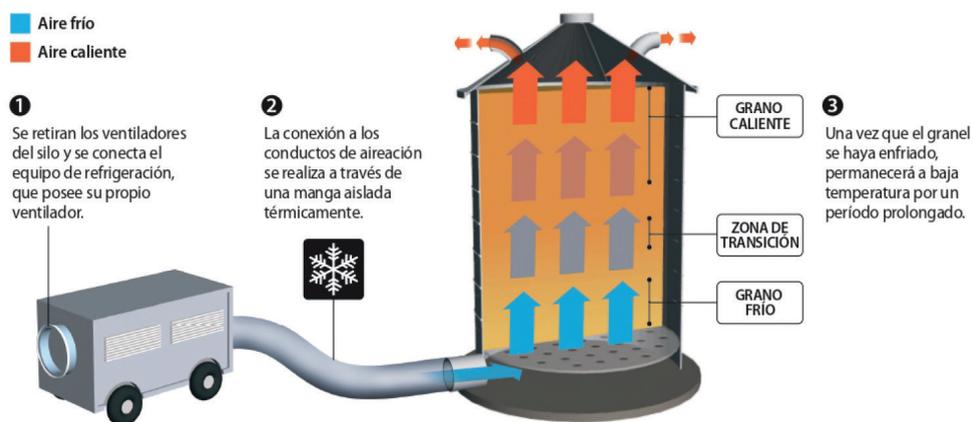


Figura 3. Esquema de conexión de un equipo refrigerador a un silo. Fuente: Abadía y Bartosik (2013).

8. El caudal específico

El caudal específico indica el volumen de aire que recibe una tonelada de grano por minuto y tiene gran importancia práctica ya que nos permite estimar la duración del ciclo de refrigeración.

Ecuación 1 $Q_e=Q/t$

Q_e : Caudal específico ($m^3 \cdot min^{-1} \cdot t^{-1}$)

Q : Caudal ventilador ($m^3 \cdot min^{-1}$)

t : toneladas de grano almacenado

Por ejemplo: un refrigerador de granos, que de acuerdo a las especificaciones del fabricante, entrega un caudal de aire promedio de $13000 m^3 \cdot h^{-1}$ o $216,6 m^3 \cdot min^{-1}$ de acuerdo a la Ecuación 1, este equipo conectado a un silo con 1000 t de grano logrará un caudal específico por tonelada de grano de $0,216 m^3 \cdot min^{-1}$.

Ahora bien, si el mismo equipo de frío es conectado a un silo de mayores dimensiones y con una capacidad de 2000 t de grano, el caudal específico se reduce a la mitad, bajando a $0,108 m^3 \cdot min^{-1} \cdot t^{-1}$.

Los equipos refrigeradores se fabrican a distinta escala, con capacidad de entrega de bajos caudales de aire para silos pequeños o de altos caudales para estructuras de almacenaje mayores. Además, están equipados con ventiladores centrífugos de caudal variable para adaptar la cantidad de aire para refrigerar a la capacidad de enfriamiento del equipo, en función de la temperatura objetivo y la temperatura ambiente, por lo que a menor temperatura objetivo o mayor temperatura ambiente, menor será el caudal del equipo. El caudal también varía de acuerdo a la resistencia que debe vencer (presión estática) generada por el tipo de grano (por ejemplo, el trigo ofrece mayor resistencia que el maíz), la presencia de partículas finas y la altura de la columna de granos. Esta relación entre caudal y presión estática es específica de cada ventilador y se grafica como una curva presión vs. caudal.

Esto hace que el caudal específico sea particular para cada caso de acuerdo a las condiciones climáticas, al tamaño del equipo y el grano para refrigerar (cantidad, tipo, limpieza).

9. Caudal específico recomendado para enfriar

Granos secos: el enfriamiento de granos secos (contenido de humedad igual o menor a la humedad de recibo) no tiene limitaciones (razonable) de tiempo dado

que el grano está en una condición segura con respecto al desarrollo de hongos (excepto el girasol, cuya humedad segura es igual o inferior a 8 %) y el refrigerador puede insuflar 24 h al día si se desea. En este caso un caudal específico de entre 0,05 y 0,1 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ puede considerarse adecuado (ver capítulo V, sección 7, Refrigeración de granos secos).

Granos húmedos: el grano húmedo, con 2 puntos por encima de la humedad de recibo, debe ser rápidamente enfriado para limitar el desarrollo de hongos por lo que el caudal específico mínimo necesario es 0,1 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ (ver capítulo V, sección 4, Refrigeración de granos húmedos).

10. Duración del ciclo de refrigeración

Por una parte, la duración del ciclo de refrigeración (medida en horas de funcionamiento del equipo de frío) depende de la velocidad de avance del frente de enfriado que a su vez depende del caudal específico. A mayor caudal específico, el ciclo de refrigeración se completará más rápidamente.

Para estimar de forma práctica la duración del ciclo de refrigeración puede utilizarse una fórmula muy sencilla a partir del caudal específico.

Ecuación 2 **CR=16,5/Qe**

CR: Ciclo de refrigeración (h)
Qe: Caudal específico ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$)

Siguiendo el ejemplo anterior, si el caudal específico cuando se refrigeran 1000 t de granos es de 0,216 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$, el ciclo de refrigeración será de aproximadamente 76 h de funcionamiento del equipo para enfriar todo el grano.

Por otra parte, es de destacar que las horas de funcionamiento del refrigerador son acumulativas. Tomando los datos anteriores, el ciclo de refrigeración puede completarse haciendo funcionar el refrigerador durante 76 h corridas o interrumpidas (por ejemplo, funcionando solamente de noche) hasta sumar las 76 h de funcionamiento. En este último ejemplo, el tiempo total transcurrido hasta que el grano finalmente se enfríe será mayor (76 h de funcionamiento más las horas que el equipo estuvo apagado).

11. ¿Cuándo está frío todo el grano?

Para saber cuándo terminó el ciclo de refrigeración se debe medir la temperatura de la capa de grano más alejada de la zona de entrada del aire al silo, es decir, la capa de granos superior, 30 a 50 cm por debajo de la superficie. Con grano húmedo es de esperar que esta capa de grano alcance la misma temperatura que el aire de entrada. Si

el grano está seco, el ciclo de refrigeración se puede dar por finalizado cuando esta capa alcanza una temperatura entre 1 y 3 °C superior a la del aire de entrada. Si se pretende enfriar a la misma temperatura la última capa de granos, el consumo total de energía podría elevarse notablemente, por lo que será mayor la energía consumida para enfriar los últimos cm de granos respecto al total almacenado en el silo.

Esta forma de enfriamiento “por capas” permite que no deba esperarse a que el silo esté lleno para refrigerarlo, el ciclo de refrigeración puede comenzar cuando el grano haya cubierto los sistemas de distribución de aire del silo y tenga unos pocos metros de altura. Posteriormente se puede agregar grano “caliente” hasta completar el llenado del silo. Esta recomendación es especialmente importante para los casos en los que el llenado del silo requiera varios días.

Debemos hacer notar que en caso de refrigerar durante un tiempo menor al de un ciclo de refrigeración, no se enfriará adecuadamente toda la masa de granos. Por el contrario, solo se logrará enfriar la capa inferior de granos (por debajo del frente de enfriado), manteniéndose el resto de la masa de granos a la temperatura inicial.

12. Otros factores que afectan la duración del ciclo de refrigeración

Existen otros factores que, en menor medida, influyen en la duración del ciclo de refrigeración:

La cantidad y distribución del material fino: a mayor cantidad de material fino, más difícil le resulta al aire atravesar el granel, disminuyendo el caudal específico y prolongando el ciclo de refrigeración. A su vez, la disposición de los finos en el centro del silo disminuye el caudal de aire y movimiento del frente de enfriado en dicha zona. Si, por ejemplo, en el corazón del silo se tiene un 30 % menos de caudal de aire que en el resto de la masa de granos, se tardará un 30 % más para completar el ciclo de refrigeración en todo el silo, perdiendo eficiencia y aumentando el consumo de energía.

El sistema de distribución del aire: un buen sistema de distribución de aire garantiza que el frente de enfriado avance de manera uniforme por todo el granel. De lo contrario, el ciclo de refrigeración finaliza solo cuando el frente de enfriado alcanza la capa superior de granos.

La temperatura inicial de los granos: a medida que la diferencia entre la temperatura inicial del grano y la temperatura objetivo sea mayor, la duración del ciclo de refrigeración se extenderá.



CAPÍTULO II: APLICACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN ARTIFICIAL DE GRANOS

Aplicación del equipo de refrigeración artificial de granos

1. Componentes

El equipo refrigerador de granos está compuesto por: compresor, evaporador, válvula de expansión, paneles y ventiladores del condensador, recalentador (no siempre presente), ventilador centrífugo de aire, paneles de entrada y filtrado de aire, microprocesador, tablero de comando y controladores (Figura 4).

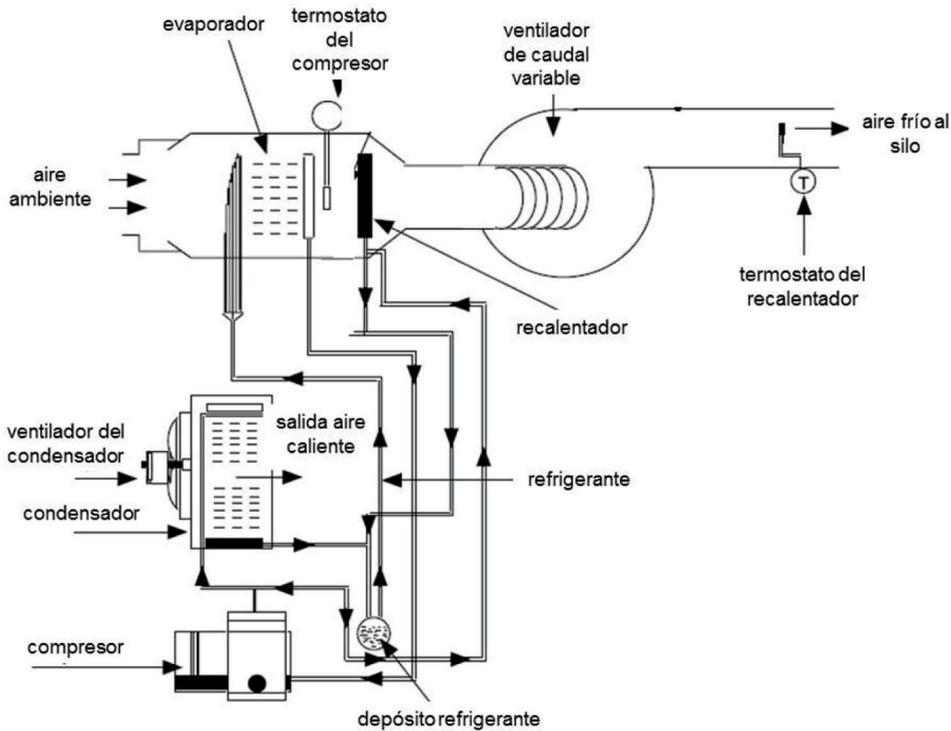


Figura 4. Esquema de los componentes de un equipo refrigerador. Fuente: Maier y Navarro (2002).

Los diferentes diseños de cada fabricante hacen que el ventilador de caudal variable pueda ubicarse antes del evaporador o después del evaporador (entre el recalentador y la boca de salida del aire) como el diseño que se muestra en la Figura 4. En la mayoría de los casos el equipo es móvil, montado sobre chasis y ruedas para facilitar su desplazamiento dentro de la planta de silos, pero también puede ser fijo tal como en equipos más pequeños de uso en plantas de procesamiento de semillas.

2. Funcionamiento

En el ciclo de refrigeración, el compresor comprime el gas refrigerante aumentando su temperatura y obligándolo a pasar por el condensador. Allí los ventiladores impulsan una corriente de aire a través de las aletas de los tubos del condensador permitiendo el rápido intercambio térmico entre el gas refrigerante caliente y el aire. En este proceso se remueve el calor latente de condensación con lo cual el gas cambia a su fase líquida. Posteriormente el líquido refrigerante pasa por la válvula de expansión que mediante un orificio autoajustable regula el caudal de paso disminuyendo la presión en el evaporador. Esto provoca el cambio de estado del refrigerante, de líquido a gas, absorbiendo energía en forma de calor de su alrededor por lo que baja la temperatura del aire ambiente que, impulsado por el ventilador de caudal variable, es obligado a pasar por los conductos del evaporador para enfriarse y posteriormente ingresar al silo a baja temperatura. El aire enfriado tiene una humedad relativa muy alta, lo que ocasionaría el incremento de humedad de las capas inferiores del grano. Para evitarlo, algunos equipos, reducen la humedad relativa del aire incrementando en unos pocos grados su temperatura a través del calor de compresión y fricción generado por el ventilador, sin que existan controladores específicos para tal fin. En equipos con capacidad para controlar la humedad relativa, el aire antes de ser insuflado al silo es levemente recalentado de manera controlada para reducir la humedad a los valores requeridos por el operador. Para ello, parte del calor generado en el condensador es derivado para el calentamiento del aire. Integralmente el funcionamiento del refrigerador es controlado por un microprocesador que realiza los ajustes necesarios para insuflar el aire en las condiciones establecidas por el operario.

Todo el proceso de refrigeración se realiza a expensas del consumo de energía eléctrica para alimentar principalmente el o los compresores, el o los ventiladores del condensador y el ventilador de caudal variable que impulsa el aire hacia el silo.

3. Mantenimiento del equipo de frío

Usualmente el equipo de frío funciona en un ambiente polvoriento como consecuencia del movimiento de los granos y camiones en la planta de acopio. Por lo tanto, el refrigerador debe tener un filtro de aire eficiente para prevenir el depósito del polvo y todo material fino sobre los tubos del evaporador y radiadores del condensador. Este polvo puede producir la pérdida de la capacidad de refrigeración y en casos más graves, la obstrucción parcial del pasaje de aire a través del equipo. Además, la obstrucción de los filtros produciría el aumento de la presión de succión del ventilador disminuyendo el caudal de entrega de aire. Para evitar estos serios inconvenientes se

deben limpiar periódicamente los filtros lavándolos con agua para eliminar cualquier depósito (Figura 5). El lavado con manguera y cepillo de cerda facilita la operación.

También, debe revisarse la carga total del gas refrigerante, la presión de trabajo en el circuito y la correcta apertura de la válvula de expansión, entre otras verificaciones. Sin embargo, estas adecuaciones las debe realizar habitualmente el técnico del proveedor del equipo refrigerador que conoce los valores para su funcionamiento óptimo.



Figura 5.
Condensadores del refrigerador con depósito de tierra que disminuye su eficiencia de funcionamiento.



Limpieza de los filtros de aire y evaporador de un equipo refrigerador de granos.

4. Conexión del equipo de frío a silos

Desde el punto de vista operativo, el equipo se conecta al silo retirando los aireadores de este y conectando, en su lugar, una manga aislada térmicamente que insufla el aire frío del equipo (Figura 6).



Figura 6.
Conexión del equipo de frío a un silo.

Cuando el silo tiene más de un ventilador es importante que el equipo se conecte a todas las bocas de aireación. Para ello se puede utilizar un derivador que permita dividir el conducto principal proveniente del equipo, en tantos conductos secundarios como ventiladores tenga el silo (Figura 7). De esta manera el ingreso de aire frío al silo se realiza por todas las bocas de aireación haciendo más uniforme la distribución del aire dentro del silo. Si esto no se realiza, el aire que ingresa al silo proveniente del equipo podría salir por la boca de aireación sin conexión con el equipo refrigerador. Esto ocurriría porque el aire realiza el recorrido de salida al exterior por la vía que oponga menor resistencia. En este caso, se enfriaría solamente la porción de grano inferior y nunca las capas intermedias y superiores. Si no puede insuflarse el aire por todas las bocas de aireación, deben sellarse los aireadores sin conexión con el equipo de frío. Pero en este caso, el enfriamiento del grano dentro del silo probablemente no sea uniforme a consecuencia de una mala distribución del aire, por lo que no es recomendable.

Durante el enfriamiento del grano, la temperatura de entrada del aire frío al silo se debe mantener constante, o a lo sumo puede disminuir, pero nunca elevarse, porque produciría el calentamiento de las capas de grano ya enfriadas.



Figura 7.
Conexión del equipo de frío a las 2 bocas de aireación de un silo.

El equipo de frío permite conectarlo a más de un silo y enfriarlos simultáneamente (Figura 8). Cada silo puede tener almacenado distinto tipo y cantidad de grano por lo que se debe monitorear la temperatura de cada uno por separado. Se recomienda insuflar el aire a la humedad relativa (HR) en equilibrio con el grano más seco de los almacenados y cuando uno de los silos complete el ciclo de refrigeración, se debe cerrar el paso de aire al silo ya enfriado. Para esto son útiles las compuertas de cierre rápido intercaladas en los conductos (Figura 9).



Figura 8.
Conexión para el enfriamiento en simultáneo de dos silos.



Figura 9.
Compuerta para el cierre rápido del paso de aire al silo.

5. Conexión del equipo de frío a una cámara de almacenamiento

El equipo de frío utilizado para refrigerar los granos en un silo también puede utilizarse para refrigerar una cámara o galpón de almacenamiento de semillas (Figura 10). En este caso para aumentar la eficiencia de funcionamiento se modifica la estructura de conexión para recircular el aire ya frío proveniente de la cámara. Esto evita tomar el aire caliente del ambiente y disminuir el consumo eléctrico.

Este uso doble propósito del equipo refrigerador permite, por ejemplo, refrigerar semillas almacenadas en silos que luego son embolsadas y almacenadas en una cámara acondicionada a baja temperatura por el mismo equipo de frío.



Figura 10.
Equipo de refrigeración conectado a una cámara de semillas.

6. Programación del equipo de frío

El operario debe introducir en la pantalla de programación del equipo la temperatura de entrega del aire frío (Figura 11). En los equipos que lo permitan, el operario también debe ingresar la HR deseada para, en función de la humedad de los granos almacenados, evitar cambiar su contenido de humedad (ver Capítulo II, sección 11 y Capítulo V, sección 9).



Figura 11.
Panel de monitoreo y programación de la temperatura y humedad relativa del equipo refrigerador.

7. Medición del caudal específico

Esta metodología utiliza elementos que fácilmente se pueden fabricar en cualquier planta de acopio y no requiere la compra de instrumentos sofisticados para medición.

Materiales necesarios:

1. Curva de presión-caudal del ventilador del equipo de refrigeración.
2. Manómetro diferencial.

Procedimiento:

Medir la presión estática en la transición de ingreso del aire frío al silo usando un manómetro diferencial electrónico, de aguja o de columna de agua (Figura 12). Junto con cada medición de presión estática, deben registrarse las condiciones de funcionamiento del ventilador según lo permita cada equipo refrigerador. Por ejemplo, en algunos modelos puede visualizarse el porcentaje de revoluciones por minuto (rpm) de funcionamiento del ventilador en el tablero de control del equipo.



Figura 12.
Medición de la presión estática en la transición de ingreso de aire al silo con manómetro diferencial de columna de agua.

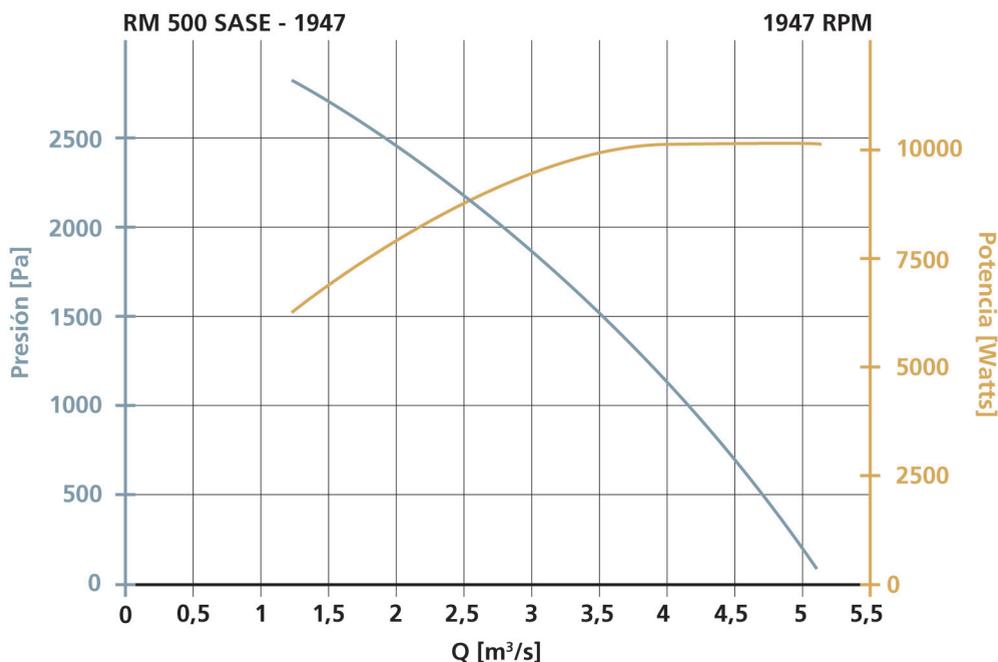
Con el valor de presión estática medida se ingresa a la curva de presión/caudal del ventilador del equipo de frío, proporcionada por el fabricante (Figura 13), y para una determinada condición de funcionamiento (rpm) se obtiene el caudal ofrecido por el ventilador ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

El siguiente ejemplo está basado en la medición de la presión estática y las rpm del ventilador:

- Condiciones ambientales: 31 °C y 52,7 % de humedad relativa.
- Presión de manómetro diferencial: 17 cm de columna de agua, lo que equivale a 1680 Pa.
- Ventilador funcionando al 66 % de su capacidad máxima de 2950 rpm, es decir, 1947 rpm.

Para obtener el caudal, primero se seleccionan las rpm del ventilador (en este caso 1947 rpm) para ajustar la curva, y luego entrando en el gráfico por el eje de ordenadas (Pa) se interseca la curva y se obtiene en el eje de abscisas el valor de $3,28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de caudal que entrega el equipo de frío en ese momento (Figura 13). Si multiplicamos este valor por $60 \text{ s} \cdot \text{min}^{-1}$ obtenemos el caudal de $196,8 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Con la Ecuación 1 obtenemos que el caudal específico es de $0,196 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ ($196,8 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ dividido 1000 t).

Dado que el equipo modifica su caudal de acuerdo a las condiciones ambientales de temperatura y humedad, estas mediciones de presión estática deben hacerse en distintos momentos del día, idealmente cada tres o cuatro horas. A mayor cantidad de mediciones realizadas, más representativo será el promedio de caudal específico calculado para cada silo.



PRESTACIONES	PARÁMETROS	LEYENDA
$Q= 3,28 \text{ m}^3/\text{s}$ $Pe = 1683,41 \text{ Pa}$ $N= 9708,46 \text{ Watts}$ $N= 13,02 \text{ HP}$ $As= 0,1775 \text{ m}^2$ $Vs= 13,7619 \text{ m/s}$ $Pd= 113,7282 \text{ Pa}$ $Pt= 1797,1372 \text{ Pa}$	Velocidad giro= 1947 RPM Temperatura= 15°C Altura= 0 m	<ul style="list-style-type: none"> ● $Pe =$ Presión estática [Pa] ● $N=$ Potencia [Watts] ● $Ps=$ Presión del sistema [Pa] ⊙ Punto de búsqueda $Q=$ Caudal [m^3/s] $As=$ Área de salida [m^2] $Vs=$ Velocidad de salida [m/s] $Pd=$ Presión dinámica [Pa] $Pt=$ Presión total [Pa]

Figura 13.
 Curva de presión-caudal del ventilador de un equipo de frío utilizado en un ensayo. Fuente: Gatti Ventilación (2015).

8. Metodología práctica para estimar la duración del ciclo de refrigeración

Se comentó anteriormente que el caudal de aire del equipo de frío se modifica principalmente de acuerdo a las condiciones climáticas. Adicionalmente, un mismo equipo puede utilizarse en un rango amplio de aplicaciones, por ejemplo, para refrigerar granos de tamaño grande que ofrecen menos resistencia al paso del aire como maíz o soja, o granos pequeños como sorgo, con mayor resistencia al paso del aire (mayor presión estática). En cada caso, el caudal de entrega de aire del equipo de frío puede ser diferente. Estos aspectos dificultan determinar el caudal específico de forma estandarizada para todas las situaciones de refrigeración de granos, y, por ende, el cálculo de la duración del ciclo de refrigeración.

Para solucionar este inconveniente y a los fines prácticos, los equipos son clasificados por los fabricantes según la cantidad de grano, en promedio, que pueden refrigerar en un periodo de 24 h (toneladas por día). Esta capacidad operativa es una guía aproximada para todos los granos y no está establecida para distintas temperaturas y humedades relativas del aire ambiente. Considera el funcionamiento del refrigerador durante toda la jornada, tanto durante el día (mayor temperatura ambiente) como de noche (menor temperatura ambiente). Así, por ejemplo, si un equipo tiene la capacidad de refrigerar 300 t por día tardará aproximadamente tres días y medio para refrigerar un silo de 1000 t.

Debemos apreciar que esta capacidad de refrigeración por día es una guía rápida para conocer el desempeño de un equipo de frío. Sin embargo, cuando las condiciones climáticas sean adversas (alta temperatura y humedad) o el tipo de grano a refrigerar ofrece una excesiva resistencia al paso del aire (granos pequeños) puede ocurrir que el

equipo disminuya su capacidad, refrigerando menos toneladas por día (para el ejemplo anterior será necesario más de tres días y medio). En contraparte, cuando las condiciones ambientales sean benignas (menor temperatura y humedad) la necesidad de acondicionamiento del aire es menor, con lo que el equipo incrementará su capacidad (para el ejemplo anterior será necesario menos de tres días y medio para refrigerar las 1000 t). Estas oscilaciones de la capacidad diaria de refrigeración son de aproximadamente $\pm 13\%$. Por ejemplo, si un equipo de frío tiene la capacidad promedio de refrigerar 300 t por día, su rango de variación en la capacidad de refrigeración será de entre 260 t y 340 t por día a consecuencia de cambios en las condiciones climáticas (funcionando en climas templados).

9. Elección de la capacidad del equipo refrigerador de granos

Un aspecto crítico, que debe tenerse en cuenta al momento de la elección de la capacidad operativa del equipo, es la relación entre el caudal de aire que entrega el refrigerador y la capacidad de los conductos del sistema de aireación ya instalados en la estructura de almacenaje. Los conductos de aireación conducen el aire desde el refrigerador hasta la masa de granos donde lo distribuyen de forma homogénea, por lo que es muy importante que sus dimensiones sean las adecuadas para el caudal de aire que entrega el refrigerador. Cuando el caudal del aire es mayor que la capacidad de los conductos de aireación, aumenta la presión estática provocando el calentamiento del aire y reduciendo el caudal específico, disminuyendo notablemente la eficiencia del proceso de refrigeración. Modificar los conductos de aireación es muy costoso por lo que constituye un factor limitante de la capacidad del equipo refrigerador al que pueden conectarse. En líneas generales, podemos decir que el aire dentro de los conductos no debe exceder la velocidad de $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para evitar el calentamiento y el aumento excesivo de la presión estática.

En instalaciones nuevas una opción es diseñar el sistema de aireación de acuerdo a las características y caudal de aire del equipo de refrigeración que será utilizado (Figura 14). Adicionalmente, para seleccionar la capacidad del equipo de frío necesariamente se debe tener en cuenta la cantidad de grano y el tiempo en el que se desea refrigerar. Supongamos que en una determinada planta de acopio se reciben unas 35000 t por año de cosecha gruesa y de ese total, se refrigera la mitad. Tomaremos como 45 días el tiempo promedio razonable (grano húmedo y grano seco) en que esperamos enfriar las 17500 t. Dividiendo las toneladas totales (17500) por el número de días (45) el resultado nos da que deberíamos tener un equipo con capacidad aproximada para refrigerar unas 390 t por día. Siempre será conveniente contar con un equipo con algo más de capacidad de la calculada porque durante el periodo de uso,

pueden ocurrir cortes de energía, o tiempos sin uso por mantenimiento, limpieza y traslados del refrigerador, entre otras causas, que pueden provocar la interrupción de la refrigeración.



Figura 14.
Conexiones fijas para acoplar el equipo refrigerador al silo con conductos de aireación previamente dimensionados.

10. Drenaje del agua condensada

Durante el funcionamiento del equipo de frío, el aire es enfriado hasta 5 o 7 °C, llegando al punto de saturación de humedad. Esto provoca que todo el contenido de humedad excedente del aire ambiente se condense en el evaporador. Esta agua, en estado líquido, es recolectada en una bandeja que escurrirá libremente al piso o puede instalarse un pequeño canal de drenaje (Figura 15). El caudal de agua condensada y liberada depende principalmente de la capacidad del equipo de frío y de la humedad relativa del ambiente. A modo orientativo, durante el funcionamiento de un equipo de 300 t por día de capacidad de refrigeración, se liberan entre 7 a 10 l de agua por hora. Considerando el tiempo total de funcionamiento del refrigerador en una planta de acopio, puede ocurrir que el volumen total de agua condensada sea importante y se considere necesario conectar una manguera para un drenaje adecuado.



Figura 15.
Escurrimiento del agua proveniente del refrigerador a través de un canal ya conformado.

11. El equipo refrigerador no es una secadora de granos

El aire frío proveniente del equipo refrigerador tiene baja capacidad de extraer agua por lo que el grano se enfriará a la temperatura buscada mucho antes de lo que pudiera secarse. Si se quisiera secar toda la masa de granos almacenada en el silo, se debería extender notablemente el funcionamiento del equipo refrigerador incurriendo en un alto consumo de energía.

Comparativamente, una secadora de granos utiliza aire con menos de 5 % HR (muy seco) mientras que un equipo refrigerador insufla aire con más de 55 % HR para enfriar los granos. Estos valores reflejan la baja capacidad relativa del aire proveniente del equipo de frío para secar granos.



CAPÍTULO III: COMPORTAMIENTO DE LOS GRANOS REFRIGERADOS

Comportamiento de los granos refrigerados

1. ¿Cuánto tiempo permanece frío el grano?

Los granos tienen muy baja conductibilidad térmica, por lo que una vez fríos la temperatura se mantendrá estable por un tiempo prolongado. Los factores que más afectan la duración de la baja temperatura de los granos son:

- **Humedad y temperatura:** si los granos están húmedos, los hongos asociados a estos se desarrollan consumiendo materia seca, liberando dióxido de carbono, agua y calor, mediante la respiración, iniciándose un círculo vicioso que beneficia el desarrollo de los hongos y el aumento paulatino de la temperatura de la masa de granos. Es decir que, si los granos están húmedos, permanecerán fríos menos tiempo que si estuvieran secos. Simultáneamente la temperatura de la masa de granos determina la velocidad de los procesos de respiración por lo que, a mayor temperatura, mayor será el incremento de temperatura y la PMS por respiración. En la Figura 16 se grafica el incremento de la PMS para un maíz almacenado con dos humedades, 14 % y 16 %, y una temperatura inicial de 15 °C, donde se observa

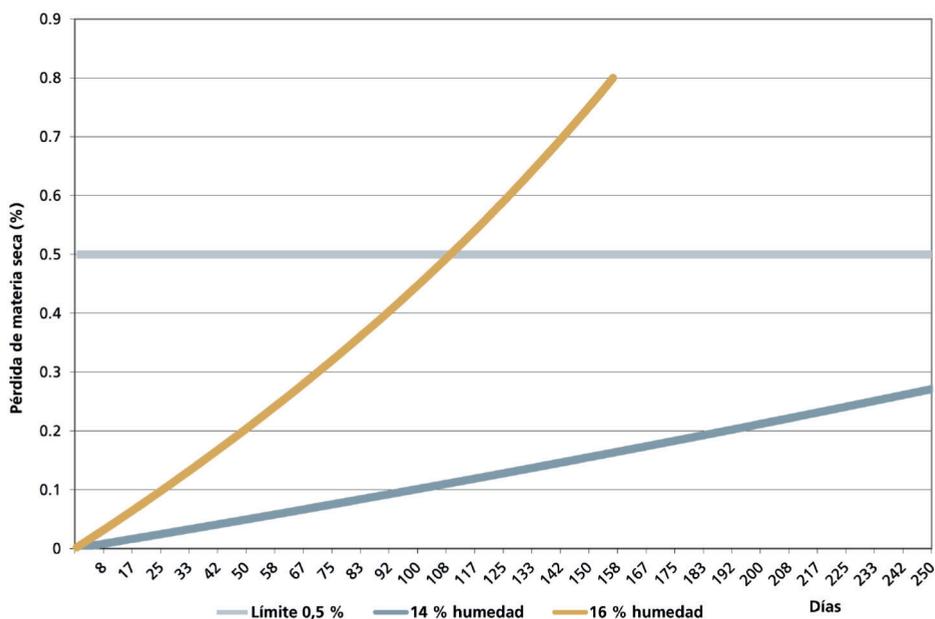


Figura 16. Simulación de la evolución en el tiempo de la pérdida de materia seca de maíz almacenado con una temperatura inicial de 15 °C y un contenido de humedad de 14 % y 16 %.

que con la mayor humedad (16 %) mayor es el incremento de la PMS durante el almacenamiento posterior y en menor tiempo llega a la PMS límite del 0,5 % (ver Capítulo I, sección 2). Es decir que, si se almacena grano frío (15 °C o menos) y seco (igual o inferior a la humedad de recibo), podrá mantenerse su calidad sin incremento de temperatura y de la PMS por un tiempo notablemente mayor.

- Estructura de almacenamiento: el tamaño, material y la forma de la estructura afecta la velocidad de calentamiento del granel. Los silos grandes (más de 400 t de grano) con gran cantidad de grano almacenado en relación con la escasa superficie del silo expuesta a la temperatura ambiente modifican en menor magnitud el promedio de la temperatura de la masa de granos que almacenan. En estos silos, si bien la temperatura del grano en la proximidad con las paredes es la misma que en un silo pequeño, el promedio de temperatura de todo el granel puede ser de hasta 5 °C menor luego de 4 meses de almacenamiento respecto de un silo de menor capacidad. En los silos pequeños, una manera de disminuir la incidencia solar y de las altas temperaturas del ambiente es pintar de blanco las paredes y el techo. Asimismo, materiales con diferente conductividad transfieren el calor ambiente con mayor o menor facilidad al grano. Específicamente, las estructuras de hormigón son más aislantes que las estructuras de chapa por lo que conservaran mejor la temperatura del grano. En el caso de silos subterráneos (Figura 17), gran parte del grano está almacenado por debajo del nivel del suelo, por lo que la influencia de las condiciones climáticas será notablemente menor.



Figura 17.
Silo subterráneo en proceso de refrigeración.



Vista en detalle de la conexión entre el refrigerador y el silo subterráneo.

- Las condiciones climáticas: la estación del año tiene una influencia marcada en el cambio de temperatura del grano. Por ejemplo, durante el verano el calentamiento del trigo o cebada almacenados en el silo será más rápido que el de la soja, maíz o girasol que se cosechan en otoño y luego se almacena durante el invierno.
- Entrada de aire caliente: el aire caliente del exterior puede ingresar por los conductos de aireación y los ventiladores, aun cuando están apagados, por convección (efecto chimenea) causada por diferencias de temperatura entre el interior y el exterior del silo. Para evitarlo una vez que el ciclo de refrigeración terminó y el grano se encuentre frío, se debe desconectar el equipo refrigerador y sellar la boca de los ventiladores (Figura 18). Esta práctica también tiene el beneficio de restringir la entrada de insectos y roedores al silo.



Figura 18.
Tapa colocada en el aireador para evitar el "efecto chimenea".

Todas estas variables mencionadas afectan la temperatura del granel, y se hace difícil determinar el tiempo exacto que el grano permanecerá frío. En líneas

generales, con granos secos a humedad de recibo (todos menos girasol) y limpios, la temperatura permanecerá baja durante más de 4 meses pudiendo llegar hasta 12 meses aproximadamente. Especial atención requiere el almacenamiento de girasol, que para considerarse seco debe tener menos de 9 % de humedad.

2. ¿Cuándo repetir el ciclo de refrigeración?

Un lento pero constante aumento de la temperatura de los granos significa la creación de un medio adecuado para el desarrollo de los hongos y de los insectos. Por cada 5 °C de aumento de la temperatura de los granos la tasa de respiración se duplica, consumiendo las reservas del grano y provocando mermas de peso. Recordemos que, con algunos granos, una merma de solo el 0,5 % de su peso seco produce pérdida de calidad y la caída de su grado en la comercialización. En cuanto a los insectos, a partir de temperaturas superiores a los 17 °C se desarrollan, alimentan y reproducen más rápido, provocando aumento de las poblaciones y daños al grano.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, con granos secos se recomienda realizar otro ciclo de refrigeración cuando la temperatura máxima de la masa de granos está próxima a los 17 °C. Con granos húmedos, el monitoreo de la temperatura debe ser más intenso, debiendo repetirse la refrigeración cuando la temperatura máxima registrada en la masa de granos aumente entre 3 °C y 5 °C. Debemos notar que cuando las condiciones climáticas lo permitan, el nuevo ciclo de enfriamiento también puede hacerse mediante la aireación tradicional. En este caso, el aire ambiente debe estar más frío que el grano.

3. Precaución en la extracción de los granos refrigerados

Cuando el grano almacenado está frío por debajo de la temperatura ambiente, y es expuesto durante la carga y transporte, se corre el riesgo de que se produzca condensación de la humedad ambiente sobre la superficie fría de este. Esta humedad en la superficie del grano puede ocasionar problemas en el transporte y posteriormente facilitar el desarrollo de hongos y la pérdida de calidad. Si los granos están destinados a exportación, es normal que el embarque tarde semanas en arribar a destino, pudiendo producirse en este tiempo su deterioro y llegar a destino en una condición de menor calidad respecto de la original.

En estos casos es prudente, antes de su extracción, incrementar la temperatura de los granos mediante la aireación hasta un rango que se encuentre ± 6 °C respecto de la temperatura ambiente promedio.



CAPÍTULO IV: MONITOREO DE LA TEMPERATURA DE LOS GRANOS REFRIGERADOS

Monitoreo de la temperatura de los granos refrigerados

Durante el ciclo de refrigeración es de fundamental importancia el seguimiento de la temperatura de los granos. El monitoreo permite determinar la evolución de la temperatura de los granos y saber cuándo se ha completado el ciclo de refrigeración en el silo.

1. Monitoreo de la temperatura, termometría

En silos y celdas es ideal que la medición de la temperatura se realice por medio de sistemas de termometría. El sistema consta de cables resistentes con termocuplas distribuidas regularmente a lo largo del cable. Estos cables deben estar fijados firmemente a la estructura para soportar el peso y los movimientos del grano.

Para un monitoreo adecuado de la temperatura se deben tener en cuenta algunas recomendaciones:

- Número y distribución de los cables: como es imposible conocer la temperatura de todo el cereal, se distribuyen sensores con una densidad razonable (cada 2 m o menos dentro del cable) que permitan monitorear la temperatura y detectar a tiempo los focos de calentamiento. Se debe recordar que las termocuplas solo censan la temperatura del grano que está en contacto directo. Se deben colocar cables de termometría distribuidos en toda la masa de granos, especialmente en el centro del silo, dado que el “corazón” es la zona con mayor riesgo de deterioro y menor pasaje de aire (Figura 19).
- Frecuencia del monitoreo: desde el inicio del ciclo de refrigeración, las mediciones se deben tomar por lo menos una vez al día y en lo posible en el mismo horario para observar la baja de temperatura ocurrida en 24 h. A medida que el ciclo de refrigeración se está acercando al final, se debe medir dos veces al día. De esta manera se evita el funcionamiento innecesario del equipo refrigerador durante 12 h ya que todo el grano almacenado en el silo podría estar frío.
- Momento de la lectura: apagar el equipo de frío y esperar 30 min para medir la temperatura del grano. Esto asegura que la temperatura registrada sea la del grano y no esté afectada por el aire frío que circula por el espacio entre los granos. Se recomienda que esta práctica se realice por lo

menos cerca del final del ciclo de refrigeración y así obtener valores reales de la temperatura del grano.

- **Automatización:** la ventaja de los sistemas de termometría automatizados es que se pueden programar los horarios y archivar las lecturas para ser posteriormente consultadas.

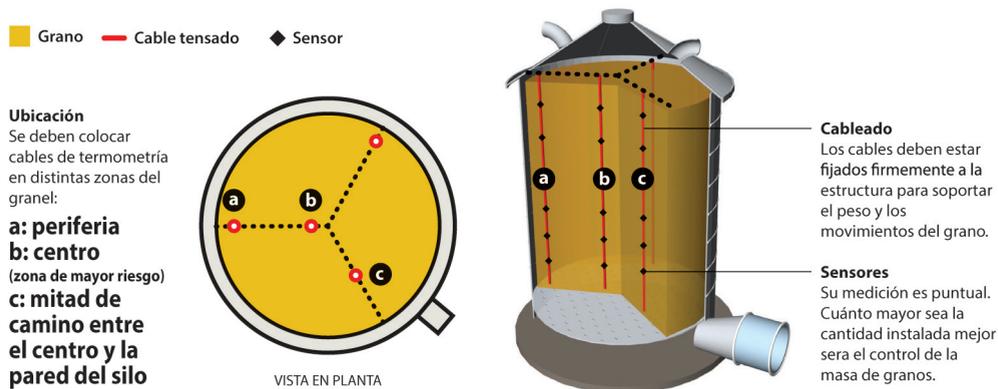


Figura 19. Distribución de cables y sensores de termometría. Fuente: Abadía y Bartosik (2013).

2. Alternativas para el monitoreo de la temperatura del grano

Cuando en la celda o silo no esté instalado un sistema de termometría se debe recurrir a otros métodos para monitorear la temperatura de los granos.

a. Extracción de muestras

Cuando se insufla aire frío al silo la capa superior de granos es la última porción en refrigerarse. Una forma de comprobar la finalización del ciclo de refrigeración es extraer una muestra de grano de esta última capa y determinar la temperatura de los granos. Se debe extraer una muestra de grano unos 30 a 50 cm por debajo de la superficie, introducirla en un termo e insertar un termómetro, dejar estabilizar la medición unos cinco minutos y finalmente registrar la temperatura. La extracción de muestras puede hacerse en distintos puntos sobre la porción superior del silo para conocer si la distribución del aire fue adecuada y la temperatura lograda, uniforme. Si el silo posee boquillas laterales (Figura 20) para extracción de muestras a distintas alturas, se pueden obtener muestras para conocer la velocidad de avance del frente de enfriado del silo.



Figura 20.
Boquilla lateral en un silo.

b. Medición con instrumental adaptado

Para medir la temperatura del grano se puede utilizar instrumental adquirido o adaptado para tal fin. Por ejemplo, se puede confeccionar una lanza con el sensor de temperatura en su extremo y una consola que permita mostrar al operario la temperatura. Esta lanza debe tener marcas a cada metro en toda su longitud. Para realizar la medición se sugiere apagar el equipo de frío y esperar 30 minutos, para luego insertar la lanza en el grano y esperar unos minutos para registrar la temperatura. Con esta metodología se puede registrar la evolución de la temperatura en los últimos 4 m de profundidad desde la superficie de los granos, y así estimar el avance del frente de enfriado y el tiempo restante para completar el ciclo de refrigeración del silo (Figura 21 y Figura 22).

Otra alternativa para medir la temperatura de los granos dentro del silo es fabricar una lanza con dos estructuras de caños. El caño exterior tiene la fortaleza para insertarlo en el granel y en cuyo interior, aloja otro caño que puede ser de plástico permitiendo que gire en su totalidad. En el extremo de esta estructura se aloja un termómetro que, según su posición de giro, queda descubierto o cubierto. Esta lanza, con el termómetro en posición cubierto, se inserta en el granel hasta la profundidad en donde se desea medir la temperatura. En este momento se gira media vuelta el caño interior de plástico quedando al descubierto el termómetro que estará en contacto con el grano y comenzará a medir su temperatura. En esa posición se lo deja unos minutos, luego el caño se gira para cubrir el termómetro y se retira la lanza del granel. Esto permite que en la pequeña cavidad se aloje una muestra de grano en contacto con el termómetro para una vez retirado del granel, obtener la lectura de su temperatura (Figura 23 y Figura 24).



Figura 21.
Lanza con una longitud de 3,8 m y visor digital.



Figura 22.
Inserción de lanza para medir temperatura en la parte superior del silo.



Figura 23.
Lanza con sección móvil de medición.
Termómetro al descubierto.
Lanza con sección móvil de medición.
Termómetro cubierto.



Figura 24.
Inserción de la lanza en el grano
(Gentileza Sr. Claudio Genero).



CAPÍTULO V: USO EFICIENTE Y OPERATIVIDAD DEL EQUIPO DE FRÍO

Uso eficiente y operatividad del equipo de frío

1. Aislación de los conductos de conexión con la estructura de almacenaje

El equipo de refrigeración normalmente trabaja en condiciones de alta temperatura ambiente insuflando aire frío a través del conducto de conexión con el silo. En estas condiciones, la temperatura del aire dentro del conducto puede estar a menos de la mitad que en el exterior (ej. 15 °C y 30 °C respectivamente), además el sol puede estar incidiendo y calentando notablemente el conducto. Se ha logrado medir en conductos deficientemente aislados, un calentamiento del aire de hasta 2,7 °C entre el equipo de frío y el silo, a través de ensayos de refrigeración realizados por profesionales del INTA EEA Pergamino (Roskopf *et al.*, 2015) durante el verano (enero) en donde se registró la temperatura del aire a la salida del refrigerador y a la entrada del silo a cada un minuto (contando con 5484 datos en cada ubicación). La bibliografía de Maier y Navarro (2002) menciona un calentamiento del aire dentro del conducto que va en aumento con la temperatura ambiente, de 2 °C con una temperatura ambiente de 25 °C y de 3 °C cuando el conducto no se encuentra aislado. Así mismo menciona que a 32,5 °C de temperatura ambiente, el calentamiento del aire es de 7 °C si el conducto no está aislado térmicamente. Esto provoca pérdida de eficiencia y el ingreso de aire al silo a una temperatura mayor que la programada en el equipo por lo que en estas condiciones ambientales es muy importante aislar térmicamente los conductos que conectan el refrigerador al silo y también la transición de entrada del aire al silo (Figura 25).

El conducto se puede aislar manualmente luego de conectado el refrigerador, pero lo recomendable es utilizar aquellos con aislante incorporado en su interior



Figura 25.
Aislamiento del conducto y transición de entrada de aire a la boca de aireación del silo.

(Figura 26). Estos conductos se pueden manipular con facilidad durante la desconexión de un silo ya refrigerado y la conexión a uno nuevo para su refrigeración.



Figura 26.
Conducto de lona térmicamente aislado y de color blanco.

Tocar con la mano el conducto es una manera práctica de comprobar si la aislación es adecuada; si al tacto se siente frío, es porque no es suficiente la aislación y el aire en su interior se está calentando. Otra manifestación, más grave, es la presencia de gotas de agua por condensación de humedad sobre el conducto.

Si se desea conocer la temperatura real a la que está ingresando el aire al silo, independientemente de la programada en el equipo de frío, se debe medir la temperatura en la boca de ingreso del aire frío al silo. Si el objetivo es medir el calentamiento del aire en el conducto, también se debe medir en la boca de salida de aire del equipo de refrigeración (Figura 27).

Se deben hacer varias lecturas, promediar y luego calcular la diferencia de lectura entre ambos puntos de medición para determinar la magnitud del calentamiento del aire en el conducto. Controlar este factor es de vital importancia ya que determina la temperatura mínima a la que podrá enfriarse el grano y el consumo de energía del equipo. Por ejemplo, si se programa el equipo para que insufla aire a $13\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero por una inadecuada aislación el aire ingresa al silo a $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, el grano nunca se enfriará por debajo de los $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto representa un mayor consumo energético que luego no se reflejará en la menor temperatura del grano.

2. Ubicación del equipo refrigerador

El equipo refrigerador se debe ubicar lo más cerca posible de la estructura de almacenaje de granos que se quiera refrigerar, utilizando la menor longitud posible de conducto de conexión. La razón principal es que, cuanto mayor sea la longitud de



Figura 27.
Medición de temperatura del aire a la salida del equipo de frío.



Medición de la temperatura de entrada del aire al silo.

conducto de conexión entre el equipo y el silo, mayor será la superficie expuesta y la posibilidad de calentamiento del aire frío en su interior. Para acortar o alargar el conducto se pueden utilizar tramos que se ensamblan y permite acortar la manga cuando el equipo puede ubicarse cerca del silo, o alargarla, cuando se debe refrigerar un silo de difícil acceso.

Cuando pueda elegirse la ubicación, es preferible que el equipo refrigerador se coloque en la sombra del silo, de esta manera se reduce el calentamiento del aire dentro del conducto.

3. Control de la humedad relativa del aire insuflado

El grano almacenado puede ser de diferentes especies y con distinto contenido de humedad, por eso es recomendable que el equipo refrigerador, además de la temperatura, permita programar la humedad relativa del aire que insufla al silo. Esto hace

que la humedad relativa del aire frío insuflado se encuentre en equilibrio higroscópico con la humedad del grano almacenado.

El contenido de humedad de los granos guarda una relación directa con la humedad relativa del aire en contacto con los granos (aire intergranario) llamada: humedad relativa de equilibrio (HRE). Para cada valor de humedad del grano existe un valor de HRE, en la cual la presión de vapor de agua del grano y del aire intergranario son equivalentes. En este punto de equilibrio, no hay intercambios de humedad entre el grano y el espacio intergranario. Esta relación, que depende de la temperatura y del tipo de grano, se puede observar gráficamente con una curva de HRE. La Figura 28 muestra como ejemplo la curva de HRE de maíz a 10 °C de temperatura.

Supongamos que se desea almacenar maíz con 10 % de humedad y a 10 °C en un silo. La curva de HRE de la Figura 28 permite predecir que al lograrse el equilibrio, la humedad relativa del espacio intergranario será cercana a 30 % (cuadrado rojo). En cambio, si el silo fuese llenado con maíz a 15 % de humedad, en el equilibrio la humedad relativa del espacio intergranario sería cercana al 70 % (cuadrado verde).

La humedad relativa del espacio intergranario determinará en gran medida si los hongos presentes en el almacenamiento pueden desarrollarse o no en el granel, dado que estos organismos necesitan un mínimo de humedad relativa para crecer. Como regla general, cuando la humedad relativa del espacio intergranario es inferior al 67 % la mayoría de los hongos del almacenaje no pueden desarrollarse. A este valor de humedad relativa se lo denomina humedad relativa de almacenamiento seguro.

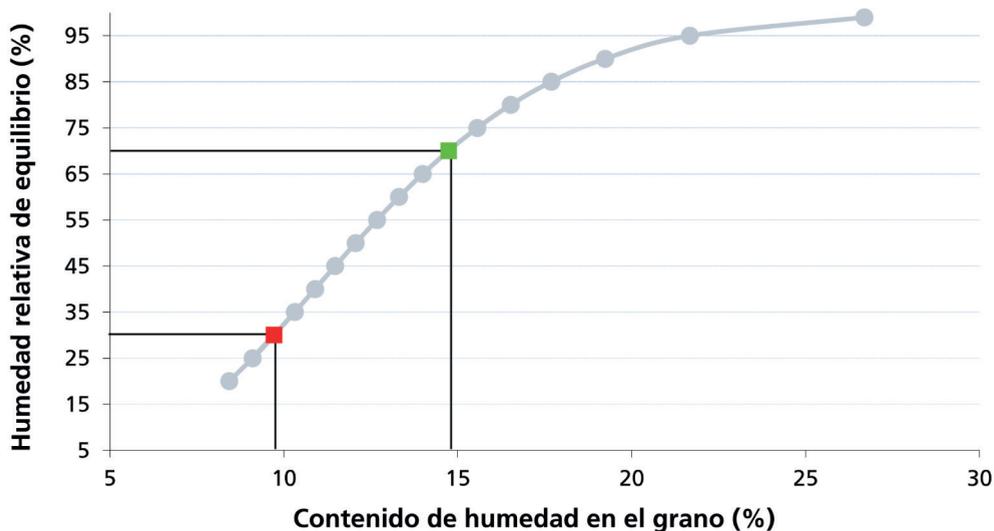


Figura 28. Curva de humedad relativa de equilibrio para maíz a 10 °C. Fuente: Abadía y Bartosik (2013).

Ahora bien, ¿por qué es importante controlar la humedad relativa del aire que el equipo de frío insufla al silo? La respuesta es que, si el grano almacenado está seco, con contenido de humedad en equilibrio menor a 67 % y se insufla aire húmedo (con humedad relativa de equilibrio mayor al 67 %) es posible que las capas inferiores de granos lentamente se humedezcan con el consiguiente riesgo de desarrollo de hongos. Por eso, con grano seco, el aire frío insuflado al silo debe estar en equilibrio higroscópico con la humedad del grano almacenado.

A su vez, cada grano tiene su propia curva de humedad relativa de equilibrio. Estas curvas se muestran en la Figura 29 para girasol, soja, maíz, trigo y sorgo a 25 °C. La línea naranja representa la humedad relativa de almacenamiento seguro (es decir, una humedad relativa del espacio intergranario de 67 %). Al proyectar en el eje horizontal el punto de intersección entre cada curva y la HRE de 67 % se obtiene el contenido de humedad del grano correspondiente a su “humedad relativa de almacenamiento seguro”.

Se observa así que la humedad de almacenamiento seguro es diferente para cada grano. Para maíz es de 13 %, para trigo 14,2 %, para sorgo 15,2 % para girasol 7,5 % y para soja 12 %.

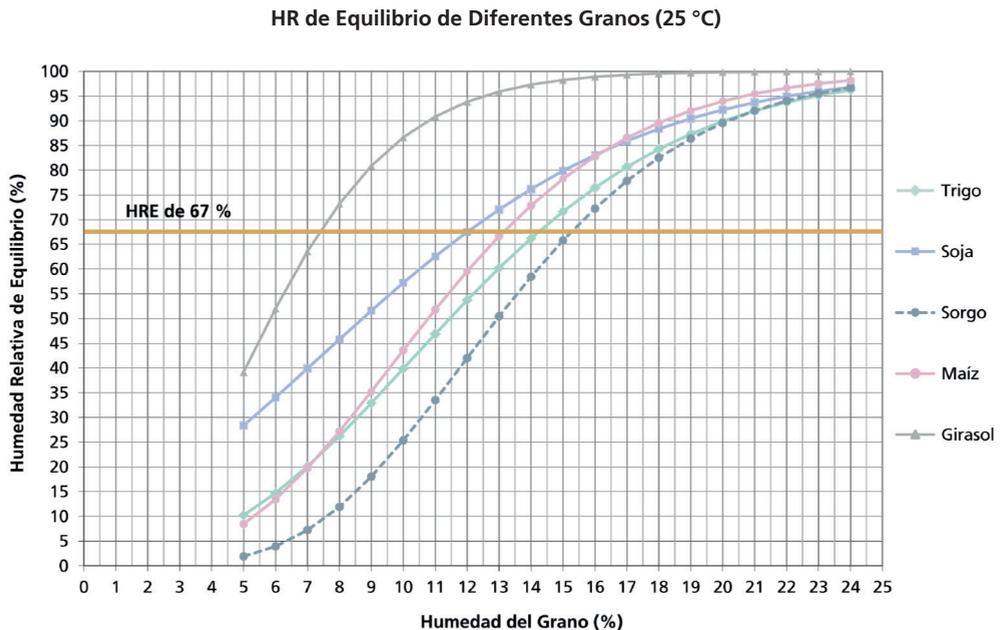


Figura 29. Curvas de humedad relativa de equilibrio para los principales granos a 25 °C. Fuente: Abadía y Bartosik (2013).

La implicancia práctica de este concepto en la refrigeración de granos lleva a que la humedad relativa del aire insuflado al silo deberá ser de 67 % para todos los granos almacenados a humedad de recibo, y que, para el caso del girasol almacenado con 11 % (base de comercialización), insuflando con 67 % de HR podría esperarse un leve secado de las capas inferiores de granos del silo (ver sección 7 de este capítulo).

Asimismo, adecuar el funcionamiento del equipo a la humedad del grano almacenado aumenta la eficiencia en el proceso de refrigeración principalmente en la refrigeración de granos con humedad.

4. Refrigeración de granos húmedos

Es importante recordar que el secado es la mejor técnica para la conservación de los granos. La refrigeración no reemplaza al secado como técnica de almacenamiento seguro a largo plazo.

El grano húmedo, con 3 o 4 puntos por encima de la humedad de recibo que será almacenado transitoriamente o está a la espera de ser secado, debe ser rápidamente enfriado para limitar su propia respiración y el desarrollo de hongos. Si el equipo de frío no es capaz de enfriar todo el granel en menos de una semana, es recomendable realizar el enfriado en dos etapas. Por ejemplo, si se intenta enfriar una masa de granos húmedos desde 27 °C a 14 °C cuando durante el día las temperaturas del aire ambiente llegan a 35 °C, podría ocurrir que el equipo insufla un bajo caudal de aire frío a 14 °C demorando el enfriamiento de todo el silo. Bajo estas circunstancias se puede poner en riesgo la calidad de una porción importante de la masa de granos, ya que tardaría muchos días en llegar a enfriar la capa superior. En estos casos lo conveniente sería realizar un ciclo de refrigeración hasta lograr que la temperatura del grano descienda a los 21 °C, y luego otro ciclo a menor temperatura hasta el valor final deseado.

Si bien el consumo de energía sumado de ambos ciclos de refrigeración probablemente sea mayor que si se realiza uno solo hasta los 14 °C, se evitará un costo potencial mayor causado por las pérdidas de calidad y materia seca por respiración.

Para el enfriamiento de grano húmedo no es recomendable insuflar aire con baja humedad relativa ya que el equipo debe secar el aire más de lo necesario, reduciendo su caudal y consumiendo mayor energía. En estos casos el equipo debe programarse a mayor humedad (pero siempre en equilibrio con la humedad del grano) así el caudal de aire entregado será superior y con ello menor el tiempo de refrigeración y el consumo de energía. En la Tabla 2 se brindan algunos valores de humedad para programar en el equipo de frío de acuerdo a la humedad del grano.

Grano	CH (%)	HR (%)
Maíz	17	83
Trigo	16	74
Soja	17	84
Girasol*	11	89
Arroz	18	84
Sorgo	18	79

Tabla 2.
Valores de humedad relativa del aire (HR) para programar en el equipo de frío de acuerdo al contenido de humedad (CH) de los diferentes granos húmedos, para 13 °C de temperatura de programación del refrigerador y sin considerar el calentamiento del aire que podría producirse en el conducto que conecta el equipo de frío con el silo.

**El almacenamiento de girasol a estas condiciones es extremadamente riesgoso.*

5. Enfriamiento evaporativo y sobre secado

El enfriamiento evaporativo ocurre cuando la HR del aire insuflado es menor que la HRE del grano. En esta condición el agua del grano se evapora absorbiendo calor de este y reduciendo su temperatura.

Simultáneamente, al enfriarse el grano, el aire insuflado en circulación entre los granos se calienta elevando su temperatura y baja su HR, lo que a su vez aumenta la evaporación de agua del grano. Como referencia por cada grado centígrado que se reduce la temperatura del grano, puede esperarse que el contenido de humedad del grano descienda 0,1 % (base húmeda). Por ejemplo, si se enfría el grano de 30 °C a 15 °C, es de esperar que su CH se reduzca aproximadamente 1,5 %. En el caso de las oleaginosas (especialmente con girasol) la magnitud de la pérdida de humedad podría ser mayor.

6. Uso combinado: secado con refrigeración artificial de granos

El uso de la secadora combinado con la refrigeración de granos (seca-refrigeración) presenta algunas ventajas como el aumento de la capacidad de la secadora, economía de combustible en el secado y un aumento de la calidad final del grano en este proceso.

Para realizar seca-refrigeración, la secadora se configura “todo calor” eliminando la sección de enfriado, de esta manera toda la secadora funciona secando grano (Figura 30).

El grano se extrae de la secadora caliente (más de 40 °C) y con una humedad ligeramente superior a la humedad final deseada (1,5 % a 2 % superior). Es decir, si la humedad final deseada es de 14,5 %, de la secadora el grano debe salir aproxima-

damente a 16,5 %. Posterior a la salida de la secadora, el grano se transfiere a un silo permaneciendo en reposo entre 6 y 12 h, sin circulación de aire, donde se equilibra internamente la humedad y temperatura del grano. Luego de este reposo, se enciende el equipo de refrigeración para enfriar y secar levemente el grano en un periodo corto. Para evitar su deterioro, el caudal específico debe ser más elevado que el necesario para el enfriamiento, de aproximadamente $0,4$ a $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$, tardando aproximadamente entre 33 y 42 h de funcionamiento del refrigerador para enfriar los granos de todo el silo (ver Capítulo I, sección 10). Si la capacidad del equipo de refrigeración es limitada respecto de la cantidad de grano, es conveniente programar el equipo para que insuffle aire a una mayor temperatura, entre 20 y $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Con esta programación, el equipo aumenta notablemente su caudal de aire (y con ello el caudal específico) logrando secar y enfriar todo el granel en menos tiempo. En este proceso, como se comentó anteriormente (ver sección 5 de este capítulo), el enfriamiento secará el grano a razón de $0,1 \%$ punto de humedad por cada $1 \text{ }^\circ\text{C}$ que baje la temperatura del grano. Así, por ejemplo, partiendo con grano a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ de la salida de la secadora luego de acondicionarlo a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, es de esperar que en promedio todo el granel disminuya 2 puntos su contenido de humedad. Posteriormente puede realizarse otro ciclo de refrigeración programando el equipo a una menor temperatura, cuyo objetivo será enfriar el grano a una temperatura final de entre 13 y $14 \text{ }^\circ\text{C}$.

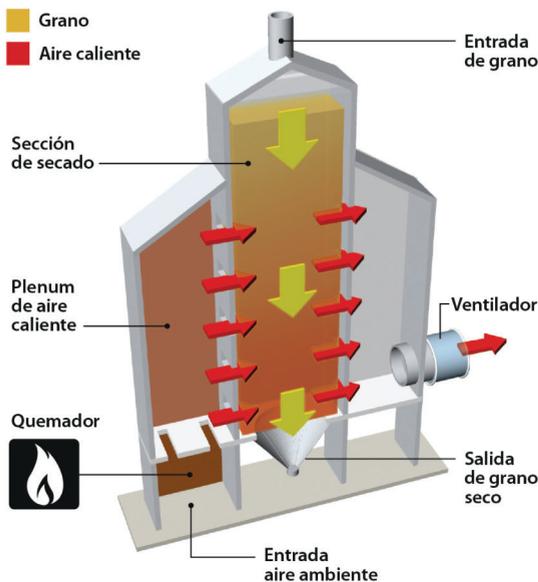


Figura 30. Esquema de secadora configurada en modo todo calor. Fuente: Abadía y Bartosik (2013).

Grano	CH (%)	HR (%)
Maíz	14.5	70
Trigo	14	63
Soja	13.5	71
Girasol	8	69
Arroz	14	61
Sorgo	15	60

Tabla 3. Valores de humedad relativa del aire (HR) para programar en el equipo de frío de acuerdo al contenido de humedad (CH) de los diferentes granos secos, para 13 °C de temperatura de programación del refrigerador y sin considerar el calentamiento del aire que podría producirse en el conducto que conecta el equipo de frío con el silo.

en las horas de menor temperatura ambiente (y generalmente de menor costo de la energía), es decir, durante la noche. Esto hará que el consumo de energía por tonelada refrigerada sea menor (ver secciones 8 y 9 de este capítulo), pero serán necesarios más días para enfriar todo el silo.

8. Efecto del clima sobre el desempeño de la refrigeración artificial de granos

La temperatura y humedad relativa del aire ambiente tienen efecto en el desempeño del equipo de frío y en el proceso de enfriamiento artificial de los granos.

Los equipos de refrigeración tienen una capacidad de refrigeración máxima (toneladas por día), por lo que, para lograr las condiciones de temperatura y humedad de aire impuestas por el operario, modifican el caudal insuflado (de acuerdo a las condiciones climáticas ambiente) para mantener constante la temperatura y humedad del aire entregado. En líneas generales, cuanto mayor es la temperatura y humedad ambiente menor es el caudal de aire refrigerado que puede ofrecer el equipo, por lo que el ciclo de enfriamiento de un silo se alarga. Este ajuste del caudal que se realiza constantemente durante el día y la noche, en condiciones de funcionamiento los equipos refrigeradores de granos lo realizan modificando automáticamente las revoluciones del ventilador que insufla el aire al silo. A mayor rpm del ventilador, mayor caudal de aire insuflado al silo. En mecanismos de equipos refrigeradores antiguos, este ajuste de caudal se realizaba a través del cierre o apertura mecánica de una persiana manual que restringe o aumenta el flujo de aire desde el ventilador al silo. El control automatizado del caudal de los equipos modernos hace notablemente más eficiente el proceso de la refrigeración de los granos y logra un ahorro del 20 % en el consumo de energía con respecto a los antiguos.

9. Influencia del clima en el consumo de energía

El efecto del clima en el equipo de refrigeración depende básicamente del caudal de entrega de aire frío y en el consumo energético. Si la temperatura y humedad relativa ambiente son mayores, las necesidades de acondicionamiento del aire son también mayores por lo que el equipo restringe su caudal de aire para cumplir con las condiciones impuestas por el operario (temperatura del aire y humedad relativa). Esto provoca un aumento del tiempo necesario para refrigerar todo el silo y a su vez se eleva el consumo de energía por tonelada refrigerada (ver Capítulo VI, sección 2, Experiencias nacionales en refrigeración artificial de granos). Mediante simulación para distintas regiones climáticas de Argentina, Roskopf *et al.* (2018) determinaron que por cada grado centígrado de aumento de temperatura ambiente (entre 14,8 °C y 31,2 °C) el tiempo de refrigeración aumentó 2 h en promedio y el consumo específico 0,11 kWh.t⁻¹.



CAPÍTULO VI: ASPECTOS ECONÓMICOS

Aspectos económicos

La evolución de los equipos ha permitido disminuir significativamente el consumo de energía eléctrica en el proceso de refrigeración de granos. Esto tiene importantes beneficios en la reducción de costos y facilita la implementación de la tecnología en el acondicionamiento y almacenaje de granos.

1. ¿Cuánto cuesta enfriar artificialmente un silo?

Uno de los factores claves que deciden sobre una tecnología es su costo de adopción y su costo operativo. Teniendo en cuenta que el retorno económico del almacenaje está dado por la diferencia de precios al momento de venta a futuro menos los costos del almacenaje, el sector almacenador decide qué, cuánto y por cuánto tiempo almacenar, así como de qué manera acondicionar el grano durante este periodo. Es en este último punto que la refrigeración de granos se encuentra directamente relacionada con la manera de acondicionar el grano, siendo una alternativa a la aireación tradicional para enfriar los granos.

Para calcular el costo de adopción de la refrigeración artificial, una opción es considerar el valor de compra del refrigerador. Su amortización, como mínimo, puede realizarse por un periodo de vida útil de 15 años (algunos autores también lo calculan para 20 años) y un valor residual del 15 %. Al momento, en nuestro país, existen al menos dos empresas (con posibilidad de una más a futuro) que comercializan equipos de frío. La variedad de capacidades de estos equipos, además de su configuración (fijos, móviles sobre chasis, móviles sobre camión, monitoreo opcional de la temperatura del grano en refrigeración, etc.) hace que sea difícil brindar un valor a nuevo de un equipo refrigerador de granos. A modo orientativo, se puede mencionar un rango de valor que va de los 20 mil a 200 mil USD, según su capacidad diaria de refrigeración y configuración. O bien, una relación de costo del refrigerador que va del 4 al 6 % del valor de la planta cuando la capacidad operativa del equipo está adecuadamente relacionada con la capacidad de almacenaje del acopio.

Otra opción es el alquiler del equipo de frío. El costo es sumamente variable, dependiendo entre otros factores de la localidad, duración del periodo de alquiler (se realiza por contrato), capacidad del refrigerador, época del año, etc. Esta opción es más flexible que la compra y en algunos casos se utiliza para “probar” la tecnología en la planta de acopio y luego evaluar su compra.

En cuanto al costo operativo, está principalmente dado por el consumo de energía, que relacionado al valor local de la energía ($\$.kWh^{-1}$) permite estimar el costo operativo ($\$.t^{-1}$ o $USD.t^{-1}$) para refrigerar el grano. Así, por ejemplo, para una determi-

nada localidad en la que se esperaría un consumo de energía 3 kWh por tonelada de grano refrigerada, con un costo de energía de 0,16 USD.kWh⁻¹, el costo estimado para refrigerar una t de grano es de USD 0,48 (3 kWh x 0,16 USD.kWh⁻¹) y de USD 480 para refrigerar un silo de 1000 t (USD 0,48 x 1000 t). Se deberá tener en cuenta que los consumos de energía disminuyen en regiones de menor temperatura ambiente y aumentan con mayor temperatura ambiente y granos más secos. Estas consideraciones se discuten en la siguiente sección de este capítulo.

2. Experiencias de refrigeración artificial de granos en Argentina

Para evaluar el proceso de refrigeración artificial de granos, las variables más importantes para considerar son las toneladas enfriadas, la temperatura inicial y final luego de refrigerar todo el granel, el consumo específico de energía (es la cantidad de energía consumida por tonelada refrigerada) y la temperatura ambiente promedio.

En el año 1994, De Dios (1994), de INTA EEA Pergamino, mencionó un valor aproximado de consumo específico de 7 kWh.t⁻¹ en un ensayo de refrigeración sin mencionar las condiciones ambientales ni la temperatura inicial y final del grano. Luego, técnicos del INTI 9 de Julio (Gornatti y Apro, 2004), empleando un equipo de refrigeración importado, midieron un consumo específico de 7,2 kWh.t⁻¹ (Tabla 4).

Grano	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Toneladas refrigeradas	Consumo específico (kWh.t ⁻¹)	Consumo específico térmico (kWh.t ⁻¹ .°C ⁻¹)	Temperatura ambiente promedio (°C)
Trigo	25	6 a 10	200	7,2	0,5 a 0,4	No menciona
Maíz	20	10	500		0,7	No menciona

Tabla 4. Resultados de ensayos de refrigeración artificial desarrollados por el INTI en el año 2004.

Posteriormente Roskopf y Bartosik (2010) continuaron con ensayos sobre diferentes granos, algunos de los cuales se resumen en la Tabla 5.

Se observa que, si bien la temperatura inicial de los granos es relativamente similar, la temperatura final presenta variación, con valores de 13,8 a 20,1 °C. La diferencia de temperatura puede ser causada por la influencia de las condiciones ambientales sobre el desempeño del refrigerador (ver Capítulo V, sección 8) y las condiciones de aislamiento de los conductos que lo conectaron al silo (ver Capítulo V,

sección 1). El bajo consumo específico térmico en la refrigeración del sorgo se motivó por el mayor descenso (12,4 °C) en la temperatura del grano, aun cuando el consumo específico no fue comparativamente el más bajo. En las experiencias de refrigeración de trigo que se realizaron en verano y con temperatura ambiente elevada, promedio de 24,8 °C y 22,9 °C respectivamente, se registró también el mayor consumo eléctrico por t refrigerada: 4,1 kWh.t⁻¹ y 4 kWh.t⁻¹, respectivamente (ver Capítulo V, sección 9). Se debe notar, sin embargo, que estos consumos de energía por tonelada refrigerada son de aproximadamente la mitad a los registrados hace 15 o 25 años (Tabla 4) y se deben fundamentalmente a la evolución técnica y eficiencia de desempeño de los actuales equipos de refrigeración.

Grano	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Toneladas refrigeradas	Consumo específico (kWh.t ⁻¹)	Consumo específico térmico (kWh.t ⁻¹ .°C ⁻¹)	Temperatura ambiente promedio (°C)
Maíz	24,3	13,8	1200	2,6	0,25	18,2
Trigo	24,4	15,6	1000	4,1	0,46	24,8
Sorgo	26,2	13,8	85	3,2	0,26	19,2
Trigo	27,3	20,1	1238	4	0,55	22,9

Tabla 5.
Experiencias de refrigeración artificial desarrollados por el INTA desde el año 2010.



CAPÍTULO VII: EVOLUCIÓN DE LOS EQUIPOS: PROPUESTAS TÉCNICAS PARA FABRICANTES DE EQUIPOS REFRIGERADORES DE GRANOS

Evolución de los equipos: Propuestas técnicas para fabricantes de equipos refrigeradores de granos

1. Monitoreo de la temperatura del aire que ingresa al silo

Los equipos refrigeradores se utilizan en regiones y climas muy variados. Pensemos en el norte de Argentina, por ejemplo, en Sáenz Peña (Chaco), con temperatura promedio de 26 °C en diciembre, y en el centro del país, Pergamino (Buenos Aires), con una temperatura promedio de 22,5 °C en el mismo mes. Adicionalmente, la amplitud térmica durante un día de funcionamiento del refrigerador puede ser grande; por la noche la temperatura ambiente podría ser de 16 °C y durante el día llegar a 32 °C o más. A su vez, los tipos de granos refrigerados son variados: trigo, soja, maíz, girasol, maíz pisingallo, cebada, arroz, por mencionar algunos. Esto lleva a que el equipo debe ajustar constantemente sus parámetros de funcionamiento, que, si no se hacen correctamente, pueden extenderse significativamente los tiempos de enfriamiento sin alcanzar las temperaturas deseadas del grano. En este sentido, uno de los puntos críticos que hacen al éxito de la refrigeración del grano almacenado es la temperatura real de entrada del aire insuflado al silo.

Veamos esto en detalle. Para cumplir con las condiciones del aire impuestas por el operario en un refrigerador con capacidad de control de la HR (por ejemplo 13 °C y 70 % HR), el equipo implementa un esquema de control y funcionamiento como el siguiente: la temperatura del sensor del calentador se establece igual a la temperatura del aire que el operario programó en el equipo, en el ejemplo 13 °C. Anteriormente al calentador, cuando el aire que pasó por el evaporador se enfrió y saturó de humedad al 100 %, la temperatura del aire en este punto se determinó restando, a la temperatura del aire en el calentador (13 °C), la cantidad de grados de temperatura necesarios para lograr la HR relativa programada (en el ejemplo 70 %). Para ello, asumiendo que el aire disminuye su HR aproximadamente 5 % cada 1 °C de calentamiento, al enfriar el aire a 7 °C (con 100 % HR) y calentarlo 6 °C se disminuye 30 % la HR, llegando así al 70 % deseado (100 % HR – 30 % HR).

Ahora bien, esas son las condiciones del aire frío a la salida del refrigerador (13 °C y 70 % HR) que pueden no ser las mismas que en la entrada del aire al silo debido a que con este diseño, no está localizado ningún sensor que mida las condiciones de entrada del aire al silo y que, en definitiva, serán las que determinen el nivel de enfriamiento logrado en el grano. Es por esto que, un sensor de temperatura y HR ubicado a la entrada del aire al silo podría proveer información que ayude al refrigerador a ajustar sus puntos críticos de funcionamiento, aumentando su eficiencia lo que redundará en un menor consumo de energía.

2. Uso de sensores localizados en la entrada del aire al silo

Dado que en el conducto de conexión del refrigerador con el silo puede producirse el calentamiento variable del aire por insuficiente aislación, compresión y fricción del aire (ver Capítulo V, sección 1), cuando se coloca un sensor a la entrada del aire al silo, el aumento de la temperatura debido a la ganancia de calor en el conducto, podría deducirse del punto de ajuste diferencial del recalentador. Para el ejemplo anterior, si el aumento de temperatura necesario después del evaporador es de 6 °C (para lograr aire con 70 % de HR), y siendo de 2,7 °C el calentamiento hipotético del aire en el conducto, entonces el termostato del calentador debe configurarse automáticamente para calentar el aire a un promedio de 3,3 °C (6 °C-2,7 °C) y no 6 °C como lo era anteriormente. Para estas condiciones, enfriar en el evaporador el aire a 7 °C y luego calentar 6 °C el mismo aire podría significar un consumo innecesario de energía, que, además, sería contraproducente ya que en realidad el aire ingresaría al silo a 15,7 °C (13 °C + 2,7 °C) en vez de 13 °C y a una humedad innecesariamente menor al 70 % HR programado.

Esto evidencia la importancia de evolucionar en el diseño de los equipos refrigeradores de granos para optimizar el aire de entrada al silo a los niveles efectivamente programados por el operario en cuanto a temperatura y HR. Esto se logra colocando el sensor del controlador del refrigerador en la entrada del aire a la estructura de almacenaje de los granos, en lugar de a la salida del equipo refrigerador. Este diseño puede significar un desafío para los fabricantes, pero brinda mayores garantías en lograr insuflar aire al silo en las condiciones deseadas, y posiblemente, un aumento notable de la eficiencia.

3. Adecuaciones del equipo refrigerador para el funcionamiento a baja temperatura ambiente

Normalmente, el equipo refrigerador se utiliza en estaciones del año con alta temperatura ambiente. No obstante, por motivos particulares de operatividad en cada planta de acopio, como por ejemplo, el acostumbramiento al uso del refrigerador para enfriar los granos, ventiladores de los aireadores en mal estado o de bajo caudal de aire, o porque la estructura de almacenaje se amplió y no se cambiaron los aireadores, ocurre que también se utiliza el refrigerador en invierno, insuflando altos caudales de aire frío y completando el ciclo de refrigeración en pocas horas. Sin embargo, si el equipo no está preparado, la humedad del aire puede condensarse en el evaporador formando hielo. La acumulación de hielo en el evaporador limita la capacidad del equipo refrigerador al disminuir la capacidad de intercambio calórico entre el eva-

porador (frío) y el aire ambiente (a mayor temperatura). En etapas más avanzadas, las sucesivas capas de hielo acumuladas pueden restringir o directamente bloquear el paso del aire por el evaporador, haciendo que el operador deba apagar el equipo, o bien, no lo pueda utilizar para prevenir fallas graves. Por lo tanto, se recomienda que el equipo tenga un sistema automático de descongelamiento, o mejor aún, que evite la formación de hielo en el evaporador. Funcionalmente, el sistema técnico-económico más conveniente pareciera ser este último, sincronizando el funcionamiento de una válvula (ubicada antes del evaporador), el compresor y un termostato.

Resumidamente, el mecanismo que evita la formación de hielo funcionaría de la siguiente manera: cuando la temperatura del aire en el evaporador cae progresivamente por debajo de los 5 °C, el termostato corta gradualmente el funcionamiento del compresor (si es de capacidad variable) o totalmente (si es de capacidad fija) interrumpiendo la refrigeración. A su vez, la válvula controla la cantidad de refrigerante dirigido al evaporador, funcionando como una válvula de presión diferencial que regula la cantidad de enfriamiento que se produce en el evaporador. Con este mecanismo automático, se evita la formación de hielo y permite extender el funcionamiento del equipo refrigerador aun con baja temperatura ambiente.

4. El equipo refrigerador inteligente y al servicio del operario de la planta de acopio

La evolución de la tecnología permitió el desarrollo de aplicaciones que controlen y optimicen el funcionamiento de cualquier máquina, y también de los refrigeradores artificiales para granos. Así, un equipo refrigerador con el sensor de temperatura y humedad relativa ubicado a la entrada del aire frío al silo (ver sección 1 de este capítulo) sumado a un controlador electrónico que sea el “cerebro” del refrigerador y que cuente con una base de datos precargados sobre temperaturas, humedades del grano y su relación con el contenido de humedad relativa del aire para diferentes tipos de granos, podría optimizar el funcionamiento del refrigerador.

En este sentido, es más intuitivo y amigable desde el punto de vista del operario, especificarle al refrigerador el tipo, la temperatura y la humedad actual del grano almacenado en el silo y su temperatura final deseada, que indicarle las condiciones de salida del aire del equipo que va a ser insuflado al silo. Por ejemplo, el operario a través de la pantalla del controlador ubicada en el equipo refrigerador (ver Capítulo II, sección 6), le indicaría que tiene almacenado 1000 t de trigo a 30 °C con 14 % de humedad y quiere enfriarlo a 14 °C manteniendo la humedad. Posteriormente el refrigerador con los sensores estratégicamente ubicados (según lo comentado en la sección 1 de este capítulo), con su base de datos precargada y de acuerdo a las condiciones

ambientales, calcularía y ajustaría su funcionamiento en función de las condiciones finales del grano deseadas, insuflando aire al silo en equilibrio higroscópico con el grano almacenado.

Sumado a esto, si a la salida del aire en el refrigerador se ubica un caudalímetro de aire con registro y almacenamiento de datos (o un anemómetro haciendo automáticamente la conversión a caudal de aire insuflado), luego de unas horas de funcionamiento, el equipo podría estimar e informar las horas restantes de funcionamiento necesarias para completar el ciclo de refrigeración de las 1000 t de trigo almacenado en el silo. Se debe observar que, debido a que el caudal de aire insuflado es variable de acuerdo a las condiciones ambientales, cuanto más tiempo en horas haya transcurrido con el refrigerador funcionando y registrando su caudal, más acertada será la estimación. También el equipo podría tomar este parámetro para automáticamente detenerse cuando se hayan cubierto las horas de funcionamiento estimadas necesarias para completar el ciclo de refrigeración del silo.

Las sugerencias brindadas en este capítulo podrían resultar en granos efectivamente enfriados a las temperaturas deseada por el operario, optimizando inteligentemente el funcionamiento del refrigerador con menor consumo de energía por tonelada refrigerada. Se sabe que, cuando una tecnología evoluciona siendo más eficiente y amigable aumenta su uso y difusión en el mercado.

Bibliografía

ABADÍA B.; R. BARTOSIK. 2013. Manejo eficiente del grano en la poscosecha. En: Abadía, B.; R. Bartosik (Eds.). Manual de buenas prácticas en poscosecha de granos. Hacia el agregado de valor en origen de la producción agropecuaria. Ediciones INTA. 13-94 pp.

DE DIOS, A. 1994. Refrigeración de granos: calidad a bajo costo. Refrigeración de granos en plantas de almacenamiento. INTI. 5.^a Jornadas de desarrollo e innovación. Documento de conferencia. 3 p.

GORNATTI, C.; N. Apro. 2004. Refrigeración de granos en plantas de almacenamiento. INTI. 5.^a Jornadas de desarrollo e innovación.

MAIER, D.; S. NAVARRO. 2002. Chilling of grain by refrigerated air. En: Navarro, S.; R. Noyes (Eds.). The mechanics and physics of modern grain aeration management. New York: CRC Press. LLC.

MAIER, D.; F. BAKKER-ARKEMA. 1992. Analysis of chilled corn storage in the Midwest. Paper n.º 92-6045. International Summer Meeting. American Society of Agricultural Engineers, Charlotte, Carolina del Norte. 33 p.

REIMANN, E. 1927. Der einfluss der temperatur bei der getreidelagerung [La influencia de la temperatura en el almacenamiento del grano] Die Muhle, (12) 367-368.

ROSKOPF, R.; J. PORTILLO; R. BARTOSIK; H. URCOLA; R. ABALONE; A. GASTÓN. 2018. Evaluación de la aireación y refrigeración artificial de trigo almacenado en diferentes regiones climáticas. Revista de tecnología agropecuaria. INTA Pergamino. Vol. 10, N.º 37. Buenos Aires-Argentina. 29-32 pp.

ROSKOPF, R.; R. BARTOSIK; R. ABALONE; H. URCOLA; A. GASTÓN. 2015. Evaluación de la aireación y la refrigeración artificial de trigo (*triticum aestivum*) para prevenir el desarrollo de insectos en diferentes condiciones climáticas de argentina. Tesis de maestría en Mecanización Agrícola. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata. 90 p.

ROSKOPF, R.; R. BARTOSIK. 2011. Refrigeración artificial de un silo de trigo. Granos & poscosecha latinoamericana de la semilla al consumo. Revista auspiciada por la FAO, Red Argentina de poscosecha de granos y la Red latinoamericana de prevención de pérdida de alimento. Año XVIII-n.º 80. 32-39 pp.

ROSKOPF, R.; R. BARTOSIK. 2010. Evaluación de la refrigeración artificial de un silo de maíz. Trabajo presentado en el IX Congreso Nacional de maíz. Simposio Nacional de sorgo. Rosario, Argentina. 3 p.

ROSKOPF, R.; R. BARTOSIK; L. CARDOSO. 2009. Refrigeración artificial de un silo de maíz: ensayo exploratorio. Trabajo presentado en x Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del Mercosur. Rosario, Argentina. 7 p.

SAGPYA. 1994. Resolución-1075-1994-SAGPYA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. (Disponible: <http://www.senasa.gob.ar/normativas/resolucion-1075-1994-sagpya-secretaria-de-agricultura-ganaderia-pesca-y-alimentos> verificación: enero 2022).

SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL. Estadísticas climatológicas. (Disponible: <https://www.smn.gob.ar/estadisticas> verificación: enero 2022).

La temperatura y la humedad son los factores que más afectan la calidad de los granos y el tiempo que pueden ser almacenados en los silos sin pérdida de calidad. Enfriar los granos minimiza el desarrollo de insectos, retrasa el desarrollo de hongos y aumenta el periodo de almacenaje seguro.

Normalmente los granos se enfrían utilizando los tradicionales ventiladores instalados en los silos o celdas, sin embargo, esta técnica es altamente dependiente del clima, lo que limita su uso y eficacia en regiones o épocas del año con alta temperatura ambiente.

La refrigeración artificial consiste en el enfriamiento de los granos usando un equipo refrigerador para acondicionar artificialmente el aire ambiente. Esto permite insuflar aire frío al silo y en un rango acotado de temperatura, evitando las oscilaciones de la temperatura ambiente.

En el presente libro se incorporan ilustraciones y fotografías inéditas, la temática se aborda en siete capítulos, a través de conceptos teóricos y prácticos sobre la base a las experiencias desarrolladas por INTA en Argentina. Gran parte de la información se recopiló de ensayos realizados en el marco del convenio de asistencia técnica N° 20855, desarrollado durante 8 años en el periodo 2010 a 2018. También del intercambio técnico con acopios de granos que adoptaron el sistema y las empresas proveedoras de equipos de refrigeración artificial de granos y semillas en Argentina.



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina