

Almacenamiento de granos en **SILO BOLSA**

Resultados de investigación 2009 - 2013



Editores: **Leandro Cardoso**
Ricardo Bartosik
Diego de la Torre
Bernadette Abadía
Mauricio Santa Juliana



Ministerio de
Agricultura, Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación

Convenio de vinculación tecnológica:
INTA-Empresas fabricantes de bolsas plásticas

IpesaSilo

**Un liderazgo
construido con hechos**

GALETTO

**24 meses
de Garantía Certificada**



50 años innovando

La más amplia variedad de medidas y aplicaciones



Diámetros

5 - 6 - 8 - 9 - 10 - 12 pies



Largos

60 - 75 - 100 metros

Máximo standard de calidad

Stock permanente



(011) 4469 6800
0800 222 7456



ventas@ipesasilo.com.ar
www.ipesasilo.com.ar



IpesaSilo 
Embolsa más

Almacenamiento de granos en silo bolsa
Resultados de investigación 2009-2013

Almacenamiento de granos en silo bolsa

Resultados de investigación 2009-2013

Leandro Cardoso
Ricardo Bartosik
Diego de la Torre
Bernadette Abadía
Mauricio Santa Juliana



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria



Almacenamiento de granos en silo bolsa. Resultados de investigación 2009-2013

Convenio de vinculación tecnológica:

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Industrias Plásticas por Extrusión S.A. (IPESA)

Plastar San Luis S.A. (Plastar)

INTA EEA Balcarce

Balcarce, Buenos Aires, Argentina

Diseño de tapa: Gerardo Morel y Ana Cuenya

Infografía: Gerardo Morel

Diseño y diagramación: Ana Cuenya y Julia Gouffier

Colaboradores: Valeria Ugarte y José Della Puppa

Correctora de estilo: Laura Lima

Sumario

Autores.....	9
Prólogo.....	11

1 Introducción

Componentes del sistema silo bolsa.....	15
Manejo de granos en silo bolsas.....	22

2 Ambiente del silo bolsa y calidad de granos

Almacenaje de maíz, trigo, soja y girasol en silo bolsas.....	33
Detección temprana de procesos de descomposición de granos almacenados en silo bolsas herméticas mediante la medición de CO ₂	48
Evaluación de silo bolsas para almacenamiento temporario de trigo.....	56
Estudio del efecto de la media sombra sobre la calidad de semilla de soja (<i>Glycine max</i> (L.)) almacenada en bolsas plásticas.....	65
Concentración de dióxido de carbono en almacenamiento hermético de soja (<i>Glycine max</i>) en pequeños frascos de vidrio.....	80
Calidad nutricional de maíz almacenado en silo bolsa.....	86
Almacenaje de sorgo en silo bolsa.....	94
Almacenamiento de cebada cervecera en silo bolsas.....	101
Almacenamiento de cebada cervecera en silo bolsas con diferentes contenidos de humedad.....	111
Almacenamiento de colza en silo bolsas herméticos.....	118
Silo bolsa de poroto. Concentración de dióxido de carbono en relación a las condiciones de almacenamiento.....	128
Conservación de arroz en silo bolsas. Una década de investigación en Argentina.....	138
Detección temprana de la variabilidad en la calidad de semillas crudas de algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>) conservadas en silo bolsas mediante mediciones de la concentración de CO ₂	149

3 Modelado

Simulación computacional de la difusión de gases en sistemas de almacenamiento hermético.....	165
Concentración de gases en la atmósfera intersticial de un silo bolsa con trigo. Parte I: desarrollo y validación del modelo.....	183
Concentración de gases en la atmósfera intersticial de un silo bolsa con trigo. Parte II: análisis de sensibilidad y efecto de las condiciones de almacenamiento del granos.....	202
Modelado matemático de perfiles de concentración de oxígeno y dióxido de carbono en la atmósfera intersticial del silo bolsa.....	218
Análisis de las condiciones de almacenamiento de un silo bolsa con trigo para diferentes condiciones climáticas mediante simulación computacional.....	231

4 Hongos y micotoxinas

Hongos toxigénicos en maíz almacenado en silo bolsas.....	255
Relación entre incidencia de <i>fusarium verticillioides</i> y variables de calidad de grano bajo condiciones de almacenamiento de maíz en Tucumán, Argentina.....	261

5 Hermeticidad y uso de fumigantes

Nivel de hermeticidad en silo bolsas para diferentes condiciones de almacenamiento.....	273
Fumigación de silo bolsas con fosfina.....	281

6 Logística y economía

Logística y economía de la cosecha de granos y sistemas de transporte con el uso de silo bolsas.....	299
Análisis económico del almacenamiento de granos en silo bolsas a través de una aplicación web.....	309

7 Miscelánea

Secado con aire a baja temperatura de granos de maíz almacenado en silo bolsas.....	319
Estudio del almacenamiento de granos en bolsas plásticas para pequeños agricultores.....	329
Una mirada interior al sistema de silo bolsa.....	341

Autores

Adriana Godoy	Darío Ochandio	Leopoldo Ploper
Alejandra Yommi	David Milanesio	Marcelo Pagliero
Alejandro Azcona	Diego Croce	Marcelo Schang
Alejandro Couretot	Dirk Maier	Mario Tourn
Allien Arias Barreto	Fabio Dominguez	Mauricia Sala
Analía Gastón	Facundo Marcos Valle	Mauricio Santa Juliana
Sebastián Audicio	Guido Botta	Oscar Pozzolo
Beatriz Peppi	Gustavo Clemente	Pablo Saleme
Bernadette Abadía	Hector Malinarich	Patrizia Busato
Bernardo Iglesias	Hernán Ferrari	Ramón Hidalgo
Bhadriraju Subramanyam	Hernán Urcola	Remigio Berruto
Carlos Campabadal	Jeremias Mutti	Ricardo Accietto
Catalina Aguaysol	John Lawrence	Ricardo Bartosik
Cecilia Diaz	José Massigoge	Ricardo Rodriguez
Channaiah Lakshmikantha	Juan Rodriguez	Rita Abalone
Claudia Castellari	Julian Juarez	
Cristiano Casini	Leandro Cardoso	

Prólogo

La tecnología de almacenamiento de granos en silo bolsa fue introducida en el país en el año 1994 debido a múltiples factores. Entre ellos se pueden citar la insuficiente capacidad de almacenamiento en instalaciones fijas, las dificultades económicas que llevaron a la quiebra de acopios comerciales y despertaron en el productor la necesidad de almacenar su propio grano y de diferir el envío del grano al acopio desde la cosecha para reducir costos de flete y comercialización.

A partir del año 1995, el INTA comenzó a realizar los primeros ensayos sobre silo bolsa en Argentina. Estas actividades se realizaron esporádicamente al principio y luego de manera consistente hacia finales de la década del '90, en las Estaciones Experimentales de Balcarce y Manfredi.

Simultáneamente se produjeron una serie de avances que permitieron la difusión masiva del silo bolsa en el país. En particular, las empresas metalmecánicas argentinas comenzaron a desarrollar equipamientos específicos tales como las embolsadoras de grano seco (resultando como estándar de la industria las máquinas para silo bolsa de 9 pies), las extractoras que combinaron capacidad de trabajo con simplicidad de uso y las tolvas autodescargables que permitieron acoplar la creciente capacidad de trilla de las cosechadoras con el almacenamiento en silo bolsa.

En el año 2004 se realizó el primer Convenio de Asistencia Técnica entre el INTA y las principales empresas fabricantes de silo bolsa del país, incluyendo a Industrias Plásticas por Extrusión S.A. (IPESA), Plastar San Luis S.A. (Plastar) y Venados Manufacturas Plásticas S.A. (Inplex). El objetivo del mismo fue fortalecer la investigación en la temática sumando esfuerzos públicos y privados. Años después, se confirmaría que esta vinculación constituyó un hito en la evolución del silo bolsa. Actualmente, permanecen dentro del Convenio el INTA, IPESA y Plastar.

Gracias a esta iniciativa, a partir del año 2004 y con continuidad a la fecha se fue consolidando una red de investigación y adaptación de tecnologías de silo bolsa entre INTA y otras instituciones asociadas a lo largo y ancho del país, incluyendo las provincias de Chaco (EEA Las Breñas), Salta (EEA Salta), Córdoba (EEA Manfredi), Corrientes (UNNE), Entre Ríos (EEA Concepción del Uruguay y EEA Paraná), Tucumán (EEA Famaillá), Santa Fe (FCEIA - UNR) y Buenos Aires (EEA Balcarce, EEA Barrow y EEA Pergamino).

A través de las actividades de esta red, en una primera etapa se logró sentar las bases técnicas del almacenamiento de cultivos tradicionales (trigo, maíz, soja y sorgo principalmente) y de importantes cultivos regionales (poroto y arroz). También se establecieron los fundamentos científicos de la tecnología de monitoreo de granos almacenados en silo

bolsa a través de la medición de dióxido de carbono. Estos trabajos fueron publicados en el Primer Libro de Almacenamiento de Granos en Bolsas Plásticas: Resultados de investigación 2004 - 2009.

A partir del año 2008, la tecnología de silo bolsa alcanzó nuevas fronteras. La adopción del silo bolsa en Argentina resultó de tal magnitud que desde entonces se embolsan unos 40 millones de toneladas cada año. La incorporación del silo bolsa en la estructura de poscosecha se dio no sólo a campo por parte de los productores, sino también en los acopios, la agroindustria (molinos harineros, malterías, etc.) y los puertos.

Por otra parte, las soluciones que el silo bolsa le brindó a nuestro país no han pasado desapercibidas para el resto del mundo. La capacidad de almacenamiento flexible y a bajo costo, las ventajas logísticas, la reducción de pérdidas, el almacenamiento en origen y la trazabilidad de la mercadería, entre otras, constituyeron enormes atractivos para su implementación en otros países. Actualmente, el paquete tecnológico de silo bolsa se exporta a más de cincuenta países, incluyendo silo bolsas, embolsadoras, extractoras, carros tolva autodescargables y otros equipamientos relacionados.

La idea de editar este Segundo Libro de Almacenamiento de Granos en Silo Bolsas: Resultados de investigación 2009 – 2013 surge por varias razones. La primera es la disponibilidad de nueva información que se fue generando luego de la presentación del Primer Libro de Silo Bolsas. Los nuevos trabajos abarcan pautas de almacenamiento de granos (cebada, girasol, colza, etc.), modelado del ecosistema del silo bolsa, estudios logísticos y económicos, posibilidades de monitoreo, control de plagas y bases del entendimiento de la problemática de hongos y micotoxinas de los granos almacenados en silo bolsa. El segundo motivo, nuestra satisfacción por ver agotada la primera edición, lo cual nos induce a pensar que estamos interpretando correctamente las necesidades de los usuarios de silo bolsas. El tercero, celebrar los 10 años de vigencia del Convenio de Asistencia INTA - Empresas Fabricantes de Bolsas Plásticas, un claro ejemplo del potencial que pueden desarrollar las instituciones públicas y las privadas cuando cooperan para alcanzar objetivos comunes.

Los que participamos de este Convenio estamos orgullosos de poder realizar un humilde aporte al desarrollo del sector agroalimentario y agroindustrial del país y de aportar conocimientos al mundo para reducir las pérdidas de poscosecha, preservar la calidad, sanidad e inocuidad de los granos, con el propósito último de mejorar la soberanía alimentaria de los pueblos.

1

Introducción

El silo bolsa es considerado un sistema de almacenaje temporario y hermético, apto para el almacenamiento de todo tipo de granos, semillas, forrajes, subproductos y fertilizantes sólidos. El concepto de temporario hace referencia a que el silo bolsa no puede reutilizarse, y no al plazo en que el producto puede ser almacenado de forma segura. Por su parte, la condición de hermeticidad se logra únicamente si la bolsa no posee perforaciones y sus extremos están correctamente cerrados.

Los resultados de las investigaciones demuestran que la calidad del grano almacenado en silo bolsas se preserva por períodos más prolongados cuando: 1) el grano es embolsado seco (humedad de recibo o inferior) y 2) la bolsa se conserva intacta y cerrada, es decir, el sistema es hermético. El bajo contenido de humedad previene que el grano tenga una alta tasa respiratoria y que los hongos del almacenaje se desarrollen activamente (ambos procesos redundan en un deterioro de la calidad del grano). A su vez, un silo bolsa intacto evita la entrada de agua y el consecuente humedecimiento del grano.

La hermeticidad del sistema posee otra implicancia relevante para el almacenamiento: la formación de una atmósfera automodificada en el interior del silo bolsa. La automodificación de la atmósfera se debe a la respiración del granel (granos, hongos e insectos), en virtud de la cual se va consumiendo el oxígeno y acumulando el dióxido de carbono. Esto deriva en cambios en la composición de la atmósfera interior del silo bolsa respecto de la composición atmosférica normal del exterior. La modificación atmosférica puede afectar el desarrollo de insectos y hongos perjudiciales para el grano y, por lo tanto, favorece la conservación de la calidad.

Componentes del sistema silo bolsa

Mauricio Santa Juliana¹
Leandro Cardoso²

Los elementos fundamentales que intervienen en esta tecnología son el silo bolsa, la máquina embolsadora, la máquina extractora y la tolva autodescargable.

¹INTA EEA Manfredi (Córdoba), Argentina

²INTA EEA Balcarce (Buenos Aires), Argentina

El silo bolsa: es un envase constituido por una mezcla de polietileno de aproximadamente de 235 μm de espesor y fabricada por el proceso de coextrusado. Está constituida por Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE) y Polietileno de Baja Densidad (LDPE). El primero es el responsable de contribuir la resistencia mecánica del silo bolsa, por lo que se busca incrementar su participación en la mezcla en más del 50,0%. Mientras tanto, el LDPE confiere estabilidad de burbuja necesaria durante el proceso de coextrusión, necesaria por el gran diámetro del silo bolsa.

La funcionalidad de un silo bolsa está relacionada con la cantidad de capas que contenga el film. En general, coextrusiones de 3 capas son suficientes para alcanzar los requerimientos de la aplicación. La capa exterior del silo bolsa es blanca (dióxido de titanio) para reflejar los rayos solares; tiene aditivos, filtros de UV y además de estabilizantes de rayos ultravioletas. Posee una capa central, neutra y por último la capa interior, con un aditivo (negro humo) para protección de los rayos ultravioletas y evita la penetración de la luz. En la actualidad, ya existen empresas con capacidad de fabricar silo bolsas de hasta 5 capas.

Al tratarse de compuestos orgánicos, estos envejecen por radicales libres y su nivel de actividad depende de la temperatura, radiación, como así también del esfuerzo mecánico al que el silo bolsa es sometido. Por lo tanto es importante que durante todo el proceso de embolsado se respeten los niveles de estiramiento recomendados por los fabricantes, ya que esto garantizará un almacenaje exitoso, sobre todo en aquellos casos donde el silo bolsa permanecerá armado en períodos de alta temperatura ambiente.

El proceso de compactación que se lleva a cabo durante el almacenaje exige que los materiales resistan a las fuerzas de compresión y de tracción generadas. Dentro de todas las propiedades mecánicas, el rasgado en dirección de la embolsadora resulta ser la propiedad más crítica ya que valores bajos (menores a 1500 g) pueden ocasionar que la bolsa se abra longitudinalmente. La resistencia al punzonado también es importante en el desempeño del polietileno, porque hace referencia a la fuerza necesaria para perforar el silo bolsa. Rastrojos, piedras, o incluso las aves pueden perforar el silo, con lo cual, valores altos de resistencia al punzonado contribuyen a obtener un sistema de almacenaje más seguro, con una garantía ante agentes climáticos (excepto piedra y granizo) de 24 meses.

Se presentan comercialmente diámetros de 1,5 m, 1,8 m, 2,0 m, 2,4 m, 2,7 m, 3,0 m, 3,7 m y 4,3 m, con una longitud de 60,0 m, 70,0 m, 75,0 m, 90,0 m y 100,0 m. Las capacidades disponibles actualmente en el mercado, van desde las 55,0 - 60,0 toneladas hasta las 500,0 - 510,0 toneladas, siendo la capacidad más utilizada la de 200,0 toneladas (base trigo, 2,7 m de diámetro y 60,0 m de largo).

La máquina embolsadora: es un implemento que se utiliza para cargar (depositar) el grano en el silo bolsa. Consta de una tolva de recepción, ubicada en el sector superior de la máquina embolsadora, que permite recepcionar el grano desde la tolva autodescargable u elemento alimentador de grano. Es importante que posea una buena capacidad, que esté alineada verticalmente con el centro del eje de la embolsadora, de esta forma se transmite en el peso a las ruedas y facilita la tarea de frenado. En algunas embolsadoras la tolva está provista de tapas con aletas protectoras de ráfagas, que otorgan mayor amplitud, facilitan la tarea de descarga, reducen los movimientos de la tolva y las pérdidas por derrame de cereal.

El sinfín de llenado es accionado, a través de transmisión cardánica, por la toma de fuerza del tractor. Su función es transportar el grano desde la tolva de recepción al silo bolsa,

debe ser de un gran diámetro, gran sección de ala (o espira) y con una mínima inclinación, evitando así dañar a los granos. El mismo debe trabajar a bajas rpm (generalmente a 540 rpm). Debe permitir un recambio fácil y rápido, ya que generalmente es un elemento de alto desgaste. Actualmente se incorporación sinfines de hasta 450 mm, elevó la capacidad de trabajo a más de 400,0 toneladas/hora, a flujo constante, con una potencia demandada de alrededor de 60 CV. En Argentina se ha diseñado embolsadoras denominadas de “gravidad cero”, donde el llenado del silo bolsa se realiza por el propio peso específico del grano (sin sinfín). Esta embolsadora tiene como ventaja un mejor tratamiento del grano y que no necesita de un tractor. Para dar con el correcto estiramiento posee los sujeta pliegues a rodillos y también es posible optimizar el llenado a través de la inclinación del túnel, llevándolo hacia delante o hacia atrás de la máquina para mayor o menor de llenado.

El túnel es la estructura donde el silo bolsa se encuentra montado mientras está plegado, por dentro se forma la cámara de llenado, conectada al sinfín que vuelca el grano proveniente de la tolva de recepción. El túnel debe ser diseñado de forma tal que logre un llenado parejo sin zonas de sobrecarga. Mientras más largo sea el túnel menores esfuerzos puntuales soportará el silo bolsa. En general presentan una inclinación para que el peso del grano, mientras el túnel se llena, se traslade hacia los neumáticos de la embolsadora, de manera que se logre un mejor frenado. Se observan dos diseños: 1) túnel estructuralmente aplanado, similar a la forma que adoptará la bolsa al llenarse; con este tipo de túnel se realiza un estiramiento más efectivo de la parte inferior del plástico y la embolsadora no requiere de los escudos laterales; 2) la forma de túnel es más alta y redondeada, permitiendo tener en un punto más elevado de la salida del sinfín de llenado. Este tipo de túnel aprovecha mejor la fuerza que ejerce el grano sobre la embolsadora al buscar su ángulo de reposo; esto implica que, en general, no se necesite que el sinfín ejerza presión sobre el grano en la cámara de llenado para lograr el estiramiento final del silo bolsa. En general este diseño de túnel requiere la asistencia de los escudos laterales, cuya función es prevenir que exista un sobrellenado del silo bolsa o retorno de cereal en este sector. La acumulación de grano en los laterales del silo bolsa incrementa el riesgo de rasgado en aquellos casos donde se sobrepasa la capacidad de estiramiento recomendada.

Complementa la estructura del túnel la bandeja inferior, cuya función es evitar el zafe de los pliegues desde abajo y el retorno de cereal.

El sistema de frenos, mediante su accionamiento y regulación, permite que operario pueda brindar el correcto estiramiento del silo bolsa. Existen 2 sistemas de frenos: 1) aquellos que trabajan por rozamiento sobre el neumático (frenos de “zapata”) y 2) el sistema de frenos a disco, que si bien es más costoso, prescinde de las condiciones del neumático (patinamiento por agua, baja presión de inflado, desgaste de los neumáticos, etc.). A su vez, cuando los comandos se encuentran dispuestos de un solo lado de la máquina, el sistema de frenos a disco es más seguro en su operación. Esto es por que se evita que el operario esté circulando constantemente, de una rueda a otra de la embolsadora, durante el momento de embolsado. Además, como este sistema utiliza manómetros para indicar la presión de frenado, permite realizar ajustes más precisos sobre el estiramiento del silo bolsa. En este sentido es imprescindible tener un buen rodado con buena superficie de contacto (tipo vial) para asegurar una mayor adherencia al terreno.

Respecto a seguridad, es importante que la embolsadora cuente con las protecciones que cubran completamente a todas las piezas móviles (acoples cardánicos y transmisio-

nes) con las correspondientes advertencias sobre los riesgos en etiquetas con pictogramas y en el manual del operador. También ayudará a minimizar el riesgo de lesiones la presencia de pasamanos y plataformas antideslizantes. En lo que se refiere a seguridad vial, es importante contar con luces y balizas que no interfieran al momento del embolsado y que cumplan con normas internacionales (IRAM 8076-0:2001 equivalentes a las internacionales ISO o Europeas EN1553:2000).

Otros elementos técnicos importantes son: 1) la percha, que a través de un malacate permite elevar el silo bolsa para montarlo en el túnel; 2) pies laterales, que mantienen la posición de la máquina cuando se debe retirar el tractor y evitan que la misma se desplace generando baches en la confección del silo; 3) escudo de freno o ancla, básicamente es un deflector ubicado en la parte inferior del túnel de embolsado, actúa dentro de la masa de granos generando resistencia al avance de la embolsadora, mejorando la compactación y al mismo tiempo demandando un menor esfuerzo de los frenos.

La máquina extractora: es un implemento que se utiliza para descargar (extraer) el grano del silo bolsa. Al igual que la embolsadora, se caracteriza por ser una máquina muy simple en su construcción y en su operación.

Si bien actualmente hay más de un tipo de extractora, el mercado prevalecen las extractoras con el sistema de avance hidrostático. Su principio de funcionamiento consiste en un rolo hidráulico que enrolla la bolsa, traccionando a la extractora y al tractor. Mientras tanto los sinfines, accionados por la toma de fuerza del tractor (540 rpm), recolectan el cereal. Su capacidad promedio de trabajo actualmente es de 300,0 - 360,0 toneladas/hora. Para alcanzar estos valores poseen sinfines de descarga de 400 mm y sinfines barridores u horizontales de 260 mm aproximadamente, estos recolectan el cereal a lo ancho del silo bolsa hasta una cámara central de recepción, donde es tomado por el sinfín de descarga. Para incrementar el caudal de grano también se mejoró el diseño de la cámara, reduciendo la turbulencia y facilitando el ingreso del material al sinfín de descarga. También se hicieron modificaciones en la transmisión de engranajes, para que el aumento de la capacidad de trabajo no implique un incremento significativo en la potencia requerida (estimada entre 60 y 75 HP). A su vez se trabajó para que el flujo de grano sea más uniforme, reduciendo así el porcentaje de daño mecánico en el grano. Este tipo de extractora permite trabajar con silo bolsas de 2,0 m, 2,7 m y 3,0 m de diámetro, adicionando o quitando secciones de los sinfines barridores, o bien empleando un rolo angosto con “encausadores de silo bolsa”.

El ritmo de trabajo se fija ajustando la velocidad del rolo, a través de comandos hidráulicos centralizados, que también regulan el plegado del tubo de descarga y el despeje de la máquina al suelo. Los comandos hidrostáticos además permiten realizar regulaciones en altura del rolo y su sentido de giro. Para extraer el grano se requiere un sistema de corte del silo bolsa, que típicamente consiste en una cuchilla ubicada sobre el sinfín de descarga, en la misma línea de trabajo que los sinfines barridores. Esta ubicación permite que la cuchilla corte el plástico en un sector con poca tensión para evitar que se produzca su rasgado; otro elemento de corte utilizado es el sistema de alambre caliente.

En materia de seguridad del operario, los sinfines barridores deben ser accionados a través de un sistema de acople y desacople rápido. Es necesario que los sinfines barridores cuenten con rejillas de seguridad y que su diseño no afecte el caudal de grano. En cuanto al sistema de transmisión, es más seguro que este pueda destrabarse automáticamente ha-

ciendo girar el rolo con el sistema hidráulico. El conjunto que comanda todas las funciones debe estar bien ubicado para evitar accidentes durante la operación de descarga.

La tolva autodescargable: es un carro con una gran tolva que se utiliza para llevar directamente el grano desde la cosechadora a la embolsadora. Esta tolva consta además de un gran tornillo sinfín que transporta el grano a la tolva de la embolsadora.

Su evolución ha acompañado la tendencia en cosechadoras, hacia una mayor capacidad operativa. Su capacidad de carga fue evolucionando desde 8,0 - 10,0 toneladas a 18,0 toneladas en tolvas autodescargables de un solo eje, de 16,0 a 26,0 toneladas en tolvas de 2 ejes, hasta más de 30,0 toneladas para tolvas de un eje y balancín trasero, o doble balancín. En general las características deseables en autodescargables son:

Para la operación de descarga es importante que la tolva cuente con guillotina de corte hidráulico, lo cual permite comenzar la operación en vacío y regular la velocidad de descarga. El sinfín de descarga debe ser de gran diámetro (400 mm o más) para permitir una alta capacidad de trabajo (puede llegar a los 10,0 toneladas/minuto), sin aumentar el daño mecánico de los granos. Un sinfín de gran diámetro también permite aprovechar mejor la potencia del tractor, ya que para una tolva de 25,0 toneladas de capacidad, es necesario contar con 120/150 HP en suelos normales a 150/180 HP en suelos blandos. Los sinfines de piso con diferentes pasos permiten una descarga más equilibrada. La implementación de un babero direccional en el extremo del tubo de descarga permite evitar continuos movimientos del tractor. También es de interés que el tubo de descarga cuente con iluminación para facilitar la tarea en momentos de poca luz. Los mandos cardánicos deben contar con protección plástica y fusible de seguridad, para evitar el giro del sinfín, muy útil en caso de atascamiento.

En la operación de carga es imprescindible contar con un visor de llenado para evitar el derrame de granos. Actualmente existen sistemas de sensores ubicados en el interior de la tolva, a 25,0 cm del borde, que funcionan por contacto e indican la distribución del grano a través de un monitor en la cabina del tractor. Mientras tanto, otro monitor se ubica en la cosechadora, el cual recibe los datos de forma inalámbrica y finaliza automáticamente la descarga. También es útil que la tolva cuente con la posibilidad de incorporar una balanza electrónica, para registrar la información del peso de carga.

El diseño de una tolva con bajo centro de carga y amplia pisada permite el transporte de alta velocidad sin riesgos, evitando tirones al tractor. Sobre este punto también es importante que la lanza de tiro posea acople al tractor mediante rótula y amortiguación con bujes de goma. Además, su diseño debe permitir cierta transferencia de carga al eje trasero del tractor (lastrado dinámico) para tolvas de un solo eje. Los neumáticos de alta flotación, con amplio rodado, facilitan el tránsito en terrenos blandos sin dañarlos. Si a esto se le suma la regulación de presión de aire, que puede aumentar la presión en carreteras y disminuirla para reducir compactaciones en suelos blandos, se permite optimizar la vida útil de los neumáticos y mejorar la seguridad durante el traslado en ruta. Un avance sobre este tema es el se diseño de un sensor ultrasónico, que calcula el shock de absorción de los neumáticos en movimiento y emite una señal a un monitor. De acuerdo a la velocidad y carga del vehículo, permite regular la presión mínima admisible compatible con la prolongación de la vida útil del neumático y la reducción de la compactación superficial, aspecto muy importante en siembra directa.

Otras características aspectos de diseño son que la tolva tenga una gran robustez con una mínima tara, sistema de engrase externo, centralizado y de fácil mantenimiento, entre otras.

El sistema de almacenamiento de grano en silo bolsa

En la Argentina el almacenamiento en silo bolsa está completamente arraigado para granos tradicionales -maíz, soja, trigo, sorgo y girasol- y en desarrollo para productos no tradicionales y subproductos -cebada, arroz, poroto o burlanda-. Esta tecnología se desarrolló con el trabajo conjunto de la industria metalmeccánica, los productores y los investigadores del INTA.



Recorrido del grano



Desplazamiento de la embolsadora

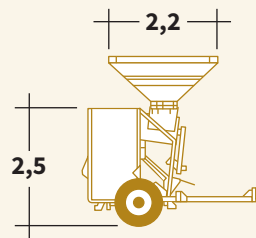
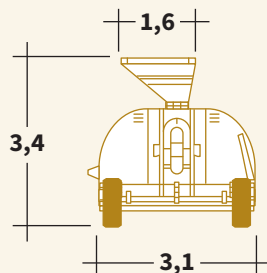
Cómo se embolsa el grano



EMBOLSADORA

Ejemplo de una embolsadora para silo bolsas de 9 pies de diámetro.

Medidas promedio de mercado, en metros



Referencia de tamaño



Tecnología para la extracción de granos

La maquinaria empleada para el embolsado y extracción del grano en el silo bolsa ha evolucionado con el tiempo en función de una mayor practicidad de la operación, capacidad (t/h) de trabajo y mayor seguridad para el operario.



Recorrido del grano



Desplazamiento de la extractora

Cómo se extrae el grano

1

Se abre un extremo del silo bolsa y se coloca el cabezal del implemento dentro de la bolsa.

2

Dos sinfines horizontales “barren” la bolsa y trasladan el grano hacia un sinfín elevador.

3

Durante el vaciado una cuchilla abre la bolsa, a medida que avanza la extracción.

5

Un sinfín elevador de gran porte descarga el grano en una tolva autodescargable.

4

A medida que se recoge el grano un rolo hidrostático enrolla la bolsa vacía. Este enrollado arrastra el conjunto extractora/tractor.



FINAL DE BOLSA

El manejo adecuado de la tecnología en el final de bolsa permite terminar la descarga sin pérdida de grano.

REGULADO DE CAUDAL

Con una válvula reguladora de caudal se controla el flujo de descarga del grano y el avance de la máquina.

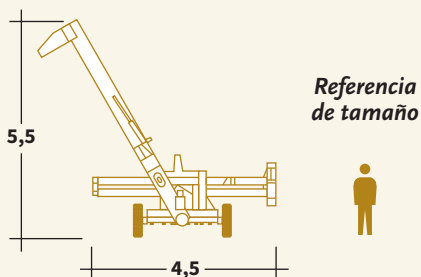
TRACTOR

La extractora debe acoplarse a la toma de fuerza de un tractor con una potencia mínima de al menos 60 Hp.

EXTRACTORA

Ejemplo de una extractora para silo bolsas de 9 pies de diámetro.

Medidas promedio de mercado, en metros



Referencia de tamaño

Embolsadoras y extractoras de granos son maquinarias de manejo sencillo y costo relativamente bajo, evaluando su costo-beneficio. Su incorporación amplía las posibilidades logísticas de productores y acopiadores.

Manejo de granos en silo bolsas

Bernadette Abadía¹
Ricardo Bartosik¹
Leandro Cardoso¹

Como se mencionó anteriormente, en líneas generales el éxito del almacenamiento en silo bolsa radica fundamentalmente en dos factores: embolsar grano seco y mantener la integridad física del silo bolsa durante todo el almacenamiento. La baja humedad evitará el desarrollo de hongos y el deterioro de calidad asociado a los mismos. La integridad física del silo bolsa, por su parte, evitará la entrada de agua (evitando el humedecimiento del grano) y, al mismo tiempo, de insectos. De esta forma, si el grano se embolsa libre de infestación, será posible preservarlo en dicha condición durante todo el almacenamiento sin necesidad de aplicar insecticidas.

Si bien en la actualidad Argentina es líder en el desarrollo y uso de esta tecnología, se suelen cometer errores en su implementación que ponen en riesgo la calidad de la mercadería almacenada. Se destacan por su frecuencia la aparición de silo bolsas armados en zonas anegables o sobre rastrojos, bolsas mal cerradas, flojas, rotas y conteniendo grano excesivamente húmedo.

Aunque algunas problemáticas son comunes a las observadas en los sistemas tradicionales de almacenamiento, muchas son específicas del silo bolsa. A continuación se ofrecen algunas recomendaciones para obtener la máxima calidad e inocuidad del grano almacenado en silo bolsas.

Elección del terreno y planificación de la ubicación de los silo bolsas

El armado de silo bolsas requiere planificación y el primer aspecto a tener en cuenta es el lugar de emplazamiento. Lo óptimo es destinar un sector permanente en donde se emplazarán los silo bolsas durante las sucesivas campañas. La posibilidad de utilizar un solo lugar simplificará el monitoreo y cuidados posteriores, como ser mantenerlo libre de

¹INTA EEA Balcarce (Buenos Aires), Argentina



Figura 1.
Silo bolsa emplazado en terreno anegable.

malezas y la implementación de un cerco eléctrico para evitar el daño que ocasionan animales.

Adicionalmente, se deberá tener en cuenta los siguientes puntos:

- El terreno donde se ubicarán los silo bolsas debe ser elevado y con una leve pendiente para evitar anegamientos (Figura 1), ya que cualquier rotura o un mal cierre implicaría la entrada de agua y la posterior pérdida de calidad. Además, si el sitio es anegable no se podrá acceder a extraer la mercadería. El lugar seleccionado también deberá estar alejado de árboles y cortinas forestales, para disminuir el riesgo de roturas por caída de ramas.

El terreno donde se ubicarán los silo bolsas debe estar limpio, sin malezas ni rastrojos que puedan perforar el plástico en la base (Figura 2 a). Por lo tanto, si fuera necesario se debe realizar una pasada de algún implemento tipo pala o rabasto (Figura 2 b). Esta práctica además permite darle una leve pendiente al terreno para evitar anegamientos y mejora notablemente la capacidad de frenado de la embolsadora, resultando en un silo bolsa más parejo (Figura 2 c). No es necesario remover el suelo con una herramienta de labranza pesada; esto provocaría una pérdida de adherencia de la máquina embolsadora, que redundaría en problemas para lograr un correcto llenado del silo bolsa.

- En terrenos con pendientes pronunciadas debe trabajarse en contra de la misma en sentido ascendente, para que el llenado se realice de manera controlada y homo-



Figura 2.
Emplazamiento de bolsas en terrenos con rastrojos.
a. Silo bolsa emplazado sobre rastrojo sin alisar. b. Pala para alisado del terreno. c. Silo bolsa emplazado sobre terreno alisado.



Figura 3.

Fotografía aérea de silo bolsas.

Nótese el correcto agrupamiento de los silo bolsas en grupos de 2 o 3 unidades; esta configuración permite la rápida extracción de cualquier silo bolsa en caso de detectarse deterioros de calidad del grano.

génea. Esta práctica debe estar acompañada con todos los recaudos posibles para que el final del silo bolsa quede cerrado herméticamente. Si esto no ocurre, es posible que en algún momento del almacenaje se produzca la entrada de agua al silo bolsa, que al tener la pendiente a favor, puede circular por el fondo de la misma.

- La orientación del silo bolsa debe ser en lo posible Norte - Sur, para que reciba a lo largo del día la misma cantidad de radiación en ambos laterales, disminuyendo así los riesgos de migración de humedad en aquellos casos donde se almacenó grano húmedo.
- Si en un mismo playón se planea ubicar varios silo bolsas, es recomendable disponer los silo bolsas de a 2, o a lo sumo agrupadas de a 4 (Figura 3). Entre los silo bolsas de cada grupo debe existir el espacio suficiente para que un operario pueda acceder a cualquier silo bolsa para inspeccionar su integridad física. Entre grupos de silo bolsas deberá existir la distancia mínima para que pueda ubicarse la tolva o camión durante la extracción del grano (en la periferia del grupo). Esto permitirá establecer planes de extracción de acuerdo a un sistema de monitoreo y, ante un problema importante de cualquiera de los silo bolsas, se podrá acceder al mismo sin inconvenientes.

Confección del silo bolsa

En la etapa de la confección del silo bolsa se deben extremar todos los recaudos para lograr un correcto llenado y partir de una adecuada hermeticidad inicial. Esto permitirá reducir la incidencia de insectos (y por ende la necesidad de aplicación de insecticidas) y el riesgo de desarrollo de hongos y micotoxinas, manteniéndose así la calidad e inocuidad del grano con mínimas alteraciones. Para esto se recomienda:

- Sellar perfectamente los extremos del silo bolsa para evitar la entrada de aire, agua e insectos. Para ello recomienda el uso del termosellado o en su defecto, el uso de tablas (Figura 4).
- Levantar la máquina embolsadora (dependiendo de la máquina, entre 15,0 cm a 30,0 cm del suelo) y luego efectuar el llenado estirando el silo bolsa tanto como la regla de estiramiento del fabricante lo permita, para eliminar la mayor cantidad de aire de su interior.
- Extremar los recaudos para lograr un silo bolsa bien parejo, no dejar baches (depressiones) en la parte superior (Figura 5), por su propensión a la condensación de humedad, sobre todo si se almacenan granos húmedos. Para esto se requiere el correcto funcionamiento de los frenos de la embolsadora, un terreno firme y parejo y que los pliegues del silo bolsa estén bien sujetos.
- Antes de embolsar cada partida de granos que proviene del campo, es imprescindible determinar los parámetros más importantes por cada tolva, tal como humedad, materias extrañas, etc., y registrar esa información. Estos datos permitirán asignar diferentes niveles de riesgo de deterioro entre silo bolsas e incluso delimitar sectores dentro del mismo silo bolsa y, por lo tanto, orientarán el criterio del monitoreo.

Figura 4.

MÉTODOS RECOMENDADOS PARA EL CIERRE DEL SILO BOLSA

Cierre por tablas



Procedimiento de termosellado, mediante máquina termoselladora





Figura 5.
Depresión en la superficie del silo bolsa.

Monitoreo de la calidad del grano almacenado

Una vez confeccionado correctamente el silo bolsa, es importante realizar un monitoreo sistemático del sistema de almacenamiento para prevenir, diagnosticar y solucionar problemas antes que se afecte la calidad del grano almacenado. Como se detallará a continuación, el tiempo que puede almacenarse un determinado grano de forma segura depende de múltiples factores (como humedad, calidad inicial, temperatura ambiente, hermeticidad del sistema de almacenamiento) y, por lo tanto, en la medida que el almacenamiento se aparte de las condiciones óptimas, mayor deberá ser la frecuencia de muestreo para detectar cuanto antes el deterioro de calidad.



Figura 6.
a. Silo bolsa con roturas causadas por animales. **b.** Cerco eléctrico para evitar que los animales ataquen al silo bolsa. El pasto debe estar corto para el correcto funcionamiento del cerco.

El monitoreo del sistema de almacenamiento puede dividirse en dos aspectos complementarios: de la integridad física del silo bolsa y de la calidad del grano almacenado. El monitoreo de la integridad física del silo bolsa es fundamental ya que durante el almacenaje es común que se produzcan roturas del plástico del silo bolsa por diferentes causas (clima, animales, descuidos en la confección o en el muestreo, entre otros) que comprometen la hermeticidad del sistema (Figura 6 Izq.). El monitoreo periódico permite detectar a tiempo las roturas y sellarlas. Además, es útil determinar causas y frecuencia de roturas para cuantificar el problema y planificar soluciones (ejemplo: colocar cerco eléctrico para animales o cebos en el caso de roedores).

Por su parte, el objetivo de monitorear la calidad de los granos es obtener información para tomar mejores decisiones. Aunque visualmente el silo bolsa no presente ninguna alteración, la calidad del grano puede verse afectada por otros factores de modo que la frecuencia del muestreo de calidad del grano deberá aumentar conjuntamente con el nivel de riesgo. Los de mayor importancia son:

- **Humedad del grano:** el riesgo de deterioro del grano es alto si la humedad es superior a la tolerancia de recibo (Tabla 1). Visto de otro modo, el tiempo de almacenamiento seguro de grano embolsado seco será mayor al del grano embolsado húmedo (Tabla 2). La presión de muestreo debe ser mayor en caso de grano húmedo.

Tabla 1.
Riesgo por humedad del grano (valores orientativos).

TIPO DE GRANO	BAJO*	BAJO - MEDIO	MEDIO - ALTO
Soja - Maíz - Trigo	Hasta 14,0%	14,0% - 16,0%	Mayor a 16,0%
Girasol	Hasta 11,0%	11,0% - 14,0%	Mayor a 14,0%

*Para semillas de este valor debe ser de 1,0% - 2,0% menor.
Fuente: elaboración propia en base a ensayos de INTA PRECOP.

Tabla 2.
Riesgo por tiempo de almacenamiento (valores orientativos).

TIPO DE GRANO	BAJO*	BAJO - MEDIO	MEDIO - ALTO
Soja - Maíz - Trigo 14,0%, Girasol 11,0%	6 meses	12 meses	18 meses
Soja - Maíz - Trigo 14,0% -16,0% Girasol 11,0% - 16,0%	2 meses	6 meses	12 meses
Soja - Maíz - Trigo >16,0% Girasol >16,0%	1 mes	2 meses	3 meses

*Para semillas de este valor debe ser de 1,0% - 2,0% menor.
Fuente: elaboración propia en base a ensayos de INTA PRECOP.

- **Temperatura ambiente:** a diferencia de lo que ocurre con los sistemas tradicionales de almacenamiento (silos y celdas), la temperatura del grano almacenado en silo bolsas oscila notablemente a lo largo del día y aun más entre estaciones del año, siguiendo un patrón muy similar al de la temperatura ambiente. Por esta razón, temperaturas ambiente elevadas aceleran los procesos de deterioro del

grano, sobre todo si fue embolsado húmedo. Este fenómeno es particularmente marcado en el estrato superior del silo bolsa. Por lo tanto, la presión de muestreo debe ser mayor en épocas y zonas geográficas cálidas (Tabla 3).

- **Calidad inicial del grano:** si se almacena grano de baja calidad (elevado porcentaje de granos chuzos, partidos, materias extrañas, etc.) el riesgo de deterioro es mayor que si se almacena grano sano y limpio. La presión de muestreo debe ser mayor en caso de grano de baja calidad inicial (ver Tabla 3).

En la Tabla 3 se presentan distintas frecuencias según la humedad de embolsado y época del año. Los lapsos mencionados son orientativos y de utilidad sólo si el silo bolsa visualmente mantiene su integridad física (se considera los riesgos por roturas en la zona inferior del silo bolsa).

Tabla 3.

Frecuencia de muestreo con distintas condiciones del grano y ambiente.

CONDICIONES DE EMBOLSADO	HUMEDAD (%)	CALIDAD DE GRANO	FRECUENCIA DE MUESTREO	
			Invierno*	Verano*
Adecuadas	1 punto inferior a recibo	Buena	90 días	90 días
	1 punto superior a recibo	Buena - Media	45 días	35 días
	2 o más puntos superior a recibo	Buena	35 días	20 días
	2 o más puntos superior a recibo	Media - baja	20 días	15 días
Inadecuadas	Aumentar la frecuencia conforme al riesgo de entrada de agua al silo bolsa. <i>Riesgo de rotura inferior por rastrojo o malezas + riesgo de anegamiento (dado por la ubicación en el relieve y frecuencia de lluvias durante el almacenaje).</i>			

*En otoño o primavera considerar lapsos intermedios a los de invierno y verano.

Fuente: elaboración propia en base a ensayos de INTA PRECOP.

Paralelamente, el muestreo de calidad del grano puede realizarse mediante extracción de muestras de grano o bien mediante la medición de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) dentro del silo bolsa. Para el monitoreo por extracción de muestra de grano normalmente se emplea un calador tipo sonda de 1,8 m de longitud (la longitud debe permitir tomar una muestra en el diámetro mayor del silo bolsa). El calador se inserta en forma diagonal, desde el lateral - superior del silo bolsa hacia la zona centro - inferior del mismo (Figura 7), a través de un orificio realizado en la pared de el silo bolsa (Figura 8). La muestra extraída puede ser analizada *in situ* para detectar presencia de olores objetables, granos dañados, verdín, etc., y/o puede ser derivada para otros análisis como poder germinativo y calidad comercial.

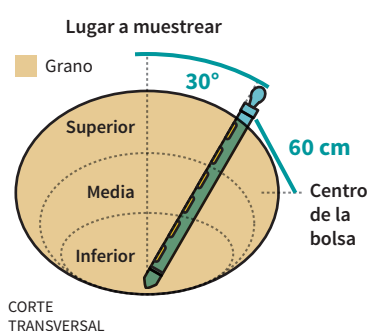
Respecto del número de sitios a muestrear, éste dependerá de la homogeneidad de la mercadería. Cuanto más desparea sea la calidad y la humedad del grano, mayor deberá ser el número de sitios a muestrear. Si las condiciones iniciales del grano son homogéneas (su humedad principalmente) se recomienda un mínimo de 3 sitios a calar, coincidentes con los sectores de mayor riesgo. En caso de no conocer las condiciones iniciales del grano se requiere muestrear en al menos 6 sitios. En caso de surgir roturas, es conveniente calar en zonas adyacentes a las mismas dado el mayor riesgo.

Una vez extraída la muestra, se debe proceder al correcto sellado del orificio (ver sección sellado).

Figura 7.

INSERCIÓN DEL CALADOR EN EL SILO BOLSA

Esquema de la posición del calador durante el muestreo en un corte transversal



Procedimiento



Figura 8.

Orificio realizado en la pared del silo bolsa para inserción del calador.

Por su parte, el principio del monitoreo de calidad de granos mediante la concentración de CO_2 se basa simultáneamente en la respiración aeróbica de los componentes bióticos del granel (granos, microorganismos e insectos) y en la baja permeabilidad del silo bolsa al pasaje de los gases.

Más específicamente, el silo bolsa es un sistema de almacenamiento hermético (siempre que esté correctamente cerrada y sin roturas), a diferencia de las estructuras tradicionales de almacenamiento en las que existe un libre intercambio de gases entre el interior y el exterior. Los granos confinados en un ambiente hermético respiran (consumiendo oxígeno y generando CO_2) y así generan una auto-modificación de la atmósfera intergranaria.

En particular, un estudio realizado en la Estación Experimental Agropecuaria Balcarce de INTA durante el invierno - primavera de 2006 determinó que cuando los granos de trigo y soja son almacenados a humedad de recibo o menor, la actividad biológica en el silo bolsa es baja, generándose atmósferas levemente modificadas (entre 1,5% a 4,0% de CO_2 en el interior del silo bolsa comparado con el 0,03% de la concentración atmosférica normal).

Por el contrario, en granos que están sufriendo procesos de descomposición causados por hongos, la actividad biológica es más elevada y también lo es la concentración de CO_2 dentro del silo bolsa (superior al 5,0%). Por ende, la medición de este gas en el aire intergranario puede utilizarse como un indicador de procesos de deterioro, constituyendo una herramienta para el monitoreo del grano almacenado de alta sensibilidad, con un nivel de exactitud y sencillez aceptables.

Esta técnica es capaz de detectar en forma temprana un problema de almacenamiento aun sin deterioro visible del grano, en cualquier punto del silo bolsa, incluso los que se

producen en el fondo de la bolsa. Debido a las propiedades de difusión del CO₂, la técnica permite sectorizar el silo bolsa y asignar diferentes niveles de riesgo a cada sector.

Esta técnica presenta ciertas ventajas con respecto al monitoreo por calador. En primer lugar, permite detectar condiciones no adecuadas de almacenamiento antes que los granos se deterioren irreversiblemente, ya que los equipos presentan una alta sensibilidad para detectar condiciones riesgosas (alta humedad, baja calidad y roturas). En segundo lugar, no dañan la integridad del plástico por lo que no es necesario sellar roturas. Además son portátiles y rápidos (monitorean de 15 a 20 silo bolsas por hora).

El INTA recomienda realizar mediciones del CO₂ intergranario a una distancia entre puntos no superior a 3,0 metros desde el extremo de armado de la bolsa, con la mayor periodicidad posible para detectar zonas de alta tasa de incremento en la concentración de CO₂, usualmente por embolsar grano húmedo o por la entrada de agua a través de una rotura. De detectarse dichas condiciones se recomienda seguir monitoreando especialmente en esos puntos y, en base a la información que brindan los equipos, realizar la extracción de una muestra mediante calador a fin de detectar el motivo de dicho incremento, y la planificación de la extracción del grano para evitar que este pierda calidad.

En la actualidad se han desarrollado en el país equipos que incorporan programas informáticos específicos que permiten llevar registros precisos, donde se pueden cargar establecimientos o centros de acopio, silo bolsas, tipo de grano, sectores dentro de cada silo bolsa, progresión de la concentración de CO₂ e incluso un diagnóstico sobre la condición del grano (Figura 9). Se trata de equipos resistentes y de fácil manejo, que muestran de manera detallada la información, lo cual permite reducir las pérdidas y llevar a cabo una mejor gestión de los silo bolsas.

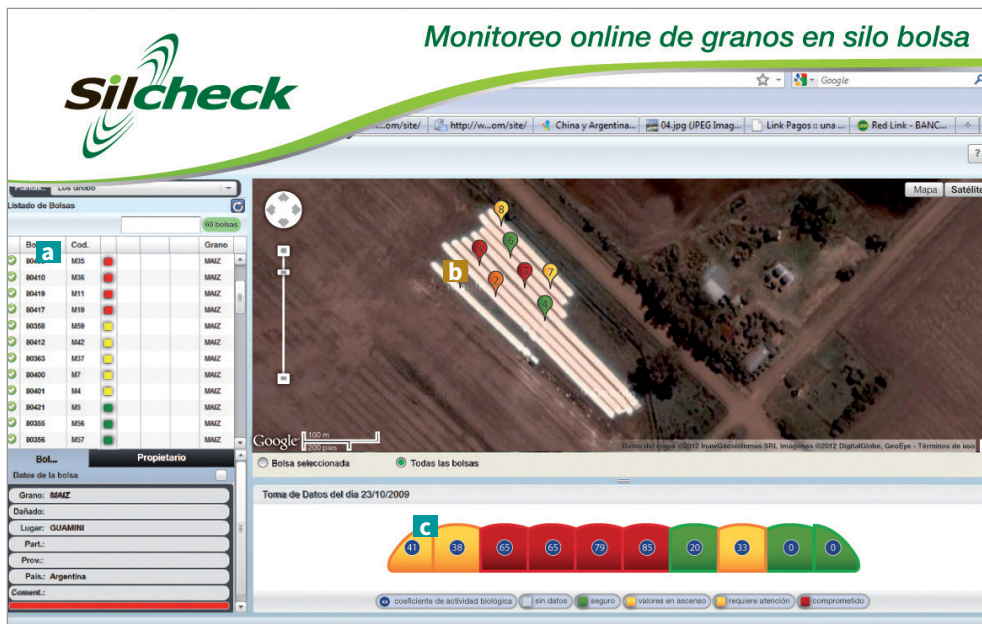


Figura 9.

Interfaz de un sistema de monitoreo de silo bolsas (perteneciente a la empresa Silcheck S.A.), donde se observa: (a) un **ranking** de riesgo de los silo bolsas ordenadas de mayor (rojo) a menor (verde); (b) la ubicación geográfica de las distintas bolsas; (c) el nivel de riesgo de 10 sectores diferentes de un silo bolsa seleccionada (donde rojo es comprometido y verde es seguro). Fuente: Silcheck S.A.

Sellado de roturas y sitios de muestreo

Como se ha dicho, es fundamental mantener la integridad física del silo bolsa para evitar la entrada de agua e insectos. Por esta razón, todo sitio de muestreo debe ser sellado una vez extraída la muestra, al igual que toda rotura que se detecte.

El sellado se debe realizar exclusivamente con cinta adhesiva especial para tal fin ya que posee resistencia a las inclemencias climáticas; es recomendable elegir entre las opciones del mercado el producto que presente el mejor adhesivo. Para mejorar la adherencia y prolongar la duración del cierre, se recomienda limpiar la zona con alcohol antes de pegar la cinta. Dado que el sellado debe ser permanente, se pueden utilizar distintas opciones para lograr dicho fin:

Tapar el orificio con cinta adhesiva y, posteriormente, sellar los bordes de la cinta con pegamento siliconado (Figura 10).

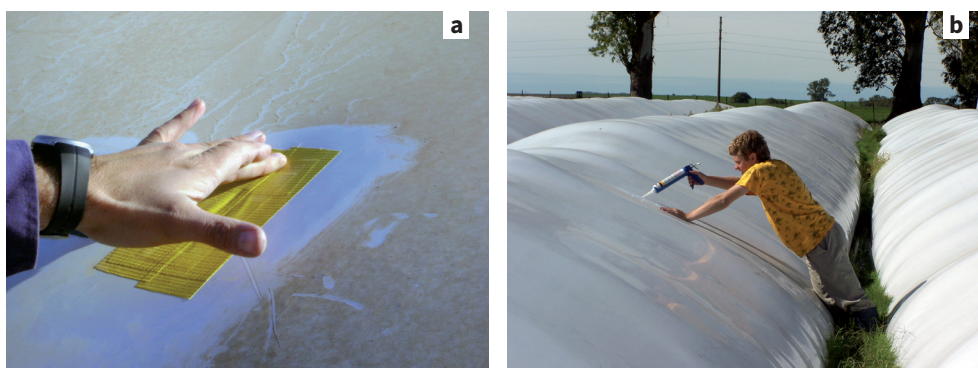


Figura 10.

Sellado de roturas y puntos de muestreo en silo bolsas.

a. Orificio tapado con cinta adhesiva. **b.** Sellado de los bordes de la cinta adhesiva de tela con pegamento siliconado.

Tapar el orificio con cinta adhesiva y pegar por encima un retazo del mismo silo bolsa para que actúe como parche. Sellar luego los bordes del parche con la misma cinta adhesiva (Figura 11).

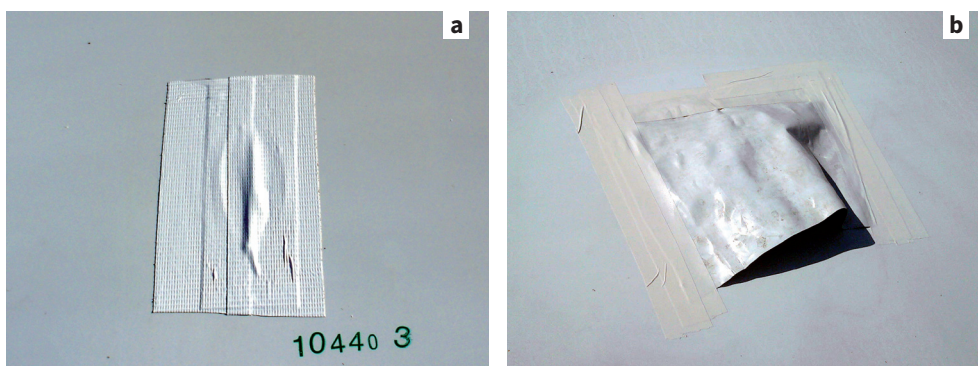


Figura 11.

Sellado de roturas y puntos de muestreo en silo bolsas.

a. Orificio tapado con cinta adhesiva. **b.** Parche confeccionado con un retazo del mismo silo bolsa.

2

Ambiente del silo bolsa y calidad de granos

Publicado en: Bartosik R.; Rodríguez J.; Malinarich H y Cardoso L.; 2009. Almacenaje de maíz, trigo, soja y girasol en bolsas plásticas herméticas, pp. 2 - 14. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. INTA Manfredi, Córdoba, 180 p.

Almacenaje de maíz, trigo, soja y girasol en silo bolsas

Ricardo Bartosik¹
Juan Rodríguez¹
Héctor Malinarich²
Leandro Cardoso¹

Resumen

Esta investigación se refiere al efecto del contenido de humedad (CH) del grano y tiempo de almacenaje sobre la calidad de maíz, trigo, soja y girasol almacenados en bolsas plásticas herméticas (silo bolsas) de 200,0 toneladas de capacidad.

Se tomaron muestras de grano durante el tiempo de almacenamiento y se realizaron pruebas de calidad. Además del CH promedio y su estratificación, también se monitoreó el cambio de temperatura para las diferentes capas de grano. El estudio, además, consideró la concentración de CO₂ y O₂ en la atmósfera intergranaria. Los principales resultados indicaron que la temperatura del grano en la bolsa plástica sellada herméticamente siguió el patrón de la temperatura ambiente a lo largo del año.

El CH promedio no cambió en forma significativa durante todo el experimento, tanto para los silo bolsas con grano seco como para grano húmedo. En general, no se observó estratificación de humedad, pero en el silo bolsa con girasol húmedo el estrato superior pasó de 16,4% a 20,8% de CH luego de 150 días de almacenaje.

Cuando el grano fue almacenado a CH de recibo no hubo mermas significativas en los parámetros de calidad observados durante los 150 días de almacenamiento. Contrariamente, cuando el grano fue almacenado con un CH por encima de la tolerancia de recibo se pudo observar la caída de uno o más parámetros de calidad.

¹EEA INTA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

²Asesor privado.

El incremento de la concentración de CO₂ fue mayor al final del tiempo de almacenamiento y también fue mayor en los silos bolsas que tenían grano con mayor CH. La medición de la composición de gases en el aire intersticial del silo bolsa se podría utilizar como un indicador de la actividad biológica de granos almacenados en el sistema de almacenaje hermético, y como herramienta para determinar el nivel de riesgo de almacenamiento en bolsas plásticas.

Palabras clave: atmósfera modificada, grano, calidad.

Introducción

En Argentina, fueron cosechadas 95 millones de toneladas de trigo, maíz, soja y girasol en la campaña 2006/07 (SAGPyA, 2007). Al mismo tiempo, el total de la capacidad de almacenaje permanente del país fue estimada entre 65,0 y 70,0 millones de toneladas, que resulta en un déficit de la capacidad de almacenaje de entre 25,0 y 30,0 millones de toneladas (PRECOP, 2007). Debido a la capacidad insuficiente de almacenamiento, una parte importante de la producción de granos de la Argentina debe ser directamente entregada a los acopiadores y de allí a los puertos. Otra consecuencia es una flota insuficiente de camiones para transportar toda la cosecha desde el campo hasta los acopios y los puertos, aunque trabajen al 100% de su capacidad. A parte de eso, los camiones son usados como almacenamiento temporal formando largas filas en los puertos. Como resultado, los productores de grano tienen que pagar precios más altos por transporte y servicio de acopio (secado, limpieza, etc.) durante el tiempo de cosecha y el resto del año. Esta ineficiencia en el sistema de poscosecha ha influido en las tareas de cosecha y distribución con aumentos substanciales en los costos de producción.

Para superar estas circunstancias desfavorables, los productores de granos comenzaron a aumentar la capacidad de almacenaje en campo para tener la oportunidad de comercializar el grano después de la temporada de cosecha cuando, no solo el precio es usualmente más alto, sino que también los costos de servicio son menores. Sin embargo, construir una nueva instalación de almacenamiento o ampliar una ya existente, por lo general, no es accesible para la mayoría de los productores argentinos. Las principales limitaciones son la elevada inversión inicial y la alta tasa de interés en los préstamos a corto plazo. Bajo estas circunstancias, una nueva técnica de almacenamiento ha ganado popularidad entre los productores. Esta técnica ha estado en el mercado por varios años para el almacenaje de grano húmedo (silaje de grano para alimentación animal) y, posteriormente, se adaptó para almacenar grano seco. La técnica consiste en almacenar el grano en bolsas de plástico o "silo bolsas", herméticamente cerradas. Cada silo bolsa puede contener aproximadamente 200,0 toneladas de grano, y con la maquinaria desarrollada en los últimos años las tareas de llenado son altamente eficientes.

Las empresas locales también han desarrollado maquinaria para la descarga de la bolsa, transfiriendo el grano directamente a camiones, tolvas, etc. La nueva generación de cosechadoras de alta capacidad de trabajo encuentra en el sistema de silo bolsa al socio ideal, ya que la capacidad de carga de la máquina embolsadora está, básicamente, limitada por la capacidad de transporte desde la cosechadora al lugar donde la bolsa es confeccionada. Otra ventaja del silo bolsa es que puede ser fácilmente incorporado en programas de identidad preservada

de granos (PI). Los silo bolsas pueden ser llenados con grano rápidamente en el campo, reduciendo los riesgos de contaminación con otros granos. Muchos productores han encontrado en este sistema la herramienta ideal para separar las diferentes variedades de trigo u otras semillas directamente en el campo.

En el 2001, alrededor de 2,0 millones de toneladas de grano (maíz, trigo, soja y girasol) fueron almacenados en este sistema. Durante los últimos años, esta técnica de almacenaje se ha perfeccionado, y el sistema “silo bolsa” ha ganado rápida adopción en muchos productores argentinos, a tal punto que en el año 2007 alrededor de 22,0 - 25,0 millones de toneladas de grano fueron almacenadas en este sistema (cerca del 23,0% del total de la producción), y en la campaña 2007 - 2008 más de 35,0 millones de toneladas de grano fueron embolsadas.

Los silo bolsas son impermeables al agua y tienen un importante grado de hermeticidad a los gases (O_2 y CO_2). Como resultado de la respiración de los componentes bióticos del granel (granos, insectos y hongos) se incrementa la concentración de CO_2 y se reduce la concentración de O_2 . Esta modificación en las condiciones del almacenamiento tiene consecuencias importantes sobre las semillas, los insectos y los hongos en el almacenamiento.

Se denomina “anoxia” al efecto de la baja concentración de O_2 sobre los insectos. Niveles de O_2 por debajo del 3,0% son requeridos para un control efectivo de insectos (concentraciones menores a 1,0%, para una rápida muerte) (Banks y Annis, 1990 y Adler et al., 2000). Se denomina “hipercarbia” al efecto de la alta concentración de CO_2 . El tiempo de exposición requerido para lograr un completo control de insectos es inversamente proporcional a la concentración de CO_2 . La mínima concentración de CO_2 requerida para lograr un control total de insectos parece ser del 35,0%, con un tiempo de exposición mayor a 14 días. Sin embargo, diferentes especies de insectos, así como las fases de desarrollo en la que se encuentran, tienen diferente tolerancia a la hipercarbia (Navarro y Donahaye, 2005). En los tratamientos de atmósfera modificada, el incremento de la concentración de CO_2 corresponde a una reducción en la concentración de O_2 , por lo que se obtiene un efecto combinado. Por lo tanto, se podría lograr un mayor control de insectos debido al efecto sinérgico (Calderón y Navarro, 1980). Otra ventaja del almacenamiento de granos en bolsas plásticas es que el material plástico (polietileno del silo bolsa) constituye una eficiente barrera física que impide la entrada de insectos desde el exterior hacia el interior de la bolsa. Por lo tanto, si el grano no proviene infestado del campo, permanecerá libre de insectos durante el almacenamiento.

La baja concentración de O_2 (por debajo del 1,0%) parece no ser suficiente para detener el crecimiento de hongos, aunque retrasa el deterioro del grano. Incrementos en la concentración de CO_2 del 3,0% al 30,0% (incluso con concentraciones de O_2 del 21,0%) resultan en una reducción del contenido fúngico. La alta concentración de CO_2 y la baja concentración de O_2 retardan el crecimiento de hongos. El periodo de latencia para el crecimiento de hongos de almacenamiento con baja concentración de O_2 (menos del 1,0%) es más largo que el periodo de latencia de los hongos en atmósfera normal. Cuando la concentración de CO_2 aumentó al 15,0% el periodo de latencia de los hongos a campo y en almacenaje se incrementó para todos los niveles de actividad acuosa (a_w). Sin embargo, los hongos de almacenamiento son mucho más tolerantes a la baja actividad acuosa (baja humedad relativa de equilibrio) que los hongos en condiciones de campo (Navarro y Donahaye, 2005). Wilson y Jay (1975) reportaron que durante el almacenaje con atmósfera modificada la aparición de

hongos fue retrasada en el tiempo, comparada con el control. Resultados similares fueron reportados por Navarro y Donahaye (2005), quienes establecieron que los hongos aeróbicos son los predominantes en el almacenaje y que ellos encuentran condiciones favorables para proliferar y multiplicarse bajo condiciones atmosféricas normales. Sin embargo, concentraciones bajas de O_2 y altas de CO_2 reducen (incluso suprimen) la viabilidad de los hongos, expresada en tasa de crecimiento, baja esporulación, tasa respiratoria y por último su capacidad para atacar los tejidos del grano.

Las atmósferas modificadas también afectan la capacidad de los hongos de producir toxinas. Landers et al. (1986) observaron que la capacidad de *Aspergillus flavus* para producir aflatoxinas en los granos, bajo condiciones óptimas de humedad y temperatura para el crecimiento del hongo, fue reducida sustancialmente con el aumento de la concentración de CO_2 y la disminución de la concentración de O_2 . La principal causa de la inhibición fue la alta concentración de CO_2 , más que la baja concentración de O_2 . Sin embargo, cuando las colonias fueron retornadas a la atmósfera normal recuperaron su capacidad de producir micotoxinas.

Banks (1981) estudió el efecto de la alta concentración de CO_2 sobre la viabilidad de las semillas, y se observó que semillas con un contenido de humedad (CH) por debajo del punto crítico no fueron afectadas significativamente por la alta concentración de CO_2 o por la baja concentración de O_2 . Sin embargo, las semillas almacenadas con alto CH mostraron una reducción en el poder germinativo debido al efecto del CO_2 sobre la actividad enzimática de la glutamina - descarboxilasa (Münzing y Bolling, 1985). Se observó que el efecto negativo del CO_2 fue mayor cuando la temperatura estaba alrededor de los 47,0 °C, pero este efecto no fue observado con temperaturas inferiores a 30 °C (Banks y Annis, 1990). Las semillas almacenadas en los silo bolsas, usualmente, tienen temperaturas inferiores a 30,0 °C, por lo tanto no debe esperarse una reducción notable en la viabilidad de las semillas debido a la alta concentración de CO_2 .

En Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) realiza investigaciones sobre el almacenamiento de granos en bolsas plásticas herméticas desde el año 2000 (Bartosik et al., 2002). Los principales objetivos de estos experimentos, resumidos en el presente trabajo, fueron estudiar el efecto del CH, la temperatura y el tiempo de almacenaje sobre la calidad de maíz, trigo, soja y girasol.

Materiales y métodos

Las pruebas se realizaron en establecimientos agropecuarios en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Los silo bolsas fueron confeccionadas de material plástico con 3 capas, negro en el interior blanco en el exterior (Figura 1). Las dimensiones de las bolsas fueron de 60,0 m largo; 2,7 m diámetro (9,0 pies), y 235 μ m de espesor. Cada silo bolsa contiene 200,0 toneladas de trigo, maíz y soja y 120,0 toneladas de girasol. Las bolsas se llenaron con grano en el mismo sitio (lote) luego de la cosecha.

El grano almacenado en silo bolsa fue muestreado al inicio de la experiencia y a los 45, 80 y 150 días de almacenamiento. Las muestras se tomaron con un calador estándar de camiones. La cobertura plástica fue perforada en 3 lugares a lo largo del silo bolsa. En cada uno de estos lugares se tomaron muestras de grano de 3 niveles diferentes (supe-



Figura 1.

Silo bolsas herméticas de 200,0 toneladas de capacidad.

rior: 0,1 m de profundidad (desde la superficie), medio: 0,7 m de profundidad, e inferior: 1,6 m de profundidad; altura total de la bolsa: 1,7 m. De cada sitio de muestreo se extrajeron varias muestras (réplicas). Posteriormente, el grano del estrato superior de ese sitio de muestreo se mezcló haciendo una muestra uniforme del nivel superior. El mismo procedimiento se aplicó a las muestras del estrato medio e inferior del mismo punto de muestreo. Después del calado, los orificios fueron sellados con cinta plástica especial para mantener la hermeticidad de la bolsa. A cada muestra se le realizaron distintos análisis de calidad (peso hectolítrico, poder germinativo, cantidad y acidez de aceite en girasol, soja y calidad panadera para trigo). Se midió el CH del grano en cada estrato, como así también la temperatura. La humedad se determinó en estufa a 103,0 °C durante 72 h (ASAE, 1983). La temperatura del grano, en los diferentes estratos, fue monitoreada con sensores y los datos almacenados de manera automática cada 10 minutos durante todo el ensayo. La concentración de CO₂ y O₂ en los diferentes niveles fue monitoreada luego de 5 y 100 días de almacenamiento utilizando un analizador de gases instantáneo portátil (ABISSPRINT, Abiss, Viry Chatillon, Francia).

También se investigó el efecto de la atmósfera modificada sobre la actividad de los insectos. En las bolsas plásticas que contenían granos de trigo, se colocaron 50 insectos adultos de *Sitophilus oryzae* (L.) (Gorgojos del arroz) en tubos de plástico perforados para facilitar el flujo de gas entre la atmósfera intergranaria y el interior del tubo. Estos tubos se insertaron en la masa de grano a 3 profundidades (superior, medio e inferior). Por cada profundidad se consideraron 3 repeticiones.

El experimento en trigo comenzó el 2 de enero del 2001 (variedad ProINTA - Isla Verde). Una bolsa se llenó con trigo seco (12,5% CH) y la otra con trigo húmedo (16,4% CH). Después de que las bolsas se llenaron, se cerraron los extremos y el grano no se movió hasta el final de la experiencia, esto fue el 4 de junio de 2001 (150 días).

La experiencia en girasol comenzó el 8 de marzo del 2001 (híbrido Van der Haven 480). Una bolsa se llenó con girasol seco (8,4% CH) y otra con girasol húmedo (16,4% CH). El grano fue guardado en la bolsa durante 160 días (finalizó el 15 de agosto).

El experimento con maíz comenzó el 6 de julio del 2001 (híbrido Axel, Sursem). Una bolsa se llenó con maíz seco (14,8% CH) y otra con grano de maíz húmedo (19,5% CH). El grano se guardó en la bolsa durante 153 días (hasta el 5 de diciembre).

La experiencia con soja comenzó el 5 de junio del 2001 (variedad Nidera 4100). Una bolsa se llenó con soja seca (12,5% CH) y otra con soja húmeda (15,6% CH). El grano se almacenó durante 160 días (hasta el 21 noviembre).

Resultados y discusión

Temperatura

Los principales resultados muestran que la temperatura del grano dentro del silo bolsa siguió el patrón de la temperatura ambiente promedio. El trigo se cosechó y embolsó al comienzo del verano (enero). La temperatura del grano al inicio del ensayo presentó los valores máximos y luego disminuyó gradualmente, a raíz de la caída de la temperatura ambiente durante el otoño, llegando al mínimo durante el invierno (junio) (Figura 2). Por otro lado, cuando el maíz fue cosechado y embolsado, a fines de otoño o principios de invierno, la temperatura del grano comenzó con un mínimo y luego aumentó con el incremento de la temperatura del aire durante la primavera, alcanzando el máximo en el verano (Figura 3).

Los silos bolsa con trigo y girasol se confeccionaron durante el verano, con temperaturas de grano de 40,0 °C y 30,0 °C respectivamente. El silo bolsa fue capaz de disipar el calor del grano al aire y al suelo en un par de meses luego del embolsado. Esto podría explicarse porque la relación volumen/superficie, es sustancialmente inferior para un silo bolsa (0,7 m³/m² para 200,0 toneladas de capacidad), que para un sistema de almacenamiento convencional (silo de chapa) de capacidad similar (1,3 m³/m² para 7,0 m diámetro y 9,0 m de altura para 200,0 toneladas de capacidad). El trigo y girasol cosechados durante el

Figura 2.

Patrón de temperatura (°C) ambiental y de diferentes profundidades de grano (estrato superior, medio e inferior) durante el tiempo de almacenamiento de trigo en silo bolsas (desde enero hasta junio).

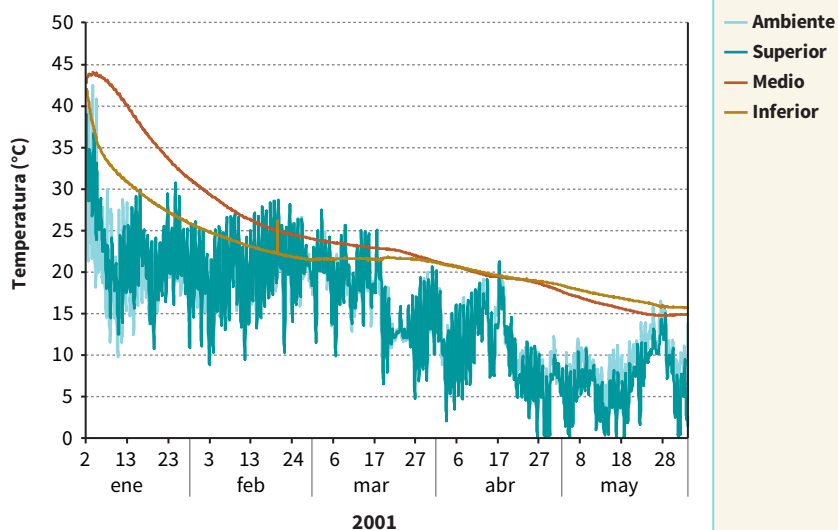
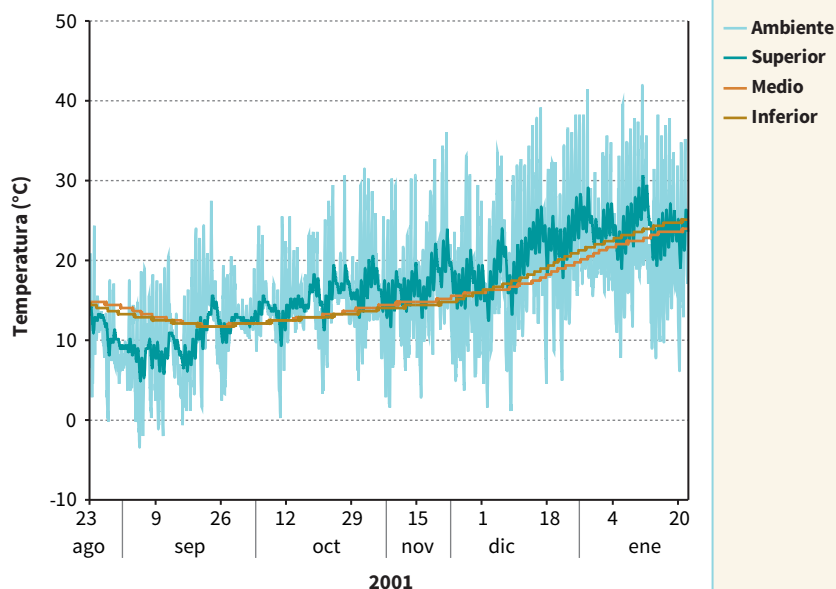


Figura 3.

Patrón de temperatura (°C) ambiental y de diferentes profundidades de grano (estrato superior, medio e inferior) durante el tiempo de almacenamiento de maíz en silo bolsa (desde agosto hasta enero).



verano, alcanzaron la temperatura de almacenamiento seguro para prevenir el desarrollo de insectos (por debajo de 17,0 °C) a principio de mayo (Figura 2), mientras que para soja y maíz, cosechados durante el otoño e invierno, el grano se mantuvo a temperatura por debajo de los 17,0°C hasta los primeros días de noviembre (Figura 3).

En la superficie del grano (parte externa del silo bolsa), la temperatura mostró el patrón característico de la temperatura ambiente diaria, alcanzando su máximo al medio día y su mínimo en las primeras horas de la mañana (Figuras 2 y 3). La oscilación de temperatura diaria disminuyó con la profundidad del grano y no se observó variación diaria después de los 0,7 m de profundidad. Cuando mayor es el cambio de temperatura en la superficie, mayores podrían ser los cambios de CH en la primera capa de granos debido a la condensación (durante la noche), y mayores cambios también deberían esperarse en la humedad relativa intersticial cerca de la superficie del grano.

Contenido de humedad

Las Tablas 1 y 2 muestran el CH del grano para 3 estratos diferentes (superior: 0,1 m desde la superficie, medio: 0,7 m desde la superficie, e inferior: 1,6 m desde la superficie) al comienzo del experimento y luego de 150 días de almacenamiento. El promedio de CH no se modificó significativamente durante el tiempo de almacenamiento, tanto para los silos bolsas con granos secos como para aquellos con grano húmedo. La mayor parte de las diferencias observadas pueden explicarse por la precisión del medidor de humedad y por el error experimental durante el muestreo. No se observó, en general, una sustancial estratificación de humedad durante el almacenamiento, con la excepción de un silo bolsa

con girasol húmedo. Para este grano, el CH en el estrato superior aumentó de 16,4% a 20,8% durante el experimento. El importante incremento de humedad en el estrato superior podría ser causado por repetidos ciclos de condensación y adsorción de agua en la capa superior de los granos, causada por la oscilación diaria de la temperatura. La humedad relativa de equilibrio para girasol a 16,4% de CH y a 15,0 °C superó el 90,0%. Con el descenso de la temperatura durante la noche, la humedad relativa podría aumentar fácilmente hasta el 100% y condensarse sobre la superficie del grano y sobre la cubierta plástica, aumentando, en el tiempo, el CH del grano en el estrato superior. Esta condición de alta humedad del grano (y alta humedad relativa) en el estrato superior creó las condiciones adecuadas para el desarrollo de levaduras y otros microorganismos anaeróbicos que normalmente no se observan cuando se almacena grano seco.

Tabla 1.

Evolución del contenido de humedad del grano (%) seco en el silo bolsa para 3 estratos diferentes (superior: 0,1 m desde la superficie, medio: 0,7 m desde la superficie, e inferior: 1,6 m desde la superficie) al comenzar el experimento (inicio) y luego de 150 días de almacenamiento (final).

Estrato	HUMEDAD TRIGO (%)		HUMEDAD MAÍZ (%)		HUMEDAD SOJA (%)		HUMEDAD GIRASOL (%)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Superior	12,5	13,5	14,8	14,2	12,5	12,9	8,4	8,3
Medio	12,5	13,4	14,8	14,5	12,5	12,6	8,4	8,6
Inferior	12,5	12,9	14,8	14,5	12,5	12,6	8,4	9,6

Tabla 2.

Evolución del contenido de humedad (%) del grano húmedo en el silo bolsa para 3 estratos diferentes (superior: 0,1 m desde la superficie, medio: 0,7 m desde la superficie, e inferior: 1,6 m desde la superficie) al comenzar (inicio) el experimento y luego de 150 días de almacenamiento (final).

Estrato	HUMEDAD TRIGO (%)		HUMEDAD MAÍZ (%)		HUMEDAD SOJA (%)		HUMEDAD GIRASOL (%)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Superior	16,4	15,7	19,5	18,8	15,6	15,7	16,4	20,8
Medio	16,4	16,0	19,5	18,8	15,6	15,6	16,4	17,6
Inferior	16,4	16,1	19,5	18,7	15,6	15,5	16,4	15,5

Calidad de grano

En general, cuando los granos evaluados, se almacenaron con CH de recibo (o menor), no se observaron caídas significativas en la mayoría de los parámetros de calidad considerados durante los 150 días de almacenamiento. Sin embargo, algunos parámetros de calidad como el poder germinativo, en algunos casos resultaron ligeramente afectados. Contrariamente, cuando se almacenó grano por encima de CH de recibo, se observó un detrimento en algunos parámetros de la calidad (de importante a severo) después de 150 días de almacenamiento, el cual fue de incipiente a severo.

La Tabla 3 muestra el efecto del tiempo de almacenamiento del grano de trigo húmedo y seco en los parámetros de calidad. Cuando el trigo fue almacenado en silo bolsa a 12,5% CH no hubo reducción significativa en el peso hectolítrico de las muestras, mientras que el poder germinativo cayó de 93,0% a 87,0%. Estos 6 puntos porcentuales de reducción no impiden que el trigo pueda ser utilizado como semilla en la próxima campaña (en Argentina los agricultores están autorizados a almacenar sus propias semillas para la próxima época de siembra, y esto constituye una práctica común). Los parámetros de calidad evaluados para trigo no se alteraron de manera significativa para grano seco luego de 150 días de almacenamiento, lo que implica que esta tecnología sea adecuada para almacenar trigo para la industria molinera.

Cuando el CH del trigo embolsado en enero fue de 16,4%, la temperatura ambiente promedio estuvo por debajo de los 40,0 °C, pero la temperatura promedio del grano almacenado estuvo cerca de los 42,0 °C. La combinación de alta humedad y alta temperatura resultó en una caída sustancial en la mayoría de los parámetros de calidad evaluados. El ensayo mostró que en las muestras de granos el peso hectolítrico se redujo de 78,7 kg/hl a 77,3 kg/hl, aunque este descenso no cambió la calidad comercial del trigo. El poder germinativo cayó del 95,0% al 40,0%, lo que impidió el uso de la semilla en la próxima época de siembra. Además, todos los parámetros de calidad panadera fueron afectados negativamente, haciendo que este trigo húmedo no sea apto para la industria molinera. Por otro lado, el almacenaje de trigo durante 5 meses con bajo CH (menor a 14,0%) resultó en una condición de almacenamiento seguro.

Tabla 3.

Parámetros de calidad de trigo seco (12,5% de CH) y húmedo (16,4% CH) al comienzo del experimento (inicial) y luego de 150 días (final) de almacenamiento en silo bolsa.

TIEMPO DE TOMA DE MUESTRA	PESO HECTOLÍTRICO (KG/HL)	PODER GERMINATIVO (%)	CALIDAD PANADERA					
			Gluten (%)	W	P/L	Abs. ^a	VP (cm ³) ^b	VE ^c
Trigo seco (12,5% CH)								
Inicial	82,4	93,0	30,2	282	0,9	61	620	4,3
Final (150 días)	82,0	87,0	27,8	313	1,1	62	655	4,5
Trigo húmedo (16,4% CH)								
Inicial	78,7	95,0	29,8	288	1,0	61	675	4,7
Final (150 días)	77,3	40,0	22,6	283	2,6	61	578	4,0

Referencias: a = Absorción de agua, b = Volumen de pan, c = Volumen específico

La Tabla 4 muestra el efecto del tiempo de almacenamiento, de grano seco y húmedo de maíz, sobre los parámetros de calidad. Cuando el grano fue embolsado a 14,8% CH mostró un peso hectolítrico ligeramente mayor luego de 150 días de almacenamiento, mientras que el porcentaje de granos dañados aumentó 1,3 puntos porcentuales. Desde el inicio del ensayo, las muestras de maíz seco presentaron granos dañados por encima del rango de tolerancia indicada para Argentina (3,0%), por lo que el cambio de este factor no afectó la calidad comercial del maíz.

Las muestras de maíz con 19,5% CH resultaron con una disminución en peso hectolítrico de 2,0 kg/hl, y un aumento sustancial de granos dañados en 4,4 puntos porcentuales.

El maíz fue cosechado durante el otoño, con baja temperatura ambiente. Típicamente en Argentina el maíz es almacenado a 20,0 °C de temperatura o menos, con temperaturas ambientes promedio por debajo de 15,0 °C. Como resultado de ello, el maíz húmedo (18,0% CH) fue almacenado sin una disminución sustancial en los parámetros de calidad hasta la primavera (septiembre), debido a que el grano se mantuvo a baja temperatura (15,0 °C o menos). Posteriormente, con el incremento de la temperatura durante la primavera aumenta la actividad biológica dentro del silo bolsa, resultando en un sustancial deterioro de los parámetros de calidad del maíz a fines de la primavera. El almacenamiento de maíz seco (por debajo de 15,0% CH) durante 5 meses resultó una práctica segura, mientras que el almacenamiento de maíz húmedo más allá del invierno (más de 3 meses), por lo general se traduce en efectos negativos sobre parámetros de calidad del grano.

Tabla 4.

Parámetro de calidad de maíz seco (14,8% CH) y maíz húmedo (19,5% CH) al inicio del experimento (inicial) y después de 150 días de almacenamiento (final) en silo bolsa.

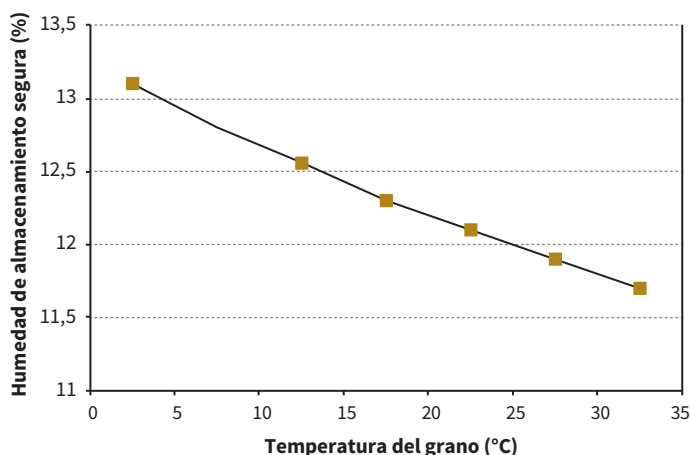
TIEMPO DE TOMA DE MUESTRAS (DÍAS)	PESO HECTOLÍTRICO (KG/HL)	GRANOS DAÑADOS (%)
Maíz seco (14,8%)		
Inicial	73,0	3,2
Final (150 días)	74,0	4,5
Maíz húmedo (19,5%)		
Inicial	72,0	5,8
Final (150 días)	70,0	10,2

La Tabla 5 muestra el efecto del tiempo de almacenaje en soja seca y húmeda sobre los parámetros de calidad evaluados. La soja almacenada a 12,5% CH no tuvo modificación en el peso hectolítrico ni en el porcentaje de aceite de las muestras. Por otro lado, el índice de acidez y el poder germinativo fueron, de alguna manera, afectados. La caída en el poder germinativo (de 74,0% a 62,0%) indica que se deben tomar precauciones cuando la soja va a ser utilizada como semilla en la próxima campaña de siembra. En Argentina, la base de humedad para la comercialización es del 13,5%. De acuerdo a la ecuación del contenido de humedad de equilibrio de Chung - Pfof Modificada y los parámetros disponibles en el estándar de ASABE D245.5, para una humedad relativa de equilibrio del 67,0% (considerada de almacenamiento seguro) corresponde un CH por debajo del 13,5% (Figura 4). Por lo tanto, si la soja fue almacenada en bolsas plásticas para ser usada como semilla en la próxima siembra, el CH del grano debe ser menor al 12,5%.

Las muestras de soja húmeda (15,6% CH) resultaron con una reducción en el peso hectolítrico de 2,0 kg/hl. La soja fue cosechada como el maíz, durante el otoño, con baja temperatura ambiental. Por lo tanto, la soja es, usualmente, embolsada a 20,0 °C o menos, y almacenada durante el invierno con temperaturas ambientales en promedio

Figura 4.

Humedad de almacenamiento seguro (equivalente a humedad relativa de equilibrio de 67,0%) para soja a diferentes temperaturas de almacenamiento (ecuación Chung - Pfof Modificada y parámetros estándar ASABE D245.5).



de 15,0 °C. Como resultado de ello, la soja húmeda (por encima del 13,5% CH) fue almacenada sin disminución una importante en los parámetros de calidad evaluados hasta la primavera (septiembre), debido a que el grano se mantiene a 15,0 °C de temperatura o menos. Luego, con el incremento de la temperatura durante la primavera, incrementa la actividad biológica dentro del silo bolsa, resultando en un deterioro sustancial en los parámetros de calidad de soja durante fines de primavera. El almacenamiento de soja seca (por debajo del 13,5% CH) durante 5 meses resultó ser una práctica segura (a excepción del poder germinativo, para el cual se requiere almacenar la soja por debajo del 12,5% de humedad).

Tabla 5.

Parámetros de calidad de soja seca (12,5% CH) y soja húmeda (15,6% CH) al inicio del experimento (inicial) y después de 150 días de almacenamiento (final) en silo bolsa.

TIEMPO DE TOMA DE MUESTRA (DÍAS)	PODER GERMINATIVO (%)	PESO HECTOLÍTRICO (KG/HL)	CANTIDAD DE ACEITE (%)	ÍNDICE DE ACIDEZ DE ACEITE (%)
Soja seca (12,5%)				
Inicial	74,0	71,0	20,8	1,6
Final (150 días)	62,0	71,0	20,5	1,9
Soja húmeda (15,6%)				
Inicial	74,0	68,5	21,5	1,7
Final (150 días)	55,0	68,9	21,0	2,3

La Tabla 6 muestra el efecto del tiempo de almacenamiento de girasol seco y húmedo sobre los parámetros de calidad. Cuando el girasol fue embolsado a 8,4% CH no se observó reducción en la cantidad de aceite, mientras que el índice de acidez de aceite se incrementó levemente de 0,9 a 1,4. Este incremento en el índice de acidez de aceite no superó la tolerancia impuesta por la norma de comercialización de girasol en Argentina, que es del 1,5% hasta el 31 de agosto y del 2,0% luego de dicha fecha. Así, el almacenaje de girasol seco (por debajo del 11,0% CH) es una práctica segura, ya que los parámetros de calidad para la industria no fueron afectados después de 150 días de almacenamiento.

El girasol almacenado húmedo (16,4% CH) tuvo una reducción en la cantidad de aceite de 1,3 puntos porcentuales (de 47,0% a 45,7%) y un mayor incremento en el índice de acidez del aceite (de 0,9% a 3,9%), luego de 150 días de almacenamiento.

El girasol fue cosechado durante fines del verano (febrero), con una temperatura ambiental superior a 20,0 °C. Por lo tanto, el girasol es usualmente embolsado con una temperatura de 20,0 °C - 25,0 °C o más, y almacenado durante fines de verano y principios de otoño con una temperatura relativamente alta. Luego, la temperatura del grano comienza a descender durante fines de otoño e invierno, copiando la evolución de la temperatura ambiente. La combinación entre relativamente alta temperatura de almacenaje y alta CH de grano resultaron en una elevada actividad biológica, que afectó negativamente los parámetros de calidad industrial del girasol durante el almacenaje. Por otro lado, el almacenamiento de girasol durante 5 meses con bajo CH (debajo de 11,0%) resultó ser una práctica segura.

Tabla 6.

Parámetros de calidad de girasol seco (8,4% CH) y girasol húmedo (16,4% CH) al inicio del experimento (inicial) y después de 150 días de almacenamiento (final) en silo bolsa.

TOMA DE MUESTRA (DÍAS)	CANTIDAD DE ACEITE (%)	ÍNDICE DE ACIDEZ DE ACEITE (%)
Girasol seco (8,4%)		
Inicial	49,0	0,9
Final (150 días)	49,0	1,4
Girasol húmedo (16,4%)		
Inicial	47,0	0,9
Final (150 días)	45,7	3,9

Composición de la atmósfera intergranaria

La respiración del grano asociada con los microorganismos produce un incremento en la concentración de CO₂ y una reducción en la concentración de O₂. Las Tablas 7 a 10 muestran los cambios en la composición de la atmósfera intersticial del granel durante el tiempo de almacenamiento en trigo, maíz, girasol y soja, para grano seco y húmedo. El incremento de CO₂ y la reducción en la concentración de O₂ fueron mayores al final

Tabla 7.

Cambios en la concentración de CO₂ y O₂ (%) de trigo seco (12,5% de CH) y húmedo (16,4% CH) durante el tiempo de almacenamiento (días) en la atmósfera intersticial del silo bolsa.

CONDICIÓN DEL GRANO	5 DÍAS		100 DÍAS	
	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Trigo seco (12,5%)	4,4	14,7	13,0	10,4
Trigo húmedo (16,4%)	18,9	5,5	22,8	5,6

Tabla 8.

Cambios en la concentración de CO₂ y O₂ (%) de maíz seco (14,8% CH) y maíz húmedo (19,5% CH) durante el tiempo de almacenamiento (días) en la atmósfera intersticial del silo bolsa.

CONDICIÓN DEL GRANO	20 DÍAS		35 DÍAS		52 DÍAS		79 DÍAS		84 DÍAS	
	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Maíz seco (14,8%)	-	-	9,7	10,4	18,2	2,1	18,2	2,1	-	-
Maíz húmedo (19,5%)	6,2	12,8	-	-	-	-	-	-	18,5	2,6

Tabla 9.

Cambios en la concentración de CO₂ y O₂ (%) de soja seca (12,5% CH) y soja húmeda (15,6% CH) durante el tiempo de almacenamiento (días) en la atmósfera intersticial del silo bolsa.

CONDICIÓN DEL GRANO	30 DÍAS		46 DÍAS		93 DÍAS		160 DÍAS	
	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Soja seca (12,5%)	3,5	15,5	3,8	14,2	4,5	11,3	7,5	10,0
Soja húmeda (15,6%)	5,7	7,7	6,8	5,2	9,2	4,8	16,2	3,0

Tabla 10.

Cambios en la concentración de CO₂ y O₂ (%) de girasol seco (8,4% CH) y girasol húmedo (16,4% CH) durante el tiempo de almacenamiento (días) en la atmósfera intersticial del silo bolsa.

CONDICIÓN DE GRANO	34 DÍAS		125 DÍAS	
	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Girasol seco (8,4%)	16,5	5,1	18,9	4,5
Girasol húmedo (16,4%)	70,3	4,9	69,1	4,7

del tiempo de almacenamiento. También se observó que en general, el incremento en el CO_2 y la reducción de la concentración de O_2 fueron mayores con grano húmedo que con grano seco, a excepción del maíz, ya que ambos silos presentaron similares valores de CO_2 y O_2 (Tabla 8). La mayor concentración de CO_2 se observó en bolsas con grano húmedo, como era de esperarse ya que los granos más húmedos son tendientes a producir mayor actividad biológica (crecimiento de microorganismos). Así, la mayor tasa respiratoria dio lugar a una mayor modificación sustancial de la atmósfera intersticial. En el caso del experimento con maíz las bolsas con grano seco y húmedo mostraron altos valores y similar concentración de CO_2 (alrededor de 18,0%). Se especuló con que el silo bolsa de maíz seco había una parte del grano en descomposición (probablemente por roturas en la parte inferior del plástico ocasionado por los restos de cultivo sobre los que se apoyó la bolsa, permitiendo el ingreso de agua al interior de la misma). La concentración de CO_2 y O_2 en la bolsa con girasol húmedo llegó a 70,3% y 4,9%, respectivamente (Tabla 10). Este cambio significativo en la composición gaseosa fue, probablemente, causado por la alta actividad biológica que a 16,4% CH el girasol puede soportar (la humedad de almacenamiento seguro para girasol está por debajo del 11,0%). Por lo tanto, la medición de gas en la composición del aire intersticial puede utilizarse como una indicación de la actividad biológica de la masa de granos en los sistemas de almacenamiento hermético, y una herramienta para el monitoreo del almacenamiento de grano.

Conclusiones

La temperatura del grano almacenado en silo bolsa siguió el patrón de la temperatura ambiente promedio de la estación del año. No se observó aumento de la temperatura por la actividad biológica (incluso en el almacenamiento de grano húmedo). El grano almacenado en las bolsas se mantuvo durante la parte fría del año por debajo de 17 °C (temperatura límite para el desarrollo de insectos).

La humedad promedio de la masa de grano no cambió durante el almacenamiento. Se observó estratificación de humedad en girasol húmedo, con incrementos de humedad en la superficie de 16,4% al inicio a 20,8% luego de 150 días de almacenamiento.

En general, cuando el grano fue almacenado a humedad de recibo o inferior (14,0% para trigo, 14,5% para maíz, 13,5% para soja y 11,0% para girasol), no se observaron caídas significativas en los parámetros de calidad evaluados luego de 150 días de almacenamiento. Cuando se almacenó grano húmedo (por encima de humedad de recibo) se observó una disminución en uno o más parámetros de calidad evaluados, y la disminución fue mayor en granos con mayor contenido de humedad. La combinación de alta temperatura de grano (parte cálida del año) y alta humedad dio lugar a una mayor pérdida de calidad.

La concentración de CO_2 aumentó para todos los granos durante el tiempo de almacenamiento. El grano tuvo una mayor modificación de la atmósfera intersticial debido a una mayor actividad biológica. La concentración de CO_2 puede utilizarse como indicador de la actividad biológica en la masa de granos en sistemas de almacenaje hermético, y una herramienta para el monitoreo de almacenamiento de grano.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Ing. Gabriel Alfonso por la ayuda en el trabajo de campo de esta investigación, así como a las empresas fabricantes de las bolsas de plástico herméticas (Ipesa SA., Plastar SA. y Agrinplex) por el apoyo financiero de nuestra investigación en atmósferas modificadas.

Referencias

- Adler C.; Corinth H.G.; Reichmuth C. 2000. Modified atmospheres, pp. 105 - 146. En: Subramanyam B.; Hagstrum D.W. (Eds.). Alternatives to pesticides in stored - product IPM, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts.
- ASAE Standards. 2001. ASAE D241.5. Moisture relationships of plant - based agricultural products. St. Joseph, Michigan, USA.
- Banks H.J. 1981. Effects of controlled atmosphere storage on grain quality: a review. *Food Technol. Aut.*, 33: 335 - 340.
- Banks H.J. y Annis P.C. 1990. Comparative advantages of high CO₂ and low O₂ types of controlled atmospheres for grain storage, pp. 93 - 122. En: Calderon M. y Borkai - Golan R. (Eds.). Food Preservation by Modified Atmospheres, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Bartosik R.E.; Rodriguez J.C.; Malinarich H.E. y Maier D.E. 2002. "Silo bag": evaluation of a new technique for temporary storage of wheat in the field, pp.1018 - 1023. En: Proceedings of the 8th International Working Conference on Stored Product Protection, York, Inglaterra.
- Calderon M. y Navarro S. 1980. Synergistic effect of CO₂ and O₂ mixture on stored grain insects, pp. 79 - 84. En: Shejbal J. (Ed.), Controlled Atmosphere Storage of Grains. Elsevier, Ámsterdam.
- Landers K.E.; Davis N.D. y Diener U.L. 1986. Influence of atmospheric gases on aflatoxin production by *Aspergillus flavus* in peanuts. *Phytopathology*, 57: 1967.
- Münzing K. y Bolling H. 1985. Qualitätsveränderungen von weizen durch CA - lagerung. veriffentlichungsnr. 5309 der bundesforschungssanst. Für Getreide - und Kartoffelverarbeitung, Detmold, 22 S.
- Navarro S. y Donahaye J. 2005. Innovative environmentally friendly technologies to maintain quality of durable agricultural produce, pp. 203 - 260. En: Yeoshua S.B. (Ed.), Environmentally Friendly Technologies for Agricultural Produce Quality. CRC Press, Boca Ratón, Florida, USA.
- PRECOP. 2007. Eficiencia de Poscosecha: generación, desarrollo y difusión de tecnologías para aumentar la eficiencia de acondicionado, secado y almacenaje de cereales, oleaginosas y cultivos industriales del país. Proyecto Nacional del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. INTA PE AEAI5742.
- SAGPyA. 2007. Estimaciones agrícolas mensuales - estimaciones oficiales a 17 de octubre del 2007. Reporte de la Secretaría de Agricultura. Disponible en: www.sagpya.gov.ar. Consultado en Octubre del 2007.
- Wilson D.M. y Jay E. 1975. Influence of modified atmosphere storage on aflatoxin production in high moisture corn. *Appl. Microbiol.*, 19: 271.

Detección temprana de procesos de descomposición de granos almacenados en silo bolsas herméticas mediante la medición de CO₂

Ricardo Bartosik¹

Leandro Cardoso¹

Dario Ochandio²

Diego Croce²

Resumen

En este estudio se implementan 2 metodologías de detección de problemas de almacenamiento de granos en silo bolsas basado en: 1) la medición frecuente en el tiempo de la concentración de CO₂ (evolución en el tiempo) y 2) mediante la comparación de la medición de la concentración de CO₂ de un silo bolsa en un momento determinado, con la concentración típica de CO₂ de trigo y soja almacenados en bolsas sin problemas de almacenaje. Se utilizaron silo bolsas de trigo y soja, ubicadas en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. El tiempo promedio de almacenaje fue de 5 meses. En cada silo bolsa se establecieron 3 puntos de muestreo donde se realizaron mediciones de CO₂ y se extrajeron muestras mediante calador, desde el inicio del almacenaje y con una frecuencia de 15 días. Complementariamente, los silo bolsas se inspeccionaron durante el almacenaje (roturas, anegamiento, etc.) y la extracción del grano. Con esta información se clasificaron como silo bolsas con “condición de almacenaje apropiada” o “con evidencia de grano afectado”.

El monitoreo periódico de la concentración de CO₂ se puede utilizar como herramienta para detectar un aumento en la actividad biológica en los silo bolsas y relacionarlo con procesos de descomposición del grano. Se determinó la concentración típica de CO₂ para bolsas de trigo y soja con evidencia de grano afectado y condiciones seguras de almacenaje. Para el monitoreo se mide la concentración de CO₂ en el la bolsa y se la compara con la concentración de CO₂ típica para los silo bolsas con condiciones de almacenaje seguras e inseguras. Por comparación, la condición de almacenaje de la bolsa se clasifica como segura, riesgosa o insegura. La concentración de CO₂ en silo bolsas de trigo en condiciones de almacenaje seguras aumenta con la humedad del grano (debajo del 5,0% de CO₂ para el

¹INTA EEA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

²Alumno Facultad de Ciencias Agrarias Balcarce, UNMDP (Buenos Aires), Argentina.

13,0% de humedad o menos, y hasta el 17,0% de CO₂ para el 16,0% de humedad). La humedad del grano de soja no afecta substancialmente la concentración de CO₂ de bolsas con condiciones de almacenaje seguras (en un rango de humedades del 11,0% a 15,0%). Así, cualquier medida de concentración de CO₂ por debajo del 4,0% significa condiciones de almacenaje “segura”, entre el 4,0% y el 12,0% significa condiciones de almacenaje “riesgosa”, y por encima del 14,0% significa condición de almacenaje “insegura”.

Introducción

En Argentina durante el año 2007 fueron almacenadas en los sistemas herméticos (silo bolsas) alrededor de 35,0 millones de toneladas de granos, incluyendo soja, maíz, maíz pisingallo, trigo, girasol, cebada cervecera, arroz, sorgo y algodón. El uso final de estos granos varía entre la alimentación del ganado, semillas, molienda húmeda y seca (maíz), consumo humano, cervecería, extracción de aceite y molienda harinera (trigo) entre otras.

Cada silo bolsa puede almacenar aproximadamente 200 toneladas de trigo (180 toneladas de soja) y con el equipo disponible actualmente la carga y descarga de una bolsa es un proceso rápido, simple y totalmente mecanizado. Los silo bolsas son de 60,0 m de largo, 2,7 m de diámetro y la cubierta, de 235 µm de espesor, está compuesta por 3 capas plásticas (con el interior negro y el exterior blanco).

La medición de la temperatura del grano es la principal herramienta usada para supervisar la condición del grano en sistemas de almacenaje tradicional (silos y celdas) por los establecimientos rurales, los acopios comerciales y la industria, puesto que un incremento en temperatura en un sector del granel está altamente correlacionado con el aumento en la actividad biológica en dicha área. Desafortunadamente, esta tecnología no es útil para monitorear condiciones de almacenaje en silo bolsas. Se demostró que la temperatura del grano almacenado en los silo bolsas sigue el patrón de la temperatura media ambiental, variando con las estaciones del año. Esto se debe a que el silo bolsa tiene una mayor capacidad de intercambiar calor con el aire ambiente y con el suelo. La relación superficie / volumen de un silo bolsa de 180,0 toneladas es aproximadamente 1,4, mientras que para un silo estándar de metal de la misma capacidad (9,0 m de altura y 7,0 m de diámetro) el cociente es 44,0% menor (0,8) (Bartosik et al., 2008). De esta manera, la relación de la temperatura del grano con la actividad biológica se puede enmascarar por el efecto de la temperatura ambiente. A su vez, el ecosistema generado en un ambiente hermético tiene una tasa de respiración disminuida respecto de un ecosistema de un silo o celda convencional, por lo que la tasa de liberación de calor del grano en descomposición es menor.

El monitoreo del grano almacenado en silo bolsas mediante el calado tradicional (extracción de muestras) es un procedimiento bastante fácil de implementar. Este monitoreo es útil para obtener una idea de la calidad total del grano almacenado en la bolsa (contenido de humedad (CH), contenido proteico, falling number, etc.), pero no es conveniente para detectar problemas tempranos de almacenaje (la mayor parte del proceso de descomposición del grano ocurre en lugares muy localizados de la masa del grano, típicamente en el fondo de la bolsa, donde la punta del calador tradicional no llega a

recoger la muestra). Además, cada perforación hecha en la cubierta plástica disturba la hermeticidad del sistema, lo cual limita el número de muestras que se pueden recoger de cada silo bolsa y la frecuencia de muestreo. Otra desventaja de esta metodología es la cantidad de mano de obra y tiempo que se necesita.

Los silos bolsas son impermeables y tienen un alto grado de hermeticidad a los gases (oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2)). Consecuentemente, la respiración de los componentes bióticos del granel (granos, insectos y hongos) eleva la concentración de CO_2 y reduce la de O_2 . Así, el nivel de modificación de los componentes gaseosos del aire intersticial se puede relacionar con la actividad biológica dentro del silo bolsa. Por lo tanto, la medición de la modificación atmosférica en el silo bolsa se podría utilizar como herramienta de monitoreo para detectar problemas tempranos de granos dañados.

Cardoso et al. (2008) y Rodríguez et al. (2008) estudiaron los principales factores que afectaban la concentración de CO_2 en trigo y soja almacenados en silos bolsas, estableciendo además los valores típicos de concentración para bolsas sin problemas de almacenamiento. En este estudio se implementan 2 metodologías de detección de problemas de almacenamiento de granos en silos bolsas basado en: 1) la medición frecuente en el tiempo de la concentración de CO_2 (evolución en el tiempo) y 2) mediante la comparación de la medición de la concentración de CO_2 de un silo bolsa en un momento puntual del almacenaje, con la concentración típica de CO_2 de trigo y soja almacenados en silos bolsas sin problemas de almacenaje.

Materiales y métodos

Los ensayos se realizaron en diferentes plantas de acopio y establecimientos agropecuarios en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Los silos bolsas fueron llenados con grano posteriormente a la cosecha. En general los silos bolsas se instalaron en el mismo lote, o en plantas de acopio durante el periodo de cosecha. El experimento comenzó en enero para trigo y en abril - mayo para soja, y se extendió hasta que los silos bolsas se abrieron para extraer el grano (aproximadamente 5 meses después).

Para cada bolsa se establecieron 3 lugares de muestreo. El procedimiento consistió en medir la concentración de CO_2 mediante un analizador portátil de gases (PBI Dan Sensor, CheckPoint, Dinamarca (Figura 1)), perforando la cubierta plástica del silo bolsa con una aguja hipodérmica. La composición del gas fue analizada para 3 niveles (superior, medio e inferior) por sitio de muestreo del silo bolsa. En cada punto de muestreo el grano fue recolectado realizando un calado tradicional. Las muestras de grano extraídas se colocaron en bolsas con cierre hermético y se remitieron a laboratorio para la medición de humedad (GAC 2100, Dickey - John). Después del calado de la bolsa las aberturas fueron selladas con una cinta adhesiva especial para restituir la hermeticidad. Este procedimiento se repitió aproximadamente cada 15 días durante todo el periodo de almacenaje.

Cuando, finalmente, los silos bolsas fueron vaciados, el grano y la integridad física de la cubierta plástica fueron examinados para detectar si el grano se encontraba afectado. Se clasificaron, entonces, a los silos bolsas como “condición de almacenaje apropiada” o “con evidencia de grano afectado” (Figura 2).

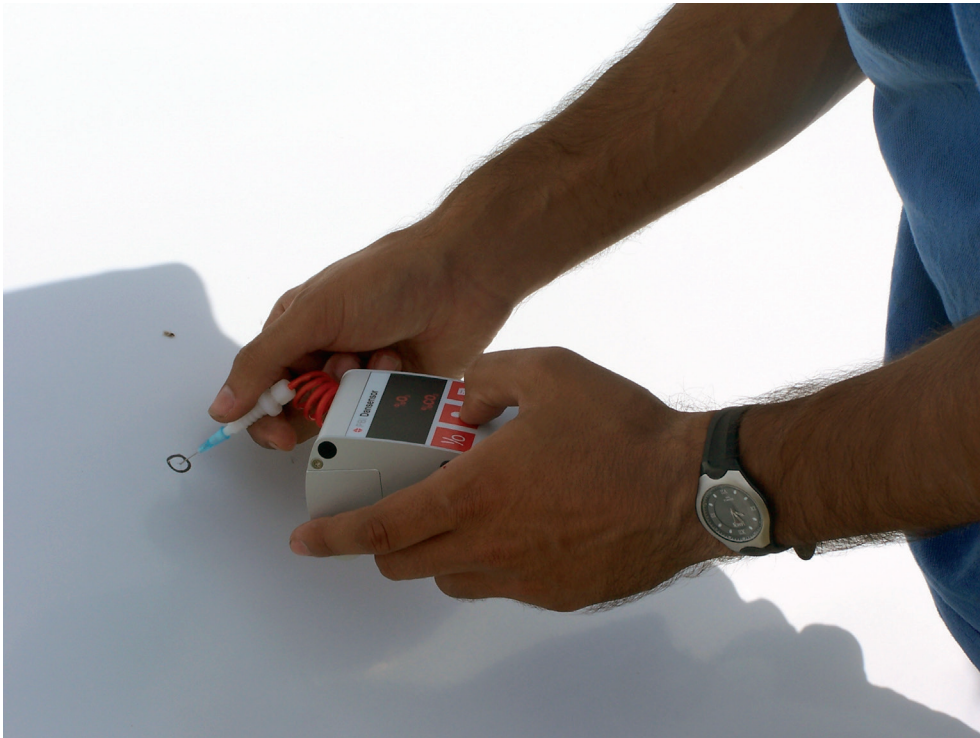


Figura 1.
Muestreo del nivel de O_2 y CO_2 con un medidor portátil de gases.



Figura 2.
Grano afectado detectado durante el vaciado del silo bolsa.

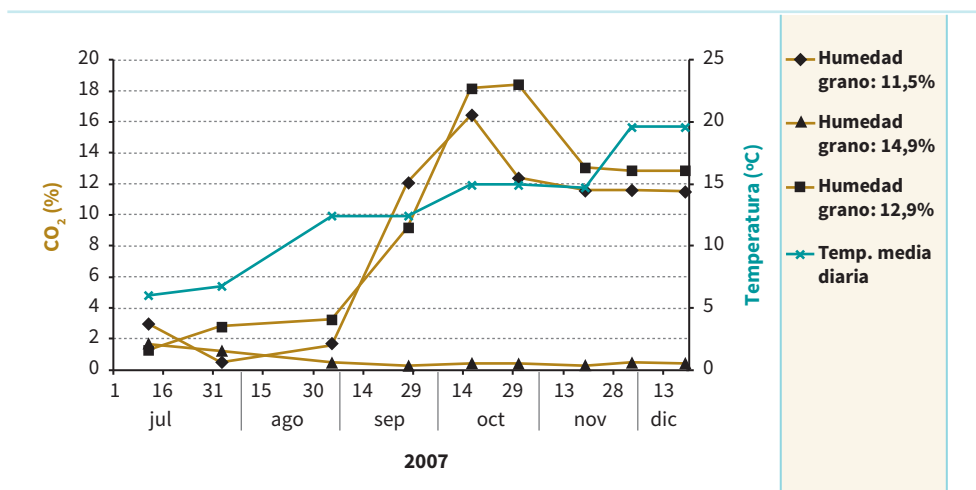
Resultados y discusión

La Figura 3 muestra el cambio en la concentración de CO₂ en 3 bolsas de soja almacenadas con diferentes CH: 11,5% (menor a humedad de recibo), 12,9% (cercana a humedad de recibo), y 14,9% (superior a humedad de recibo) (la humedad base para la comercialización de soja en Argentina es del 13,5%). Durante el invierno (julio - agosto) la concentración de CO₂ se encontró por debajo del 3,0% para todas las humedades analizadas. Al comienzo de la primavera (septiembre) la concentración de CO₂ comenzó a aumentar, alcanzando en fines de septiembre valores del 9,2% y 12,0% para los silo bolsas con 12,9% y 11,5% de CH, respectivamente. Durante octubre, la concentración de CO₂ se incrementó hasta el 16,0% y 18,0% para las mismas bolsas. Posteriormente, la concentración de CO₂ disminuyó hasta el 10,0% y 13,0% y se estabilizó hasta el último reporte (en diciembre). La bolsa con soja húmeda (14,9%) tuvo una concentración de CO₂ por debajo del 2,0% durante todo el periodo de almacenaje. Cuando los silo bolsas que presentaron alta concentración de CO₂ se vaciaron, una cantidad significativa de grano con afecciones severas fue detectada. Se observó que al menos una capa de grano, de 0,1 m de espesor se encontraba afectada producto de perforaciones en la cubierta plástica en la base de la bolsa. Las roturas en la bolsa permitieron la entrada de agua y O₂, creando condiciones favorables para el desarrollo de hongos cuando la temperatura del grano se incrementó en la primavera temprana. Por otra parte, la bolsa con soja húmeda no presentó ninguna perforación significativa en la cubierta plástica, por lo que las condiciones de almacenaje seguras perduraron durante el periodo de almacenaje, incluso durante el final de la primavera. Consecuentemente, el grano no demostró evidencia de deterioro cuando se examinó durante la extracción final, coincidiendo con la baja concentración de CO₂ registrada.

Estos resultados demostraron que el monitoreo de la concentración de CO₂ se puede usar como herramienta para la detección temprana de problemas de granos dañados en bolsas.

Aunque el monitoreo periódico de la concentración CO₂ permite detectar un aumento de la actividad biológica en el silo bolsa durante el almacenaje (Figura 3), a veces solo

Figura 3. Concentración de CO₂ (%) de 3 silo bolsas de soja con 11,5%, 12,9% y 14,9% de humedad durante el tiempo de almacenamiento y variación de la temperatura media diaria (°C) del ambiente.

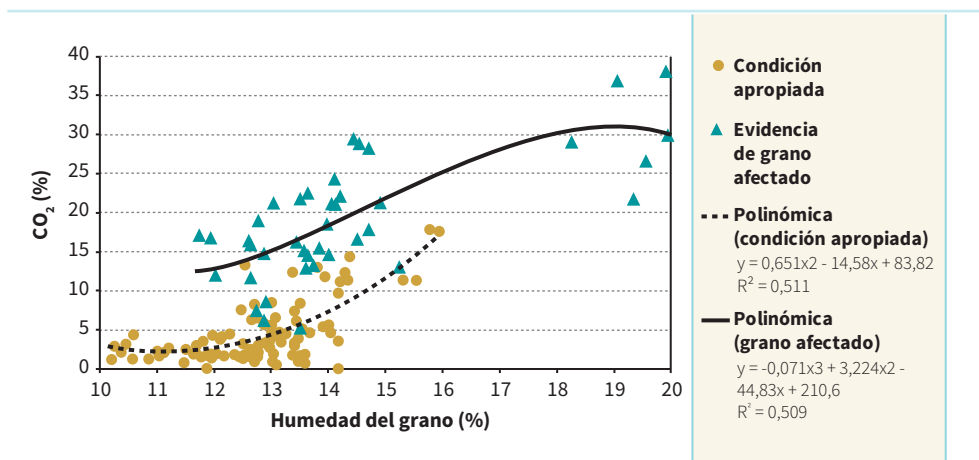


es posible realizar una medición de la concentración CO_2 de la bolsa. En este caso, no existe la posibilidad de comparar los resultados con valores anteriores para determinar si la actividad biológica se incrementó y la condición de almacenaje del grano se tornó insegura. Para estas situaciones otro tipo de aproximación es necesaria para relacionar la concentración CO_2 con la condición de almacenaje del grano.

La Figura 4 muestra que la concentración media de CO_2 para silo bolsas de trigo en condiciones de almacenaje apropiadas fue significativamente más baja que la concentración media para los silo bolsas con evidencia de grano afectado. Con CH inferiores al 13,0%, la diferencia entre las 2 líneas fue cerca de 10,0 puntos porcentuales de CO_2 , mientras que para el 16,0% de CH la diferencia se redujo a 7,5 puntos porcentuales. Se pudo observar que en los silo bolsas de trigo que están por debajo del 16,0% de CH, el grano afectado se localizó en las capas inferiores del grano. En estas bolsas se observaron varias perforaciones en la cubierta plástica, lo cual permitió la entrada de humedad (por las precipitaciones) y de O_2 . Las perforaciones fueron causadas por los animales (peludos y otros), o a causa de que la bolsa fue armada sobre los residuos de la cosecha anterior (los tallos perforan la bolsa si no se toman los cuidados apropiados durante la operación de armado y llenado de la bolsa). Otra causa de deterioro del grano estuvo relacionada a deficiencias en el cierre del extremo de la bolsa, lo cual permitió la entrada de humedad y O_2 al sistema. Finalmente, algunas bolsas se armaron sobre terrenos bajos que resultaron inundados temporalmente, después de una precipitación intensa. En esta última situación un silo bolsa sin roturas y bien cerrado es, normalmente, afectado.

Por otra parte, cuando el trigo se almacenó por encima del 18,0% de CH el grano resultó afectado, aún cuando no se observó ninguna rotura o falla en la confección de la bolsa. El grano de trigo excesivamente húmedo dio lugar a alta actividad de hongos, causando un proceso de descomposición generalizado del grano. Cierta acumulación de humedad fue observada en el interior de estas bolsas, que no presentaron perforaciones visibles. Se especula que ocurrió un proceso de condensación de humedad debido a la diferencia de temperatura entre el día y la noche. La recurrencia de este proceso podría dar lugar a una

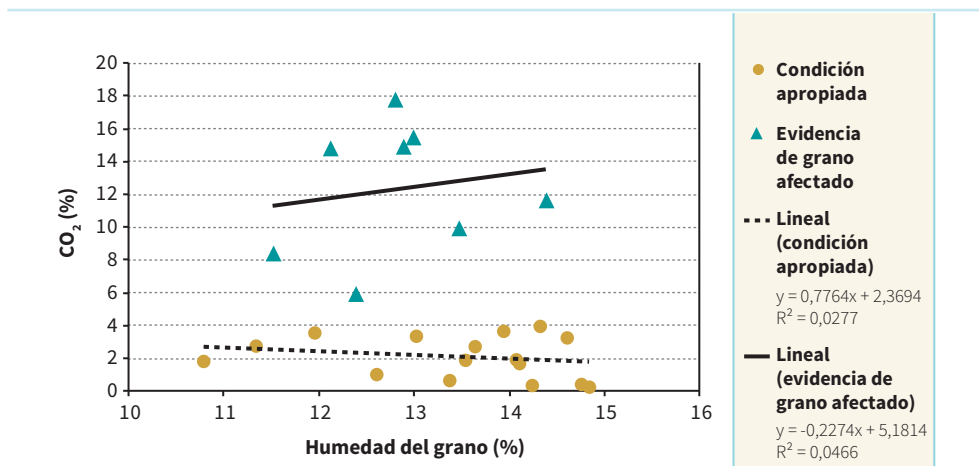
Figura 4. Concentración de CO_2 (%) en silo bolsas de trigo a diferentes contenidos de humedad del grano (%) y con la condición de almacenaje clasificada como apropiada y con evidencia del grano afectado.



significativa acumulación de agua en el sector del granel contiguo a la cubierta plástica, y causar que una capa de grano en este sector resulte afectada.

La Figura 5 muestra que la concentración media de CO₂ para los silo bolsas de soja, con condiciones de almacenaje apropiadas, fue significativamente más baja que la concentración media para los silo bolsas con evidencia de grano afectado. Por una parte, los silo bolsas de soja bajo condiciones de almacenaje apropiadas presentaron siempre valores de CO₂ por debajo del 4,0%, y no mostraron una tendencia en aumento el CO₂ con el incremento del CH. Por otra parte, los silo bolsas con evidencia de soja dañada dieron lugar a concentraciones CO₂ entre 6,0% y 18,0%, con un promedio entre 11,5% y el 14,0%. En contraste con los datos del trigo, en soja no se observó una relación clara entre el aumento de la concentración de CO₂ y el CH del grano (tanto en bolsas con el grano en condiciones de almacenaje apropiadas como en bolsas donde se evidenció grano afectado). Las razones que causaron la descomposición del grano fueron similares a las descritas para los silo bolsas de trigo (perforaciones en la cubierta plástica, el cierre incorrecto, o anegamientos temporales por causa de precipitaciones, etc.).

Figura 5. Concentración de CO₂ (%) en silo bolsas de soja a diferentes contenidos de humedad (%) y con la condición de almacenaje clasificada como apropiada y con evidencia del grano afectado.



De acuerdo a estos resultados, los autores proponen utilizar el monitoreo de la concentración de CO₂ para detectar problemas en bolsas en trigo y soja. En el caso de los silo bolsas de trigo, el operador debería medir la concentración de CO₂ y tomar también una muestra física de grano para determinar el CH. La concentración de CO₂ típica para la condición de almacenaje segura del trigo (para una determinada humedad) se obtiene de la Figura 4, y después se la compara con la concentración de CO₂ medida. Si la concentración CO₂ medida está por debajo de la concentración típica de CO₂, la condición de almacenaje se puede clasificar como “segura”. Por otro lado, si la concentración de CO₂ medida está por encima de la concentración de CO₂ segura, se clasifica la condición de almacenaje como “riesgosa” y el operador debe supervisar esta bolsa con mayor detalle. Finalmente, si la concentración de CO₂ medida es cercana o mayor a la concentración típica de CO₂ de una bolsa afectada, entonces la condición de almacenaje se clasifica como “insegura” e inmediatamente se debe tomar la decisión de extraer el grano del silo bolsa.

En el caso de los silos bolsas de soja, el CH del grano almacenado no es crítico para las condiciones del ensayo. Con un rango entre 11,0% y 15,0% de CH y una concentración de CO₂ por encima del 4,0%, la condición de almacenaje del silo bolsa se debe clasificar como “riesgosa”. En caso contrario, la condición de almacenaje de la bolsa se debe clasificar como “segura” (concentración de CO₂ por debajo del 4,0%). Cuando la concentración de CO₂ está cercana o por encima del 11,5% - 14,0%, la condición de almacenaje de la bolsa se debe clasificar como “insegura”.

Conclusiones

El monitoreo periódico de la concentración de CO₂ se puede utilizar como herramienta para detectar un aumento en la actividad biológica en bolsas y relacionarlo con procesos de descomposición del grano. Se determinó la concentración típica de CO₂ para silos bolsas de trigo y soja con evidencia de grano afectado y condiciones seguras de almacenaje.

El procedimiento consiste en medir la concentración de CO₂ en el silo bolsa y se la compara con la concentración de CO₂ típica para los silos bolsas con condiciones de almacenaje seguras e inseguras. Por comparación, la condición de almacenaje de la bolsa se clasifica como segura, riesgosa o insegura.

La concentración de CO₂ en silos bolsas de trigo en condiciones de almacenaje seguras aumenta con la humedad del grano (debajo del 5,0% de CO₂ para el 13,0% de humedad o menos, y hasta el 17,0% de CO₂ para el 16,0% de humedad).

La humedad del grano de soja no afecta substancialmente la concentración de CO₂ en silos bolsas con condiciones de almacenaje seguras (en un rango de humedades del 11,0% a 15,0%). Así, cualquier medida de concentración de CO₂ por debajo del 4,0% significa condiciones de almacenaje “segura”, entre el 4,0% y el 12,0% significa condiciones de almacenaje “riesgosa”, y por encima del 14,0% significa condición de almacenaje “insegura”.

Referencias

- Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2008. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo - bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Cardoso, L. y Crocche D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 589 - 592. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.

Evaluación de silo bolsas para almacenamiento temporario de trigo

Bhadriraju Subramanyam¹
Lakshmikantha Channaiah¹
Carlos Campabadal¹
John Lawrence¹
Leandro Cardoso²
Maier Dirk¹

Resumen

Se realizaron pruebas para evaluar la efectividad del silo bolsa para el almacenamiento de trigo duro rojo en condiciones de campo en Kansas, EE.UU. Se colocó trigo recientemente cosechado con un contenido de humedad (CH) del $11,6\% \pm 0,2\%$ en 4 silo bolsas, cada uno con una capacidad de 50,0 toneladas por un periodo de 4 meses desde el 24 agosto al 14 de diciembre de 2010. Los silo bolsas tenían una dimensión aproximada de 20,0 metros de largo y 3,0 metros de diámetro. En agosto la temperatura promedio de las capas superiores e inferiores de los granos en las bolsas fue de $32,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $26,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente. En diciembre, la temperatura promedio de la capa superior fue de $-3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ mientras la temperatura de la capa inferior estuvo en $13,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante el periodo de estudio, la humedad relativa de las capas superiores e inferiores de los granos fluctuó entre $46,7\%$ y $55,9\%$. La concentración de dióxido de carbono osciló entre $0,5\% \pm 0,05\%$ y $1,4\% \pm 0,3\%$ durante el periodo de estudio. El análisis de la calidad del trigo al principio y al final del periodo de almacenamiento indicaron claramente que los parámetros tales como el CH, la determinación del peso hectolítrico, falling number, el peso del grano no fueron afectados durante el periodo de almacenamiento en los silo bolsas. La concentración fúngica y los niveles de micotoxinas no cambiaron en forma significativa durante el almacenamiento. Los 30 adultos de *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleóptera: Bostrichidae), que se colocaron en cilindros de PVC dentro de los silo bolsas en agosto, aumentaron 10 veces al final del periodo de almacenamiento. El crecimiento poblacional de *R. dominica* en los cilindros de PVC dentro de los silo bolsas fue de 14 a 19 veces menor, si se compara con el crecimiento en cilindros de PVC colocados en laboratorio (cámara de cultivo a $28,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa del $65,0\%$). A pesar del bajo nivel de dióxido de carbono, los silo bolsas pueden uti-

¹Departamento de Ciencia e Industria de los Granos, Universidad Estatal de Kansas, Manhattan (Kansas), EE.UU.

²EEA INTA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

lizarse para el almacenamiento temporario de trigo cuando el espacio es limitado durante los años de sobreproducción de grano.

Palabras clave: silo bolsas, atmósferas modificadas, trigo, hongos, micotoxinas, calidad del trigo, *Rhizopertha dominica*

Introducción

Usualmente el trigo en los Estados Unidos se almacena en las granjas por periodos de 6 a 9 meses (Martin et al., 1977). En los años de cosecha abundante, el almacenamiento de trigo en los campos y acopios resulta un gran desafío, y ha obligado a los productores a vender sus cultivos a un precio menor del que normalmente existe en tiempo de cosecha. En tales circunstancias, los bajos precios del trigo ocasionaron una creciente demanda por una mayor capacidad de almacenamiento. Tanto los productores como los acopios de granos sobrelenan sus celdas/silos y deben montar estructuras de almacenamiento temporario. El sobrellenado de celdas y silos dificulta el manejo para mantener la calidad del grano. Por este motivo, es necesario investigar para encontrar sistemas alternativos de almacenamiento y evaluar su eficacia para mantener la calidad del grano, para minimizar los problemas fúngicos y los ocasionados por los insectos plaga de los granos almacenados. En los últimos años, la utilización de silo bolsas para almacenamiento de granos ha sido exitosa en los países latinoamericanos, especialmente en Argentina (Abalone et al., 2011 a). En estos silo bolsas, relativamente herméticos, el elevado dióxido de carbono (CO₂) y la disminución del nivel de oxígeno (O₂) pueden crear atmósferas modificadas que resultan perjudiciales para los insectos y los hongos (Fleurat - Lessard, 1990; Adler et al., 2000; Navarro, 2006). Últimamente, se están usando silo bolsas en EE.UU. y Canadá, en especial para el almacenamiento temporario de granos. En 2010 se condujo un estudio en colaboración con un acopio comercial de Kansas, que utilizaba silo bolsas para el almacenamiento de trigo. Tuvimos como objetivo determinar las condiciones ambientales dentro de los silo bolsas que contenían el trigo y evaluar el impacto del almacenamiento a corto plazo de trigo (4 meses) sobre los parámetros de calidad, la infección fúngica, y los efectos sobre el taladrillo de los granos, poblaciones de *Rhizopertha dominica* (F.) (Bostrichidae: Coleoptera).

Utilizando trigo duro rojo de invierno cosechado en 2010 (con un contenido de humedad (CH) de 11,6% ± 0,2%) se llenaron 4 silo bolsas, con una capacidad de 50,0 toneladas cada uno (20,0 m de largo y 3,0 m de diámetro). El grano se almacenó por un periodo de 4 meses, desde el 24 de agosto hasta el 14 de diciembre de 2010 en Manhattan, Kansas. Se registraron la temperatura del grano y la humedad relativa dentro del silo bolsa utilizando unidades de registro de datos o data loggers (HOBO®, Onset Computer Corp., Bourne, Massachusetts, EE.UU.). En cada bolsa se usaron 2 data loggers en cada uno de los 3 puntos de muestreo. En cada punto se colocó una unidad en el lado superior (dorsal) de la bolsa y en el fondo (1,0 a 1,5 m de profundidad) de la bolsa. Se monitorearon los niveles de CO₂ de cada silo bolsa en forma mensual, utilizando un dispositivo analizador de CO₂ (SilCheck, Buenos Aires, Argentina) en cada uno de los 3 puntos de muestreo.

Se recolectaron muestras de granos al comienzo del almacenamiento (24 de agosto), el 23 de octubre y el 14 de diciembre de 2010. Las muestras de granos se obtuvieron en

cada uno de los 3 puntos de muestreo usando un calador sonda para granos de 1,5 m de longitud. En cada extracción de muestra se dividió el contenido del calador a fin de separar la capa de granos superior (0 a 0,5m), media (0,5 a 1,0) e inferior (1,0 a 1,5m). En la zona superior, media o inferior, el calador recolectó 160 g de grano. En cada bolsa, se agruparon todas las muestras superiores y lo mismo se hizo con las muestras medias e inferiores. Los parámetros de calidad del trigo estudiados fueron los siguientes: peso hectolítrico del grano, contenido proteico, falling number, peso del grano, diámetro del grano y CH del grano. El peso, el diámetro y el CH de 300 granos se determinó utilizando el sistema único de caracterización de granos de Perten SKCS 4100 (Perten Instruments, Hägersten, Suecia). Todas las evaluaciones de calidad del trigo (con excepción de micotoxinas) se llevaron a cabo en el Laboratorio de Calidad de Trigo del Departamento de Ciencia e Industria del Grano, Universidad Estatal de Kansas, utilizando métodos oficiales aprobados.

También se realizó el recuento total de hongos (cfu/g) de las muestras utilizando Diclorán - Glicerol (DG 18) con medios de cultivo agarizado (Oxoid Limited, Hampshire, United Kingdom). Se cuantificaron los niveles de aflatoxina, fumonisina y vomitoxina en las muestras de trigo utilizando el método aprobado por AOAC (Asociación de Químicos Analíticos Oficiales, Gaithersburg, Maryland, EE.UU.) que se basa en un kit de ensayo de inmunoabsorción enzimática (ELISA) (kits de prueba ELISA AgraQuant® para micotoxinas, Romer Labs Inc., Union, Missouri, EE.UU.). Se usaron cilindros de PVC de 0,3 m de largo y 9,0 cm de diámetro en solo 2 de las 4 bolsas para evaluar cómo se desarrollarían las poblaciones de insectos dentro de los silos bolsas. Se pegó una malla de alta resistencia de 200 µm en los extremos de los cilindros. Se utilizó *R. dominica* para la prueba debido a que es una plaga de insectos asociada con el trigo de importante impacto económico en Kansas. Se relleno el 80,0% de cada cilindro (890,0 g) con trigo rojo duro orgánico de invierno (Heartland Mills, Marienthal, Kansas, EE.UU.), y se agregaron a cada cilindro 30 adultos asexuados de distintas edades criados sobre el mismo trigo a 28,0 °C y 65,0% de humedad relativa. Luego de introducir a los adultos, al extremo abierto del cilindro se pegó la malla. Se insertaron 2 cilindros con insectos (30 adultos) en cada silo bolsa en cada uno de los 3 puntos de muestreo haciendo un punto de entrada en la bolsa, que luego se selló con cinta adhesiva. Se colocó un total de 6 cilindros por silo bolsa. Un cilindro estaba en la parte superior (0 a 0,5m de profundidad) y el otro en la parte inferior (1,0 a 1,5 m de profundidad) en cada uno de los puntos de muestreo por bolsa. Se tomó la muestra de 3 cilindros de cada una de las 2 bolsas el 23 de octubre de 2010, y de los 3 restantes el 14 de diciembre de 2010. Los tratamientos de control incluyeron nueve cilindros con trigo e insectos colocados en una cámara de cultivo a 28,0 °C y con una humedad relativa del 65,0%, cuyas muestras fueron tomadas en agosto, octubre y diciembre. Se tamizó el trigo de los cilindros y se enumeró la cantidad de descendientes adultos producida (vivos y muertos para las muestras de octubre y diciembre).

Los datos del porcentaje de CO₂ sin transformación (porque los datos eran normales) se sometieron a un análisis bilateral de variación (ANOVA) por ubicación de muestras en bolsas y meses para determinar diferencias significativas (P = 0,05). Basándose en este análisis, se agruparon los datos según el punto de muestreo y sometidos a un análisis unilateral ANOVA y las medias entre meses se separaron con pruebas t de Bonferroni (SAS Institute, 2005). Los datos de parámetros de calidad del trigo (inalterados) se sometieron a un análisis bilateral de variación (ANOVA) para determinar diferencias significativas por

mes y profundidad de muestreo. Si los parámetros de calidad del trigo no se veían afectados por la profundidad del muestreo, los datos se agrupaban y se determinaban las diferencias entre meses a través de un análisis unilateral (ANOVA) y pruebas t Bonferroni. Se analizaron los conteos fúngicos individuales y los datos de micotoxinas utilizando un análisis bilateral de variación (ANOVA) para determinar diferencias entre los meses y profundidad de muestreo. Además, en cada mes, las diferencias entre las profundidades para el conteo fúngico y cada micotoxina se obtenían por medio de un análisis unilateral (ANOVA) y pruebas t Bonferroni. La información mensual de los insectos para cada una de las 2 bolsas y el tratamiento de control se analizó por medio de una prueba unilateral (ANOVA) seguida de la prueba Ryan - Einot - Gabriel - Welsch (REGWQ) para la separación de medias después de transformar los datos de conteo de insectos a una escala logarítmica.

Resultados y discusión

En el mes de agosto la capa superior e inferior de los granos dentro de las bolsas presentó una temperatura promedio de 32,3 °C y 26,7 °C respectivamente; en diciembre fue de -3,1 °C y 13,0 °C respectivamente. La humedad relativa promedio en agosto de la capa superior e inferior fue del 52,7% y del 55,9%, respectivamente. En diciembre los valores correspondientes fueron 46,6% y 51,7%. Los valores de CO₂ fueron considerablemente diferentes entre los meses de almacenamiento (F = 5,3; df = 4,5; P = 0,002), pero no entre los puntos de muestreo de las bolsas (F = 1,0; df = 2,5; P = 0,4). La interacción de los meses y puntos de muestreo tampoco fue de importancia (F = 0,7; df = 8,5; P = 0,6), lo que indica que las diferencias en los niveles de CO₂ entre los 3 puntos de muestreo se mantuvieron constantes a lo largo de los meses de almacenamiento. Por lo tanto, se agruparon los datos de ubicación de las muestras y el ANOVA unidireccional indicó diferencias significativas entre los meses (F = 4,3; df = 4,2; P = 0,02). Los niveles de CO₂ fueron semejantes entre agosto y octubre, y descendieron significativamente en diciembre (Tabla 1), probablemente debido al comienzo del clima frío. Sin embargo, los niveles observados (del 0,5% al 1,5%) fueron demasiado bajos para causar efectos adversos en los organismos biológicos. Newton (1991, 1993) señaló que los niveles de CO₂ deberían ser aproximadamente del 60,0% para controlar efectivamente a los insectos y ácaros de los productos almacenados. Los niveles del 10,0% al 30,0% de CO₂ pueden resultar tóxicos para los insectos siempre que el nivel de O₂ sea del 0,5% al 2,6% (Krishnamurthy et al., 1986).

Tabla 1.
Niveles de CO₂ en silo bolsas.

MES	MEDIA ± SD DEL NIVEL DE CO ₂ (%) ^A
Agosto	0,9 ± 0,2ab
Septiembre	1,5 ± 0,3a
Octubre	1,4 ± 0,1a
Noviembre	1,1 ± 0,2ab
Diciembre	0,5 ± 0,1b

^AMedias (n=4) seguidas de diferentes letras son significativamente distintas (P < 0,05).

La determinación del peso hectolítrico del grano de trigo no fue afectado por el tiempo de almacenamiento (Tipo III SS (1 valor omitido) $F = 1,7$; $df = 2,8$; $P = 0,2$) y la profundidad de la muestra ($F = 0,03$; $df = 8,8$; $P = 1,0$). La interacción entre el tiempo de almacenamiento y la profundidad de la muestra tampoco fue significativa ($F = 0,03$; $df = 16,8$; $P = 1,0$). El contenido de proteínas, el falling number, el peso del grano, el diámetro del grano y el CH del grano fueron significativamente diferentes entre los periodos o meses de almacenamiento (rango de $F = 4,5$ a $285,0$; $df = 2,8$; $P \leq 0,01$), pero no en las profundidades de muestreo (rango de $F = 0,1$ a $0,8$; $df = 8,8$; $P \geq 0,6$). La interacción entre el tiempo de almacenamiento ($df = 8,8$) y la profundidad de las muestras ($df = 16,8$) tampoco fue significativa (rango de $F = 0,2$ a $1,5$; $P \geq 0,2$). Debido a que los parámetros de calidad fueron similares entre las profundidades de muestreo, se agruparon los datos por profundidad y se analizaron las diferencias entre los periodos de almacenamiento para cada parámetro de calidad (exceptuando la determinación del peso hectolítrico del grano) utilizando un análisis ANOVA unidireccional. Sin embargo, este análisis reveló que solo las proteínas y la humedad variaron entre agosto, octubre y diciembre (Tabla 2). La ausencia de diferencias entre los periodos de almacenamiento del falling number, el peso del grano y la materia seca se ocasionó, probablemente, por el agrupamiento de datos en las profundidades de muestreo, que eliminó cualquier variación debido a las profundidades de muestreo.

Tabla 2.

Media \pm SD (desviación estándar) de los parámetros de calidad del trigo por mes de almacenamiento.

MES	DET. DEL PESO HECTOLÍTRICO DEL GRANO (KG/HL) ^A	PROTEÍNAS (%) ^A	ÍNDICE DE CAÍDA (SEG) ^B	PESO DEL GRANO (MG) ^A	DIÁMETRO DEL GRANO (MM) ^A	HUMEDAD DEL GRANO (%) ^B
Agosto	79,0 \pm 1,8	12,6 \pm 0,2	411,1 \pm 8,5c	27,8 \pm 0,4	2,6 \pm 0,01	11,6 \pm 0,2a
Octubre	79,2 \pm 0,3	13,1 \pm 0,2	553,1 \pm 10,3a	28,2 \pm 0,3	2,6 \pm 0,02	10,8 \pm 0,4
Diciembre	77,8 \pm 2,1	12,9 \pm 0,1	490,0 \pm 5,3b	27,7 \pm 0,2	2,6 \pm 0,02	11,3 \pm 0,1a

^AMedias (n=4) entre meses para cada variable no fue significativa (rango de $F = 0,2$ a $1,2$; $df = 2,9$; $P > 0,2$).

^BMedias (n=4) dentro de los meses seguidos de distintas letras son significativamente distintas ($P < 0,05$).

Los conteos fúngicos variaron según el tiempo de almacenamiento ($F = 13,8$; $df = 2,3$; $P < 0,0001$) y según la profundidad de las muestras en las bolsas ($F = 119,1$; $df = 2,8$; $P < 0,001$), pero la interacción del periodo de muestreo y profundidad no fue significativo ($F = 0,2$; $df = 4,3$; $P = 0,9$).

Por lo tanto, se determinaron diferencias entre las profundidades de las muestras y cada mes. Los resultados indicaron considerables diferencias entre las 3 profundidades durante agosto, octubre y diciembre (rango de $F = 33,0$ a $55,5$; $df = 2,9$; $P < 0,0001$) (Tabla 3). En general, los conteos fúngicos de 1,0 a 1,5 m de profundidad fueron marcadamente superiores a los de 0 a 0,5 m y de 0,5 a 1,0 m de profundidad.

No se produjeron variaciones en el nivel de aflatoxina según el tiempo de almacenamiento ($F = 1,26$; $df = 2,3$; $P = 0,3$), pero la concentración de la toxina varió según la profundidad de la muestra ($F = 11,2$; $df = 2,3$; $P = 0,0003$). La interacción del periodo de muestreo y de la profundidad de muestreo no fue significativa ($F = 0,5$; $df = 4, 3$; $P = 0,8$). En

Tabla 3.

Propágulos del hongo (cfu/g) por mes de almacenamiento y profundidad de muestreo en los silo bolsas.

MES	PROFUNDIDAD DE MUESTREO (M)	MEDIA ± SD (DESVIACIÓN ESTANDAR) CFU/G ^{A,B}
Agosto	0 - 0,5	127,5 ± 4,3b
	0,5 - 1,0	145,0 ± 8,9b
	1,0 - 1,5	218,8 ± 10,9a
Octubre	0 - 0,5	138,8 ± 4,3b
	0,5 - 1,0	162,5 ± 7,5b
	1,0 - 1,5	242,5 ± 13,8a
Diciembre	- 0,5	157,5 ± 2,5b
	0,5 - 1,0	173,8 ± 5,5b
	1,0 - 1,5	257,5 ± 12,5 ^a

^acfu/g, unidades formadoras de colonias por gramo.

^bMedias (n = 4) en los meses seguidos de letras diferentes son

^c significativamente distintas (P < 0,05).

el caso de fumonisina y vomitoxina, tanto el tiempo de muestreo como la profundidad de la muestra fueron significativas (rango de F = 3,7 a 46,5; df (para ambas variables) = 2,3; P ≤ 0,04), pero la interacción del tiempo de muestreo y profundidad no resultó considerable (F > 0,4; df = 4,3; P > 0,7). El análisis ANOVA unidireccional por mes de almacenamiento demostró que ambos niveles de fumonisina y vomitoxina fueron más altos en diciembre que en agosto u octubre (Tabla 4).

Tabla 4.

Niveles de micotoxina (media ± SD) según mes de almacenamiento y profundidad de muestreo en los silo bolsas.

MES	PROFUNDIDAD DE MUESTREO (M)	AFLATOXINAS TOTALES (PPB)	FUMONISINAS (PPM) ^{B,C}	VOMITOXINAS/DON (PPM) ^{B,C}
Agosto	0 - 0,5	0,5 ± 0,05	0,07 ± 0,02b	0,02 ± 0,02b
	0,5 - 1,0	0,2 ± 0,2	0,3 ± 0,06b	0,1 ± 0,05b
	1,0 - 1,5	0,6 ± 0,3	0,5 ± 0,1a	0,4 ± 0,02a
Octubre	0 - 0,5	0,1 ± 0,1	0,1 ± 0,5b	0,1 ± 0,05b
	0,5 - 1,0	0,3 ± 0,2	0,4 ± 0,1a	0,3 ± 0,07b
	1,0 - 1,5	0,7 ± 0,2	0,6 ± 0,1a	0,6 ± 0,06a
Diciembre	- 0,5	0,1 ± 0,2b	0,2 ± 0,05c	0,2 ± 0,07b
	0,5 - 1,0	0,3 ± 0,2b	0,5 ± 0,08b	0,3 ± 0,08b
	1,0 - 1,5	1,1 ± 0,3a	0,7 ± 0,08a	0,7 ± 0,07a

^aMedia (n = 4) de los niveles de aflatoxina en los meses no fueron significativos (F > 2,0; df = 2,9; P > 0,08; ANOVA unidireccional).

^bLos niveles de fumonisina y vomitoxina en los meses fueron significativos (rango de F = 8,4 a 32,2; df = 2,9; P < 0,009; ANOVA unidireccional).

^cPara cada mes, las medias seguidas por distintas letras son significativamente diferentes (P < 0,05).

Se observó esta tendencia con aflatoxina solamente en las muestras de diciembre; las muestras de agosto y octubre presentaron niveles de aflatoxina similares, independientemente de la profundidad del muestreo. Resulta difícil explicar el elevado nivel de contaminación fúngica y de micotoxinas debido a que la humedad de las muestras tomadas a diferentes profundidades fue esencialmente similar como se determinó en el laboratorio con muestras recogidas en el campo (ver Tabla 2). Las muestras de trigo de la parte inferior contenían una cantidad algo mayor de granos rotos, polvo y granos infectados (observación visual) que las muestras de la parte superior. Los granos dañados y rotos se contaminan con hongos y micotoxinas con mayor facilidad (Shotwell et al., 1985). Además, las muestras de la parte inferior estaban cerca del suelo con los consiguientes cambios de la temperatura del suelo y humedad que afectan los patrones de diferencia de temperatura y migración de humedad en los silos bolsa, razones que contribuyen a aclarar por qué las muestras inferiores presentaron conteos fúngicos y niveles de micotoxina más elevados. Durante el periodo de almacenamiento los silos bolsas resultaron dañados por plagas tales como roedores. Además, los silos bolsas fueron gravemente perjudicados el carcoma grande de los granos (*Tenebroides mauritanicus* L.) El daño ocasionado por estas plagas en la interface del suelo y del silo bolsa puede haber producido la filtración de humedad en el fondo de la bolsa, y el consecuente aumento de los niveles fúngicos y de micotoxina.

El número de adultos *R. dominica* en los cilindros de PVC aumentó significativamente en octubre y diciembre en cada una de las 2 bolsas y en el tratamiento de control ($F = 2006,2$; $df = 8,2$; $P < 0,001$) (Tabla 5). Los 30 adultos introducidos en el tratamiento de control a 28,0 °C y una humedad relativa del 65,0% aumentaron de 102 a 140 veces hacia octubre y diciembre, respectivamente. Sin embargo, los cilindros de PVC con insectos dentro de los silos bolsas presentaron un aumento numérico de *R. dominica* de 7 a 10 veces mayor en octubre y diciembre. Por lo tanto, el número de los *R. dominica* adultos en cilindros de PVC en los silos bolsas fue de 14 a 19 veces menor que el observado en los cilindros ubicados a 28,0 °C y una humedad relativa del 65,0%. El bajo número encontrado en los silos bolsas no fue debido a los bajos niveles de CO₂ sino debido al comienzo de un clima

Tabla 5.

Adultos de *R. dominica* en cilindros de PVC en silos bolsas y en una cámara de cultivo.

TRATAMIENTO	MES	MEDIA ± SD ^A DE NÚMERO DE ADULTOS/CILINDRO
Bolsa C	Agosto	30,0 ± 0,0f
	Octubre	198,0 ± 7,2e
	Diciembre	276,0 ± 25,2cd
Bolsa D	Agosto	30,0 ± 0,0f
	Octubre	226,7 ± 3,4de
	Diciembre	308,2 ± 13,6c
Cámara (28,0 °C/65,0% humedad relativa)	Agosto	30,0 ± 0,0f
	Octubre	3066,0 ± 103,2b
	Diciembre	4206,7 ± 173,0a

^aMedias (n=3) seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

más frío durante septiembre, octubre y noviembre que puede haber prolongado el periodo de desarrollo del insecto.

Los niveles de CO₂ en el espacios intersticial del trigo almacenado en los silo bolsas están condicionados por los cambios en la temperatura del grano, la humedad y el periodo de almacenamiento (Abalone et al., 2011 a). Para el trigo con CH del 12,0% al 13,0%, el nivel de O₂ intersticial fue superior al 12,0% y el de CO₂ fue menor a 7,0%, después de 6 meses de almacenamiento (Abalone et al., 2011 b). Nuestro estudio de 4 meses demostró que los silo bolsas pueden ser utilizados para almacenar trigo duro rojo de invierno sin pérdida apreciable de la calidad del trigo, pero los niveles de CO₂ observados no fueron suficientemente altos para evitar el desarrollo de insectos y hongos, y prevenir la contaminación de micotoxinas. Las bajas concentraciones de CO₂ observadas pueden deberse a grietas en el sellado de ambos extremos de las bolsas o pérdida de CO₂ por el daño ocasionado por roedores y larvas del carcoma grande de los granos. El trigo en silo bolsas debe ser almacenado en suelos nivelados con buen drenaje y en suelos sin piedras o grava. Resulta difícil proteger a las bolsas de los roedores si estas se encuentran en las granjas al aire libre o en los acopios, pero se puede prevenir el ataque de insectos, especialmente de aquellas especies que pueden penetrar los silo bolsas, fumigando el exterior de las bolsas con un insecticida aprobado.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación fue una colaboración conjunta entre el Departamento de Ciencia e Industria del Grano, Universidad Estatal de Kansas y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Balcarce, Argentina. Queremos agradecer a la Asociación Cooperativa de Granjeros de Manhattan, Kansas, por permitirnos conducir este trabajo. Esta investigación fue copatrocinada por Akron Silobag Equipment (Canadá) e IPESA Silo (Argentina).

Referencias

- Abalone R.; Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodriguez J. 2011 a. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo bag. Part I: Model development and validation. *J. Stored Prod. Res.* 47:268 - 275.
- Abalone R. y Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodriguez J. 2011 b. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo bag. Part II: Model sensitivity and grain storage conditions. *J. Stored Prod. Res.* 47:276 - 283.
- Adler C.; Corinth H.G. y Reichmuth C. 2000. Modified atmospheres, pp.105 - 146. En: Subramanyam B.; Hagstrum D.W. (Ed.). Alternatives to pesticides in stored - product IPM, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, USA.
- Fleurat - Lessard F. 1990. Effect of modified atmospheres on insect and mites infesting stored products, pp. 21 - 38. En: Calderon M.; Barkai - Golan R. (Eds.). Food preservation by modified atmospheres, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, USA.
- Krishnamurthy T.S.; Spratt E.C. y Bell C.H. 1986. The toxicity of carbon dioxide to adult beetles in low oxygen atmospheres. *J. Stored Prod. Res.* 22:145 - 151.

- Martin M.A.; Edwards C.R.; Mason L.J. y Maier D.E. 1997. Stored wheat IPM practices and pesticide use in key regions of the United States and Canada: 1996, Agricultural Research Program, B - 752, Purdue University, and West Lafayette, Indiana, USA.
- Navarro S. 2006. Modified atmospheres for the control of stored product insects and mites, pp. 105 - 145. En: Heaps JW (Eds.), Insect management for food storage and processing, American Association of Cereal Chemists International, St. Paul, Minnesota, USA.
- Newton J. 1991. Carbon dioxide fumigation in a heated portable enclosure, pp. 877 - 885. En: Fluerat - Lessard F.; Ducom P. (Ed.), Proceedings of the Fifth International Working Conference on Stored - Product Protection, Volume 2, Bordeaux, Francia.
- Newton J. 1993. Carbon dioxide as a fumigant to replace methyl bromide in the control of insects and mites damaging stored products and artefacts, pp. 329 - 338. En: Wildey K.B.; Robinson W.H. (Ed.), Proceedings of the First International Conference on Urban Pests, 30 de junio al 3 de julio, Cambridge, Inglaterra.
- SAS Institute. 2005. SAS/STAT User Guide. Version 9.1.3, SAS Institute, Cary, North Carolina, USA.

Estudio del efecto de la media sombra sobre la calidad de semilla de soja (*Glycine max* (L.)) almacenada en bolsas plásticas

Gustavo Clemente¹

Beatriz Peppi²

Cristiano Casini³

Marcelo Pagliero⁴

Diego Mauricio Santa Juliana³

Resumen

La difusión del almacenamiento de granos de cereales y oleaginosas en silo bolsas en Argentina ha sido constante en estos últimos años, habiéndose depositado en ese sistema 35,0 millones de toneladas en la campaña agrícola 2007/08. La expansión de este tipo de almacenamiento, principalmente se concretó a nivel de productor agropecuario, luego llegó a las cooperativas, los acopios y las industrias. Posteriormente, varios semilleros productores de simiente de alta calidad comenzaron a utilizar el silo bolsa con diversos resultados, quedando sin respuesta una serie de problemas específicos sin resolver.

Por tal motivo, se estableció como objetivo evaluar la calidad fisiológica de semillas de soja durante el periodo de almacenamiento en silo bolsas con diferentes contenidos de humedad (CH) de las semillas. Estudiar el efecto de la media sombra sobre la calidad de la semilla de soja almacenada en silo bolsas, comparando diferentes cultivares y humedades de la semilla.

Se utilizaron dos variedades de soja, con CH de semilla del 10,8% (seca) y 15,7% (húmeda). En el mes de julio se colocó la cobertura de media sombra en forma longitudinal sobre la mitad de las bolsas. Se fueron tomando muestras en la parte superior, media e inferior del silo bolsa, en el sector cubierto y en el descubierto, cada 60 días hasta el mes de diciembre del mismo año.

Existieron diferencias en la conservación de semilla húmeda para las diferentes variedades. Se determinó que la cobertura de media sombra fue efectiva cuando se almacenó semilla con altos CH. Cuando el CH de los granos es inferior al establecido como límite para un almacenamiento seguro (13,5%) la cobertura de media sombra no mostró diferencias que justifiquen su implementación. Al almacenar

¹Universidad Nacional de Villa María (Córdoba), Argentina.

²Tesista M. Sc. Facultad de Ciencias Agrarias, UNC (Córdoba), Argentina.

³INTA EEA Manfredi (Córdoba), Argentina.

semilla con alto CH se produce una estratificación de la misma, lo cual se evidencia por la fuerte caída del PG. Bajo las mismas condiciones de almacenamiento, con alto CH, con la implementación de la cobertura de media sombra no se observó el proceso de estratificación de la humedad, lo cual fue muy efectivo para disminuir el deterioro de las semillas.

Palabras clave: silo bolsa, media sombra, semilla de soja, calidad.

Introducción

El noroeste de la provincia de Buenos Aires, este de La Pampa y el sudoeste de Santa Fe, comprenden una región donde el cultivo de soja ha experimentado, en las últimas campañas, un incremento notable en cuanto a superficie destinada reemplazando a otras producciones tradicionales. Este incremento en la superficie sembrada, sumado a la incorporación de nuevas variedades, demanda mayor cantidad de semilla a las empresas semilleras. Esto implica la necesidad de instrumentar estrategias para producir semillas de soja de óptima calidad para poder ofrecerla al mercado como semilla de categoría básica u original, a costos competitivos.

Para evitar el daño mecánico y disminuir al mínimo posible las pérdidas de precosecha y cosecha, la recolección se realiza con altos contenidos de humedad (CH). Existen diversos métodos de secado para la conservación de semilla en sistemas tradicionales (silos de chapa y mampostería). Estos incluyen la adaptación de secadoras comerciales, al secado con aire natural a baja temperatura o calentado hasta 7,0 °C por sobre la temperatura ambiente. Estos son métodos de acondicionamiento muy lentos, pero su principal ventaja es la calidad final de la semilla, ya que producen muy bajo porcentaje de fisurado y baja la variabilidad en el CH individual de las semillas que componen el lote. En contrapartida, al anticipar la cosecha se produce un alto volumen de semilla en un corto plazo de tiempo, que no puede ser acondicionada, y debe ser almacenada de manera transitoria hasta que pueda ser secada y enfiada con los métodos apropiados.

Es importante tener en cuenta que la semilla, como todos los organismos vivos, obtienen la energía necesaria para sus procesos metabólicos: la respiración (proceso de oxidación que se produce utilizando sus sustancias de reservas). La humedad y la temperatura son las 2 variables que más afectan el comportamiento de las funciones biológicas. El agua es el medio donde se realizan la mayoría de las reacciones bioquímicas, hidrata los tejidos de la semilla y favorece una mayor difusión de gases, lo cual acelera el proceso de respiración. Con respecto a la temperatura, esta actúa como catalizador de las reacciones bioquímicas. Por lo general, el aumento de la temperatura puede acelerar la respiración 2 o 3 veces hasta un cierto límite, por encima del cual disminuye como resultado de los efectos destructores de las altas temperaturas sobre las enzimas.

Dentro del silo estas 2 variables se combinan de diferentes formas que pueden afectar a la correcta conservación de los granos. Debido a que pueden generar un ambiente propicio para el desarrollo de plagas y enfermedades. Por ejemplo, temperaturas por encima de los 18,0 °C son adecuadas para el desarrollo de insectos, y si a esto se suma un CH en la semilla superior al 13,5%, aumentan los riesgos de germinación y ataques de hongos, Rodríguez et al. (2006). Por lo tanto, mantener las semillas con temperaturas bajas y cons-

tantes es el mejor procedimiento para su larga conservación, puesto que cuanto mayor sea la temperatura, menor debe ser el CH de la semilla para una determinada humedad relativa del aire intergranario.

Es importante, en todo sistema de almacenamiento, tener en cuenta el concepto de humedad relativa de equilibrio (HRE), esta determina la máxima condición de humedad relativa (presión de vapor) que se puede alcanzar en el espacio intergranario para un determinado CH de las semillas almacenadas. Este es un sistema dinámico por el cual se equilibra la misma cantidad de humedad que entra con la que sale de la semilla, dado que este es un material higroscópico que absorbe o pierde agua con respecto a la atmósfera intergranaria; esto produce un intercambio dinámico hasta que se alcanza el equilibrio, que a su vez puede ser modificado por la temperatura.

La importancia de este concepto radica en que la mayoría de los hongos del almacenaje, principal causa de deterioro de las semillas durante la poscosecha, no pueden desarrollarse con humedades relativas del espacio intergranario inferiores a 67,0%.

En una encuesta, elaborada en 2008 sobre 42 semilleros, se determinó que un 4,0% de los establecimientos guardan exclusivamente en silo bolsas las semillas previo a su procesamiento, y en la etapa posterior, antes de su utilización final (CONAPRE, 2008). Teniendo en consideración que mediante el empleo del silo bolsa se reducen costos y permite una mayor segregación de materiales, es de prever que su empleo se acrecentará con el transcurso de los años. Es importante entonces que se genere información para brindar precisiones respecto de la humedad adecuada del lote para ser almacenado, la dinámica de los factores que afectan a la viabilidad, el vigor y la sanidad de las semillas durante el periodo de almacenamiento previo a su posterior utilización.

De acuerdo a lo expuesto se proponen los siguientes objetivos: evaluar la calidad fisiológica de semillas de soja durante el periodo de almacenamiento en silo bolsas con diferentes contenidos de humedad de las semillas. Estudiar el efecto de la media sombra sobre la calidad de la semilla de soja almacenada en silo bolsas, comparando diferentes cultivares y humedades de la semilla.

La finalidad de este trabajo es obtener información con relación al CH y tiempo de almacenamiento en silo bolsas, que permita almacenar sin riesgo de deterioro de la calidad para ser acondicionada y/o procesada cuando las condiciones ambientales de la zona lo permitan.

Materiales y métodos

El lugar de emplazamiento de los silo bolsas fue en la localidad de Lincoln, al noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Se utilizaron 2 cultivares de soja (Tabla 1), el embolsado se realizó a mediados de abril de 2009, con un CH entre el 10,8 y 15,7%.

Ambas variedades fueron almacenadas en silo bolsas de 1,8 m de diámetro, 250 µm de espesor y 60,0 m de largo (con un volumen aproximado de 152,0 m³); se almacenaron aproximadamente entre 100,0 y 110,0 toneladas por bolsa.

En el mes de julio se colocó cobertura de media sombra (80,0% de cobertura) abarcando la mitad de cada uno de los silo bolsas (30,0 m de longitud). La media sombra se dis-

Tabla 1.

Información sobre el material utilizado en el ensayo.

CULTIVAR	GRUPO DE MADUREZ	FECHA DE EMBOLSADO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)
A - 3770 RG (Nidera semillas)	3,0	15 al 18 / 04 / 2003	10,8 - 15,5
A - 4910 (Nidera semillas)	4,9	14 / 04 / 2003	15,7

tanci3 0,5 m del silo bolsa, permitiendo el pasaje de aire entre ambas (Figura 1) a fin de reducir los efectos de la incidencia de la radiaci3n solar recibida (Casini, 2002).

Cada bolsa se dividi3 en 2 secciones, denominadas “con cobertura de media sombra” y “sin cobertura de media sombra”. Dentro de cada secci3n se tomaron 3 puntos de muestreo, los cuales se dividían de acuerdo a su posici3n relativa en el interior del silo bolsa: superior (desde la superficie de la semilla en contacto con el pl3stico hasta los primeros 0,4 m de profundidad en la masa de grano), medio (desde 0,4 m a 1,0 m de profundidad) e inferior (desde 1,0 hasta 1,5 m de profundidad en el silo bolsa).

Sobre las muestras de semillas obtenidas se determin3 el poder germinativo (PG) seg3n procedimientos del ISTA (1999), dado que esta variable es la de mayor importancia en la producci3n de semilla. Tambi3n se tomaron datos de la temperatura, la humedad relativa del aire intergranario y CH de la semilla durante diferentes momentos del almacenaje.



Figura 1.
Silo bolsa con cobertura de media sombra.

Resultados y discusi3n

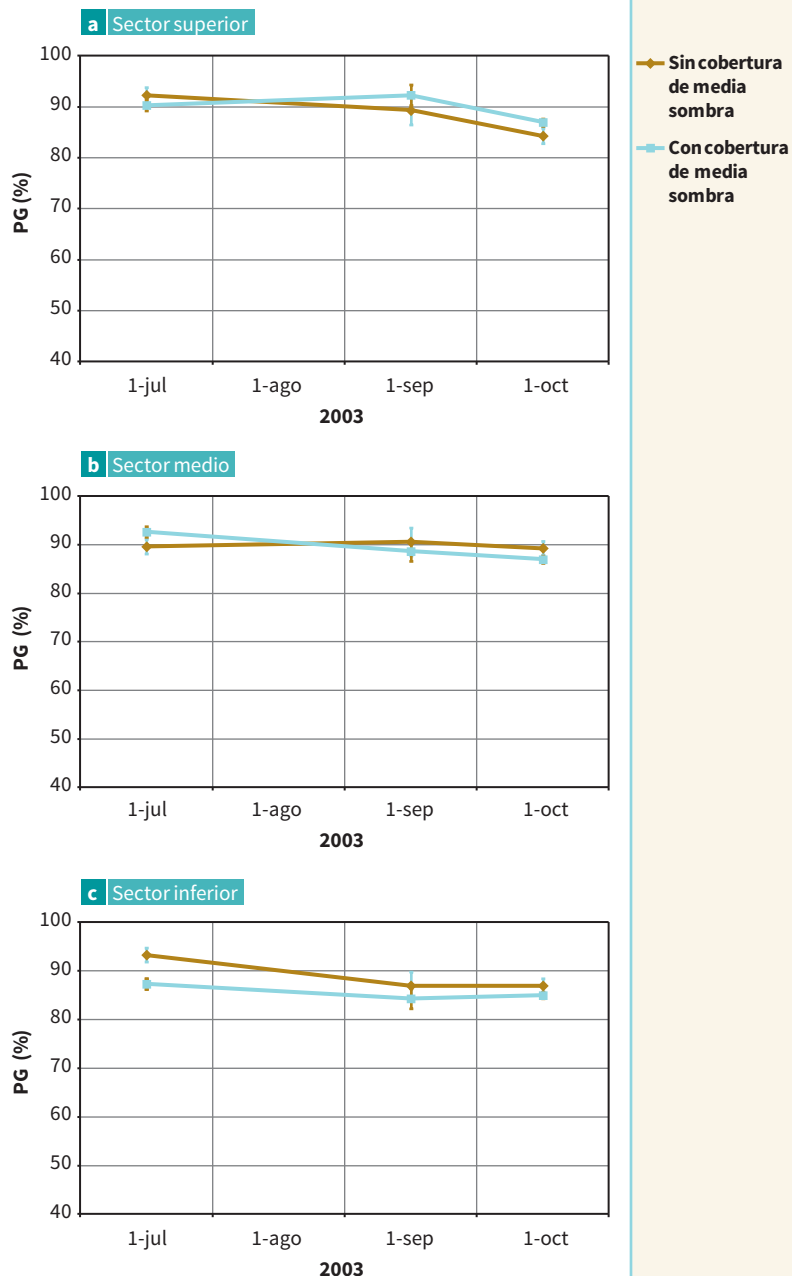
Poder germinativo

Se observ3 que a lo largo del periodo de ensayo, en las diferentes secciones (con cobertura y sin cobertura de media sombra) existi3 un comportamiento dispar entre las variedades. Al inicio del ensayo ambas variedades poseían un PG similar (entre 95,0% y 96,0%). No obstante, con el transcurso del periodo de almacenamiento la variedad A - 3770 RG mostr3, independientemente de las secciones y sectores, un mejor comportamiento, (Figuras 2 y 3).

Para la variedad A - 4910 el PG fue, para la secci3n sin cobertura de media sombra, inferior al valor mínimo requerido para utilizaci3n como semilla (establecido en un 80,0%), independientemente del sector. La secci3n con cobertura de media sombra, mantuvo PG por encima del 80%, salvo las semillas ubicadas en el sector superior, que en octubre alcanzaron un PG del 74,0% (Figura 3 a). La semilla almacenada no fue acondicionada hasta el mes de diciembre, momento en el cual el sector superior del silo bolsa mostraba un PG

Figura 2.

Poder germinativo (PG; %) en los sectores superior (a), medio (b) e inferior (c) en el silo bolsa con soja A - 3770 a 15,5% de humedad, con cobertura y sin cobertura de media sombra.



del 70,0% para la sección con cobertura y del 22,0% para la sección sin cobertura. En los sectores medio e inferior de la sección con cobertura el PG fue del 83,0% y 90,0% respectivamente. En cambio, para la sección sin cobertura, el PG en diciembre fue del 60,0% para la parte media y del 74,0% en la parte inferior de la bolsa (Figura 3 b, c).

Figura 3.

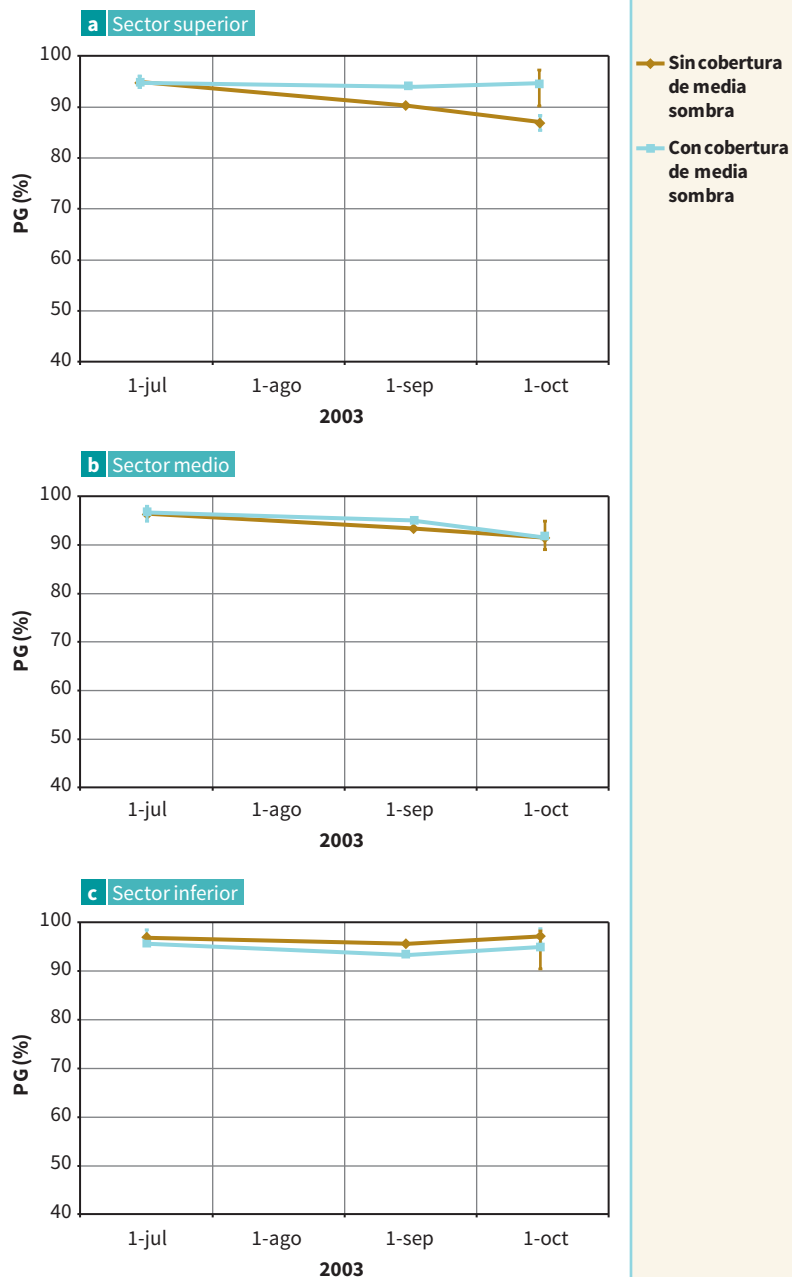
Poder germinativo (PG; %) en el sectores superior (a), medio (b) e inferior (c) del silo bolsa con soja A - 4910 (15,7% de humedad), con cobertura y sin cobertura de media sombra.



Con respecto a la variedad A - 3770, independientemente de la sección y del sector, presentó un PG superior al 80,0% al momento de ser acondicionada en octubre. No obstante, en el sector superior sin cobertura se registró el valor mínimo de 87,0%, mientras

Figura 4.

Poder germinativo (PG; %) en los sectores superior (a), medio (b) e inferior (c) en el silo bolsa con soja A - 3770 a 10,8% de humedad, con cobertura y sin cobertura de media sombra.



que los sectores medios y bajos tuvieron similares comportamientos, independientemente de la presencia o no de cobertura de media sombra.

También se almacenó dicha variedad, de otro lote, con una humedad promedio de los granos del 10,8%; en la Figura 4 (a, b, c) podemos observar que el PG, en los diferentes

sectores, presentó muy poca variación desde el inicio del ensayo donde poseía valores del 92,0%, llegando a octubre con un PG del 87,0% para la sección con cobertura de media sombra y del 84,0% para la sección sin cobertura en el sector superior, más cercano al plástico. Los sectores medio e inferior registraron una caída menor en los porcentajes de PG, mostrando, en ambos casos, que la cobertura de media sombra tiene un mejor comportamiento con respecto a la sección sin cobertura.

Temperatura y humedad relativa del ambiente intergranario

De los datos sobre la temperatura de los granos y humedad relativa (HR) del ambiente intergranario, relevados en profundidad dentro del perfil de granos, desde la superficie del plástico hasta 1,2 m dentro de la masa del granel, se observa, en las Figuras 5 y 6, que la temperatura siempre fue superior en la sección sin cobertura en comparación a la sección con cobertura de media sombra para ambas variedades (A - 3770 RG y A - 4910). Si bien esa diferencia se mantuvo a lo largo de todo el perfil observado, la misma es de baja intensidad y no supera los 2,0 °C; los valores máximos se midieron en la zona cercana a la superficie cercana al polietileno del silo bolsa. Esto se debe a que los granos tienen una muy baja conductividad térmica, del orden del 0,0004 cal cm⁻¹ s⁻¹, es decir que tiene una capacidad aislante, En el corto plazo evaluado, la temperatura ambiente no alcanzó valores suficientemente altos, ni prolongados en el tiempo, como para afectar la temperatura de los granos ni mostrar diferencias entre las secciones. Estos resultados no coinciden con lo registrado Casini et al. (2009 b) donde la cobertura de media sombra mostró una brecha de 5,4 °C en diciembre, mientras que para el periodo julio - septiembre no había diferencias entre secciones con cobertura y sin cobertura.

La información de temperatura también coincide con otros trabajos publicados por diferentes autores (Luque et al., 2003; Casini et al., 2009 a) donde se constata, además, que la temperatura de la semilla dentro de la silo bolsa herméticamente cerrada siguió el

Figura 5.

Temperatura (°C) a diferentes profundidades (cm) de la semilla, para los sectores con cobertura y sin cobertura de media sombra, del silo bolsa con la variedad A - 3770.

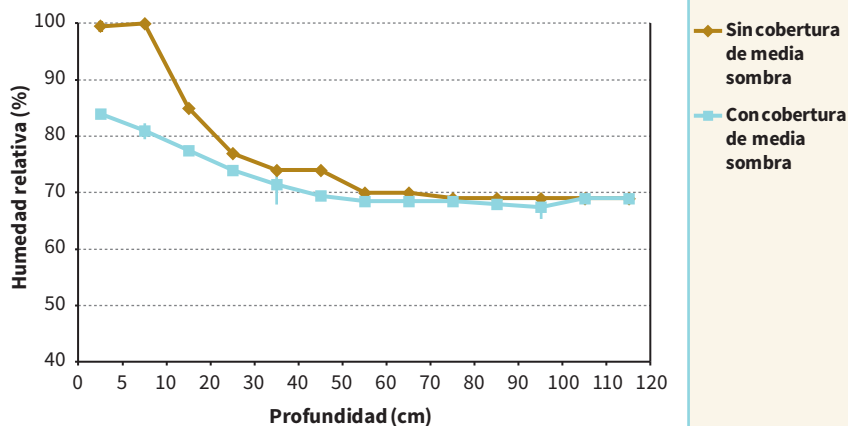
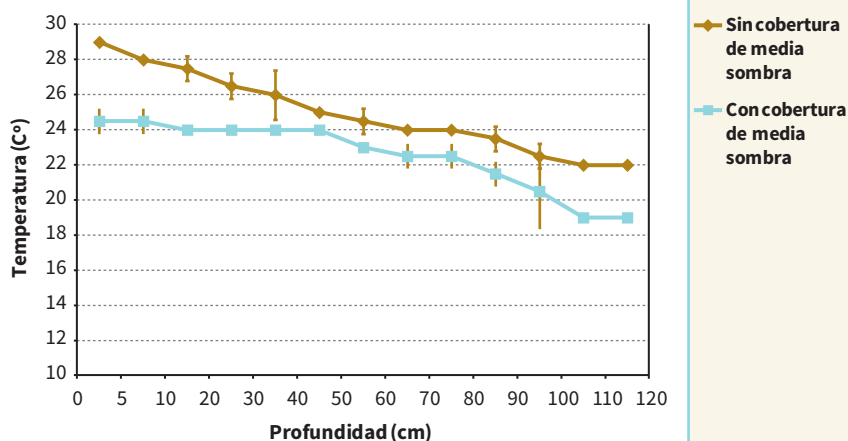


Figura 6.

Temperatura (°C) a diferentes profundidades (cm) de la semilla, para los sectores con cobertura y sin cobertura de media sombra, del silo bolsa con la variedad A - 4910.



patrón de la temperatura ambiente promedio, efecto observado por Bartosik et al. (2002), Cardoso et al. (2009 a), Hidalgo et al. (2009) y Pozzolo et al. (2009 a, b). Cuando la soja es embolsada a fines del otoño o principios del invierno, la temperatura de la semilla comienza con un mínimo y luego aumenta con el incremento de la temperatura del aire durante la primavera, alcanzando el máximo en el verano. La bolsa fue capaz de disipar el calor de la semilla, al aire y al suelo, en un par de meses luego del embolsado. Esto podría explicarse porque la relación volumen/superficie es sustancialmente inferior para una silo bolsa ($0,7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ para 200,0 toneladas de capacidad), que para un sistema de almacenamiento convencional (silo de chapa) de similar capacidad ($1,3 \text{ m}^3/\text{m}^2$ para 7,0 m de diámetro y 9,0 m de altura para 200,0 toneladas de capacidad) (Bartosik et al., 2004).

Contenido de humedad de los granos

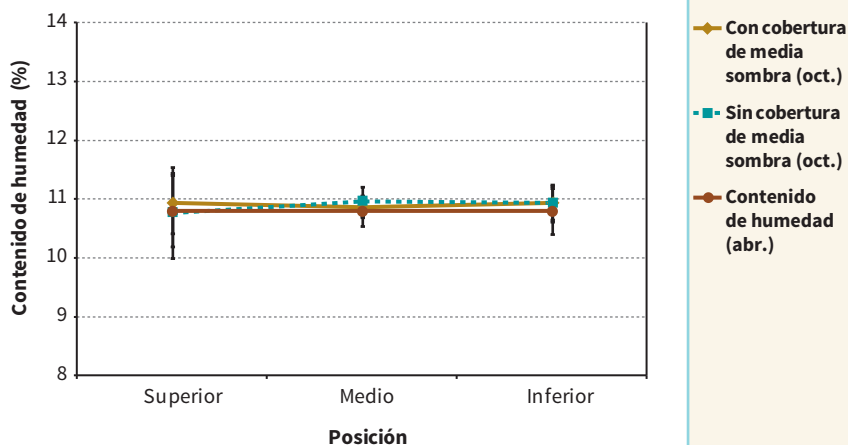
Al momento de embolsar las diferentes variedades de soja se determinó el CH de los mismos. Posteriormente, al finalizar el ensayo se extrajeron muestras en las diferentes secciones y en los diferentes sectores. De estos datos se observó que, en el caso de la variedad A - 3770 RG, almacenada inicialmente con un CH los granos de 10,8% (en promedio) presentó leves variaciones, estas pueden deberse a la precisión del equipo medidor de humedad, y al error experimental durante la extracción y el procesamiento de las muestras.

En la Figura 7 se observa que independientemente de la cobertura con media sombra, e independientemente del sector (superior, medio e inferior) no existen variaciones en el CH de los granos durante el periodo del ensayo.

Con respecto a la misma variedad (A - 3770 RG), pero almacenada con un CH de los granos de 15,5% (en promedio) (Figura 8) se observó en el sector superior de la sección sin cobertura un aumento en el CH de los granos del orden de 1,0 punto porcentual aproximadamente, siendo el valor promedio de ese sector, al finalizar el ensayo, del 16,4%;

Figura 7.

Contenido de humedad (%) inicial (abril) y para el mes de octubre, de los diferentes estratos (superior, medio e inferior), en los sectores con cobertura y sin cobertura de media sombra, del silo bolsa con la variedad A - 3770 (CH de almacenaje = 10,8%).



este efecto de aumento de la humedad pudo ser causado por repetidos ciclos de condensación y adsorción de agua en la capa superior de los granos, debida a la oscilación diaria de la temperatura, sobre todo en primavera. Con el descenso de la temperatura durante la noche, la HR alcanzó valores de hasta el 100% y de esta manera produce una condensación sobre la superficie del granel y sobre la cubierta plástica; esto hace que aumente, en el tiempo, el CH de la semilla en el estrato superior. Esta condición de alto CH de la semilla (y alta HR) en el estrato superior puede generar condiciones adecuadas para el desarrollo de levaduras y otros microorganismos que afectan la calidad y las propiedades de los granos.

Esto se condice con los datos de temperatura (Figuras 5 y 6) y HR (Figura 9 y 11) obtenidos donde se observó un aumento, en el sector inferior de la sección sin cobertura de media sombra, de la HR llegando a valores del 100% en los primeros 10,0 cm de profundidad dentro de la masa de granos. No obstante, en el sector con cobertura de media sombra se observa, para dicha profundidad, que la HR del espacio intergranario tiene valores del 82,0% y del 77,0% para los 5,0 cm y 10,0 cm de profundidad respectivamente, mientras que en el resto del perfil observado la HR, en ambas secciones, presenta valores similares superando el límite del 67,0% establecido como límite de seguridad para el desarrollo de las diferentes especies de hongos que se encuentran en los granos (Lacey et al. 1980); no obstante la sección con cobertura presentó un mejor comportamiento con respecto a este parámetro bajo condiciones de almacenamiento de granos con alto CH, esto muestra valores, a lo largo del perfil, sensiblemente menores con respecto a la sección sin cobertura.

El mismo comportamiento se observó para la variedad A - 4910, (Figura 10), cuya humedad inicial de los granos fue del 15,7% (valor promedio). Al finalizar el periodo de ensayo, se observó que el CH de los granos extraídos del sector superior de la sección sin

Figura 8.

Contenido de humedad (%) inicial (abril) y para el mes de octubre de los diferentes estratos (superior, medio e inferior), en los sectores con cobertura y sin cobertura de media sombra, del silo bolsa con la variedad A - 3770 (CH de almacenaje = 15,5%).

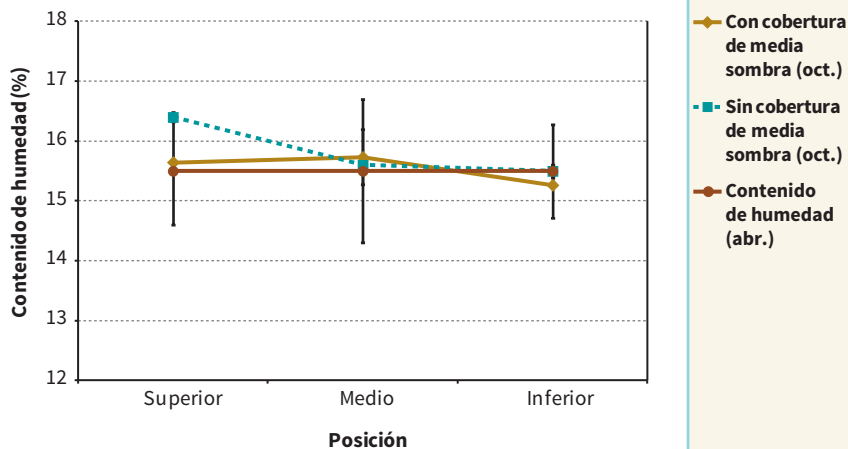
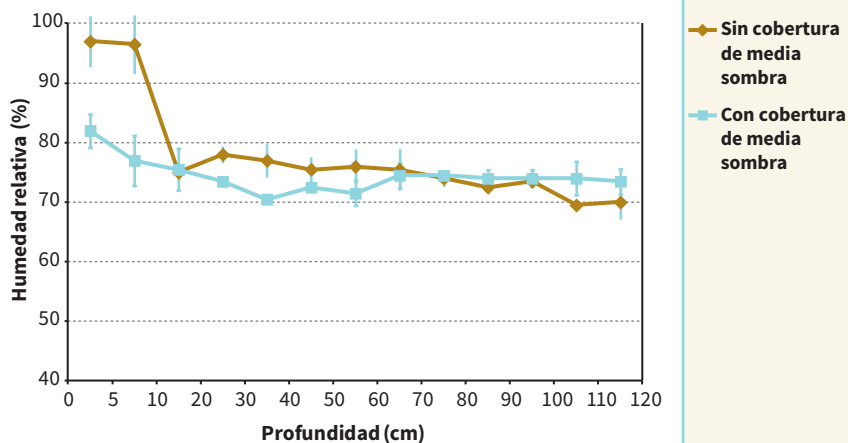


Figura 9.

Humedad relativa (%) a diferentes profundidades (cm) de la semilla, para los sectores con cobertura y sin cobertura de media sombra del silo bolsa con la variedad A - 3770.



cobertura presentó, en promedio de los 3 sectores, un valor de 15,6% (valor similar al del comienzo del ensayo). No obstante, en la parte superior sin cobertura, la humedad superó en 0,7 puntos porcentuales dicho valor, y en la parte inferior el promedio de humedad de los granos, al finalizar el ensayo, fue de 0,9 puntos porcentuales menos con respecto a la humedad inicial. Esta estratificación es porque en el interior de la bolsa hay movimientos de humedad, ya sea por movimientos convectivos de aire (Casini, 2004) o difusión del vapor de agua hacia la superficie, que finalizan con la condensación de la humedad

sobre el grano y la pared interna de la bolsa. Este efecto se acentúa en aquellas áreas donde hay una mayor amplitud térmica (La Nación, 2004). Es decir que la temperatura del grano ensilado es, por diversos motivos modificada y alteran, localmente, las condiciones de equilibrio del grano con su medio ambiente. Estos gradientes de temperatura, dentro de la masa de granos, producen migración de la humedad desde las zonas más calientes a las más frías y esta redistribución puede generar focos con condiciones propicias para el deterioro de los granos (Gastón et al. 2007). El aire caliente está en equilibrio con la humedad de la semilla. Cuando asciende a causa de los movimientos convectivos, se pueden presentar 2 situaciones: si el aire caliente se encuentra saturado o próximo a ello, al desplazarse a zonas más frías disminuye su capacidad de retención de humedad y condensa. Por otra parte, si la disminución de la temperatura no alcanza para condensar, o el aire se encuentra lejos de su punto de saturación, al desplazarse a zonas más frías aumenta su HR, por lo que se produce un desequilibrio entre el CH del aire y de la semilla, lo que, a largo plazo, derivará en un pasaje de humedad del aire al grano. Un aspecto importante a considerar es que según el tipo de grano embolsado varía la intensidad de los fenómenos de estratificación de humedad producidos en la bolsa. El grano de soja es más higroscópico que el de maíz y por lo tanto el proceso de condensación afecta no solo a la humedad individual de los granos que están en contacto con la pared de la bolsa, sino que, con el tiempo, se produce una estratificación de la humedad promedio (Rodríguez et al. 2001). Dicha estratificación no es lo suficientemente grande para atenuar el proceso de homogenización de la humedad individual que se produce dentro de la bolsa (Cardoso et al. 2009 b).

Con respecto a la sección con cobertura de media sombra no se observó la estratificación antes mencionada para el sector sin cobertura; no obstante, los datos muestran variaciones de muy baja magnitud entre el inicio y el final del ensayo, así como también para los diferentes sectores. Esto se puede atribuir a errores experimentales durante el muestreo o en la precisión del medidor.

Figura 10. Contenido de humedad (%), inicial (abril) y para el mes de octubre, de los diferentes estratos (superior, medio e inferior), en los sectores con cobertura y sin cobertura de media sombra, del silo bolsa con la variedad A - 4910 (CH de almacenaje = 15,7%).

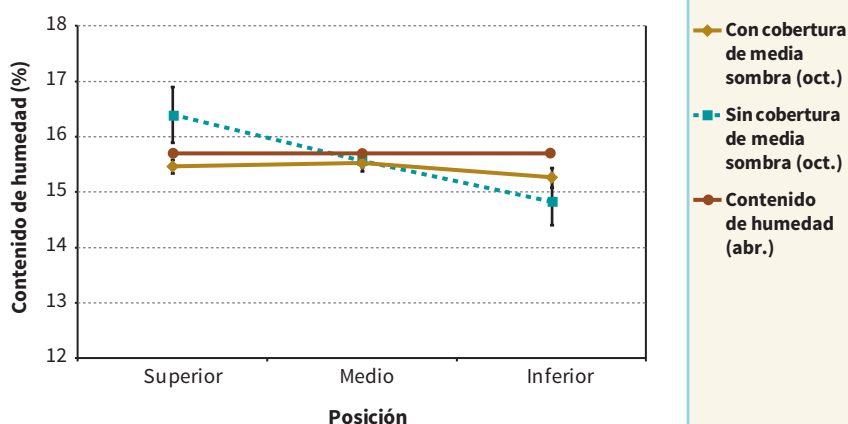
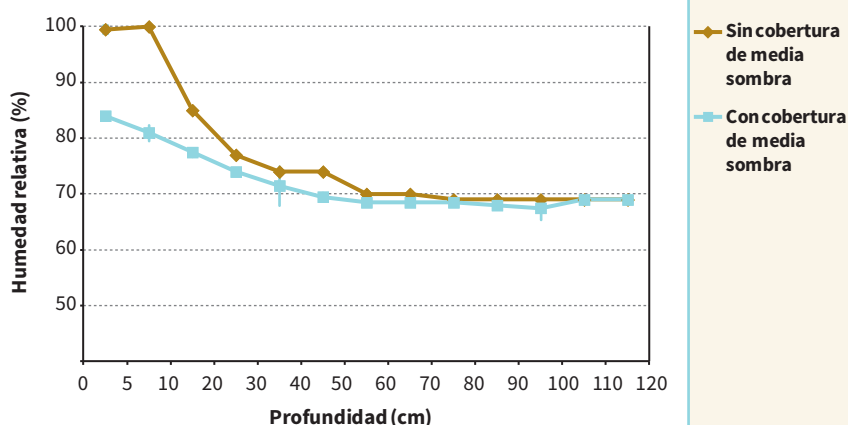


Figura 11.

Humedad relativa (%) a diferentes profundidades (cm) de la semilla, para los sectores con cobertura y sin cobertura de media sombra del silo bolsa con la variedad A - 4910.



Conclusiones

Con respecto al PG se determinó que la cobertura de media sombra fue efectiva cuando se almacenó semilla con alto contenidos de humedad. Cuando el CH de los granos es inferior a lo establecido como límite para un almacenamiento seguro (13,5%) la cobertura de media sombra no mostró diferencias que justifiquen su implementación.

Al almacenar semilla con alto porcentaje de humedad se produce una estratificación de la misma, aumentando el CH de los granos en el sector superior en contacto con el plástico, esto genera condiciones aún más críticas para el almacenamiento, lo cual se evidencia por la fuerte caída del PG.

Bajo las mismas condiciones de almacenamiento con alta humedad, con la implementación de la cobertura de media sombra no se observó el proceso de estratificación de la humedad, lo cual fue muy efectivo para disminuir el deterioro de las semillas.

La humedad fue la principal causa de la caída del PG de las diferentes variedades, la disminución de dicho parámetro se presenta con mayor notoriedad en los granos más húmedos, no solo considerando la misma variedad, como el caso de A - 3770 (almacenada con 2 contenidos de humedad) sino también como lo que se observó al analizar el PG en los diferentes sectores donde se estratificó la humedad en los casos donde la humedad inicial era superior a la del almacenamiento seguro.

Referencias

- Bartosik R.; Rodriguez J.C.; Malinarich H.E. y Maier D. E. 2002. "Silobag": evaluation of a new technique for temporary storage of wheat in the field, pp. 1018 - 1023. En:

proceedings of the 8th Internacional Working Conference on Stored Product Protection, York, Inglaterra.

- Bartosik R.; Rodriguez J.; Malinarich H. y Cardoso L. 2009. Almacenaje de maíz, trigo, soja y girasol en bolsas plásticas herméticas, pp. 2 - 14. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Cardoso L.M.; Bartosik R. y Rodríguez J.C. 2009 a. Estudio de la evolución de la humedad de los granos individuales en silo bolsas de maíz y soja, pp. 23 - 33. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Cardoso L.M.; Bartosik R.; Rodríguez J.C. y Ochandio D. 2009 b. Factores que afectan la concentración de dióxido de carbono en el aire intersticial de soja almacenada en bolsas plásticas herméticas, pp. 41 - 46. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Casini C. 2002. Guía para almacenar grano en bolsas plásticas. Información técnica Proyecto Eficiencia de Cosecha y Poscosecha de Grano. INTA Manfredi, 4 p.
- Casini C. y Santa Juliana D.M. 2009 a. Estudio del efecto de la media sombra sobre la calidad de los granos de maíz y soja, con alta humedad, almacenados en bolsas plásticas, pp. 127 - 139. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Casini C. 2004. Silo bolsa - Consejos de Manejo. Obtenido en: www.prograno.org.ar/unanoticia.phpid. Accedido en agosto de 2006.
- Casini C. y Santa Juliana D.M. 2009 b. Efecto de la cobertura sobre granos de maíz almacenados con altos contenidos de humedad en bolsas plásticas, pp.141 - 146. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- CONAPRE 2008. Encuesta procesadoras de semillas, informe final. Disponible en http://www.inase.gov.ar/tikiwiki/tiki-list_tile_gallery.php?galleryId=16. Accedido el 03 de abril de 2009.
- Gastón A.; Abalone R; Cassinera A y Lara M.A. 2007. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos bolsa. *Mecánica Computacional*, 26: 3547 - 3561, Córdoba, Argentina.
- ISTA. International Rules for Seed Testing, 1999. Seed Science and Technology Rules, 27 Supplement. Capítulo 5, pp. 27 - 31.
- Lacey J.; Hill S.T. y Stewards M.A. 1980. Microorganisms in stored grains: their enumeration and significance, Trop. Stored Prod Plant Pathology Department Publications, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. Inform., 38: 19 - 32.
- La Nación. 2004. Silo bolsas: Pérdidas que podrían evitarse. Obtenido en: www.bccba.com.ar/bcc/images/Trigo2005. Accedido en agosto del 2006.
- Luque R. y Casini C. 2009. Estudio del efecto de la media sombra sobre la calidad de los granos almacenados en bolsas plásticas, pp. 94 - 98. En: Casini C.; Rodriguez

- J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina 180, p.
- Hidalgo R.; Pozzolo O; Barrionuevo C; Ferrari H. y Curró C. 2009. Estudio de distintos factores incidentes en la calidad de arroz conservado en bolsas plásticas. pp. 79 - 85. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina 180, p.
 - Pozzolo O.; Hidalgo R; Ferrari H. y Curró C. 2009 a. Conservación de arroz en bolsas plásticas a humedad base cámara. Almacenamiento de Granos en Bolsas Plásticas, pp. 66 - 69. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
 - Pozzolo O.; Hidalgo R.; Ferrari H. y Curró C. 2009 b. Conservación de arroz a diferentes humedades en bolsas herméticas. Efecto de media sombra. Almacenamiento de Granos en Bolsas Plásticas, pp. 71 - 78. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
 - Rodríguez J.C.; Bartosik R; Malinarich H.D; Exilart J.P. y Nolasco M.E. 2001. Estudio de la calidad de granos de soja con distintas humedades. Manual técnico N° 3 Soja. Eficiencia de Cosecha y Poscosecha, 221 p.
 - Rodríguez J.C. y Bartosik R. 2006. Aireación de granos almacenados. Información técnica Proyecto Eficiencia de Cosecha y Poscosecha de Grano, INTA Balcarce, Buenos Aires, Argentina.

Concentración de dióxido de carbono en almacenamiento hermético de soja (*Glycine Max*) en pequeños frascos de vidrio

Dario Ochandio¹
Ricardo Bartosik²
Alejandra Yommi²
Leandro Cardoso²

Resumen

Este estudio tiene como objetivo establecer las concentraciones típicas de CO₂ para la soja (*Glycine max*) almacenada en sistemas herméticos, bajo diferentes condiciones de almacenamiento (temperaturas extremas de 5,0 °C y 35,0 °C y niveles de contenido de humedad (CH) de 11,0%, 13,0% y 17,0%. El experimento se realizó bajo condiciones de laboratorio, donde las muestras de soja fueron acondicionadas para alcanzar 3 niveles diferentes de CH, e incubadas a diferentes temperaturas en frascos de vidrio herméticamente cerrados. La concentración de CO₂ se midió utilizando cromatografía gaseosa.

Cuando la soja fue almacenada con 11,0% CH y a 5,0 °C de temperatura, no se observó casi ningún incremento en la concentración de CO₂ luego de 1 año (menos del 1,0%), pero cuando fue almacenada a 35,0 °C la concentración de CO₂ aumentó a 5,5% - 7,0% luego de 230 días. Con 13,0% de CH, la concentración de CO₂ también fue menor de 1,0% luego de 1 año almacenada a 5,0 °C, mientras que alcanzó 12,0% cuando fue almacenada a 35,0 °C durante 230 días. Para 17,0% CH, la concentración de CO₂ aumentó a 5,5% - 7,0% luego de 1 año, mientras que a 35,0 °C la concentración de CO₂ fue de 20,0% - 23,0%, a los 100 días de almacenaje.

Con los resultados obtenidos en este estudio se desarrolló una guía para evaluar las condiciones de almacenamiento de los granos en silo bolsa.

Palabras clave: almacenamiento hermético, dióxido de carbono, soja, actividad biológica, respiración del grano.

¹ EEA Barrow, Tres Arroyos (Buenos Aires), Argentina.

² EEA INTA Balcarce (Buenos Aires) Argentina.

Introducción

El silo bolsa es un sistema de almacenamiento hermético de granos secos adoptado por varios países. En Argentina, más de 16,0 millones de toneladas de soja son almacenadas en silo bolsas, por un periodo aproximado de 6 meses, en establecimientos agropecuarios o a nivel industrial.

Una tecnología basada en la medición de la concentración de CO₂ en el silo bolsa fue desarrollada para evaluar las condiciones de almacenamiento de diferentes granos, (Bartosik et al., 2008). El CO₂ intergranario es medido en el silo bolsa y comparado con una concentración de referencia, con el fin de detectar actividad biológica anormal (por ejemplo descomposición del grano, actividad de insectos, etc.). Por lo tanto, para este sistema de monitoreo es necesario contar con valores típicos de CO₂ del aire intersticial como niveles de referencia. Un modelo comprensivo fue desarrollado para simular las condiciones de almacenamiento en el silo bolsa. El modelo considera la transferencia de calor y masa de acuerdo a la condición de los granos (temperatura y contenido de humedad (CH)), la temperatura ambiente y la radiación solar. El modelo también predice el cambio en las concentraciones de O₂ y CO₂ tomando en cuenta la respiración del grano y la permeabilidad del polietileno del silo bolsa al pasaje de O₂ y CO₂ (Abalone et al., 2011 a, b).

Sin embargo, para definir mejor la predicción de la respiración (consumo de O₂ y generación de CO₂) bajo condiciones de almacenamiento hermético, se requiere una adecuada correlación que considere el agotamiento del O₂ del ambiente. Para soja, dicha correlación no está disponible en la literatura. Este estudio tiene como objetivo establecer típicas concentraciones de CO₂ para la soja (*Glycine max*) almacenada en sistemas herméticos bajo diferentes condiciones de almacenamiento en silo bolsas (temperaturas extremas de 5,0 °C y 35,0 °C y niveles de CH de 11,0%, 13,0% y 17,0%).

Este estudio es una parte preliminar de uno más completo que involucra la respiración de la soja bajo condiciones de hermeticidad. En el estudio más amplio las concentraciones de CO₂ y O₂ fueron medidas en soja almacenada a diferentes niveles de CH y temperaturas y además, se desarrollaron ecuaciones de predicción. Adicionalmente, durante el almacenamiento, la composición de la microbiota fue caracterizada para diferentes condiciones de temperatura, CH y concentración de gases. La prueba del poder germinativo (PG), calidad comercial y productos volátiles (AGV y etanol) fue también correlacionada con las condiciones de almacenamiento.

Metodología

Los experimentos fueron realizados en la Unidad Integrada de Balcarce (UIB) de la estación experimental pertenecientes a la Estación Experimental del INTA Balcarce y a la Facultad de Ciencias Agrarias de Balcarce, UNMdP.

La soja utilizada en este experimento fue cosechada durante marzo de 2011, y consistió en una mezcla de diferentes variedades usadas en el sur de la región sojera Argentina. Todas las muestras fueron clasificadas de acuerdo a los estándares de comercialización de Argentina y también se llevó a cabo una de PG (ISTA, 2008) para comprobar que todas las muestras estaban en buenas condiciones. La soja con una condición que se podría clasificar como “no comercializable” (ej. exceso de granos mecánicamente dañados) o

con un PG bajo (ej. debido a una alta concentración de hongos) puede afectar la tasa de respiración y, por lo tanto, el resultado del experimento.

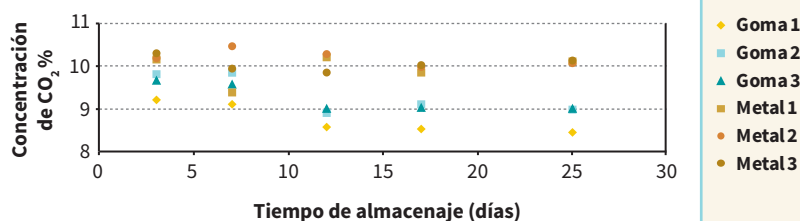
Las muestras de soja fueron acondicionadas a CH de 11,0%, 13,0%, y 17,0% y ubicadas en una cámara a 4,0 °C hasta la realización del experimento. El acondicionamiento de las muestras se realizó remojando la soja con agua destilada, o secando las muestras en condiciones de laboratorio (temperatura de 22,0 °C - 25,0 °C y humedad relativa de 60,0% - 65,0%). El CH final fue medido en el laboratorio utilizando Dickey John GAC 100 o 2100, y los resultados fueron controlados por el método de secado en estufa de acuerdo con el estándar de ASAE S352.2 (72 horas a 103,0 °C).

Antes de la realización del experimento, se evaluó la hermeticidad de 2 diferentes tapas para los frascos de vidrio vacíos de 660,0 ml de capacidad. Los frascos se llenaron con una mezcla de gases con 10,5% de CO₂, una parte se cerraron con tapas herméticas de metal y otros frascos se cerraron con tapas de goma. Ambas tapas tenían en el centro una perforación sellada con un parche de goma, de donde una muestra de gases podría ser tomada con una aguja hipodérmica y jeringa.

Las muestras de gases fueron recolectadas de los frascos cada 5 días aproximadamente, y la concentración de CO₂ se midió por cromatografía gaseosa (Shimatdzu GC - 17A, Kyoto, Japon) equipada con un detector de ionización de llama (FID). La Figura 1 muestra los resultados de la prueba, en la que los frascos cerrados con la tapa de metal no tuvieron un cambio sustancial en la concentración de CO₂, mientras que los frascos cerrados con tapas de goma mostraron un lento descenso en la concentración CO₂. Por lo tanto, para el experimento se seleccionaron las tapas de metal por proporcionar un cerrado más conveniente.

Figura 1.

Concentración de CO₂ (%) en el tiempo (días) para 2 conjuntos de frascos con tapas goma y metal.



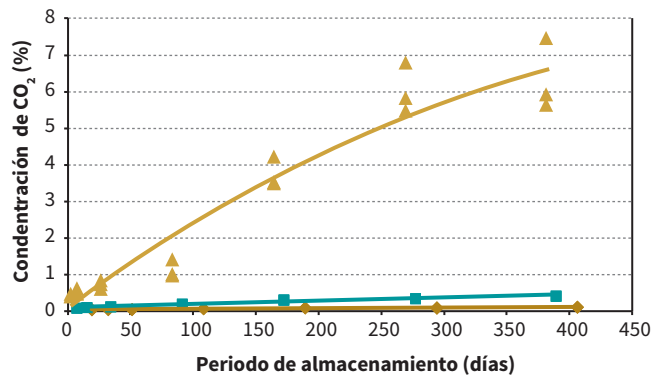
Los frascos de vidrio fueron llenados con 450,0 g de soja, ocupando más del 90,0% del frasco. El espacio restante fue estimado midiendo la cantidad de agua destilada requerida para llenarlo completamente. El volumen promedio del espacio vacío fue de 302,5 ml para 11,0% CH, 296,2 ml para 13,0% CH y 288,8 ml para 17,0% de CH. Fueron realizadas 2 repeticiones para cada CH a 35,0 °C, mientras que para las muestras almacenadas a 5,0 °C se realizaron 3 repeticiones. Se tomaron muestras de espacio intergranario con aguja hipodérmica y una jeringa (1,0 ml de capacidad) y la concentración de CO₂ fue medida con una cromatografía de gases.

Resultados y discusión

La soja almacenada a 5,0 °C tuvo, en general, una respiración muy baja. La concentración de CO₂ luego de 1 año fue entre 5,5% y 7,5% para un CH de 17,0%, mientras que para 11,0% y 13,0% de CH la concentración de CO₂ no alcanzó el 1,0% (Figura 2). Es posible que a 17,0% de CH algunos microorganismos estén activos, respirando y generando CO₂, mientras que a 11,0% y 13,0% de CH estos organismos no están activos.

Figura 2.

Concentración de CO₂ (%) en el tiempo de almacenamiento (días) para soja a diferentes contenido de humedad (11,0%, 13,0% y 17,0%) incubada a 5,0 °C.



◆ 11%

$$y = 0,0002x + 0,0586$$
$$R^2 = 0,8762$$

■ 13%

$$y = 0,0009x + 0,115$$
$$R^2 = 0,9515$$

▲ 17%

$$y = -2E-05x^2 + 0,0253x + 0,0814$$
$$R^2 = 0,9381$$

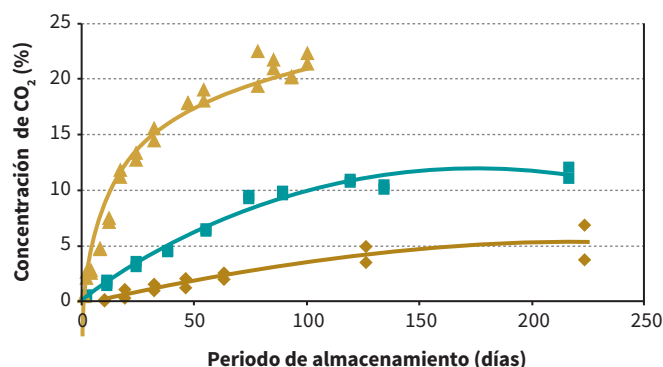
Luego de 1 mes de almacenamiento, la concentración de CO₂ alcanzó 15,0% a un CH de 17,0%, para estabilizarse luego de 100 días a valores entre 20,0% y 23,0% (Figura 3). La concentración de CO₂ de las muestras más secas tuvo una evolución más lenta. A 13,0% de CH la concentración de CO₂ llegó a 12,0% luego de 230 días, mientras que para el 11,0% de CH la concentración alcanzó solo un 5,0% - 7,0% de CO₂.

Se puede observar que en el experimento a 35,0 °C para CH de 13,0% y 17,0%, existe un aumento casi lineal en la concentración de CO₂ hasta 10,0% - 12,0%, seguido por una disminución lenta en la tasa de aumento. En un experimento posterior (datos no informados en esta publicación) fue observado que cuando la muestra incubada alcanza entre un 10,0% - 12,0% de CO₂, la concentración de O₂ cae por debajo del 1,0%. Esto podría implicar que a ese punto debería haber un cambio en la actividad y composición microbiana (de aeróbica a anaeróbica) y, por lo tanto, en la tasa de respiración.

Comparado con el maíz, la soja tiene una tasa de respiración más baja. En un estudio similar realizado para maíz a 14,0%, 16,0%, 18,0%, 20,0%, y 22,0% de CH incubado a 30,0 °C, la concentración de CO₂ sobrepasó el 21,0% para todos los tratamientos, excepto para un 14,0% de CH. La mayor parte del O₂ en los contenedores sellados con 14,0%, 16,0%, 18,0%, 20,0% y 22,0% de CH fue consumido luego de 25, 5, 2, 1 ½ días respectivamente. La concentración de CO₂ medida luego de un “amesetamiento” alcanzó desde 18,0%, para 14,0% de

Figura 3.

Concentración de CO₂ (%) durante el período de almacenamiento (días) para soja a diferentes contenidos de humedad (11,0%, 13,0% y 17,0%) incubada a 35,0 °C.



◆ 11% $y = -0,0001x^2 + 0,0487x - 0,2508$ $R^2 = 0,8612$	■ 13% $y = -0,0001x^2 + 0,0487x - 0,2508$ $R^2 = 0,8612$	▲ 17% $y = 5,1259\ln(x) - 2,705$ $R^2 = 0,9464$
---	---	--

CH, a 90,0%, para 22,0% de CH. El tiempo requerido para alcanzar dicho “amesetamiento” fue de 1440 horas para 14,0% de CH y 480 horas para 22,0% de CH (Weinberg et al., 2008).

Cardoso et al. (2008) midieron la concentración de CO₂ en varios silo bolsas de soja con humedades de entre 10,0% y 15,0%. Por un lado encontraron que, en general, la concentración de CO₂ fue menor que el 1,5% para un periodo de almacenamiento de 4 a 9 meses en el campo. Por otro lado, un estudio similar, Rodríguez et al. (2008) concluyeron que silo bolsas con trigo desde 13,0% a 14,0% de CH tuvieron un promedio del 5,0% de CO₂, mostrando una respiración sustancialmente mayor en comparación con la soja.

Conclusiones

La concentración de CO₂ generada por la soja almacenada en jarras herméticas de vidrio fue obtenida para 3 diferentes contenidos de humedad (11,0%, 13,0% y 17,0%) y 2 temperaturas de incubación (5,0 °C y 35,0 °C). La soja con 11,0% y 13,0% de CH incubada a 5,0 °C casi no muestra un incremento de CO₂ luego de 1 año, mientras que la soja con 17,0% de CH resultó con un incremento de entre 5,5% y 7,5%.

Mayor temperatura de incubación resultó en mayor respiración y, por lo tanto, en mayor concentración de CO₂. La soja incubada a 35,0 °C durante 230 días tuvo una concentración de CO₂ de 5,0% - 7,0% para 11,0% de CH, mientras que cuando el CH fue de 13,0% el CO₂ alcanzó 12,0%. Cuando la humedad fue de 17,0%, el CO₂ alcanzó 20,0% - 23,0% luego de 100 días de incubado.

Referencias

- Abalone R.; Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2011 a. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part I: model development and validation. J. Stored Prod. Res. 47: 268 - 275.

- Abalone R.; Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2011 b. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part II: model sensitivity and effect of grain storage conditions. *J. Stored Prod. Res.* 47: 276 - 283.
- ASAE Standard. 2003. ASAE S 252.2 Moisture measurement – Unground grain and seeds. St. Joseph, MI: ASAE.
- Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2008. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo - bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- ISTA. 2008. International rules for seed testing. Bassersdorf, Switzerland, 1 ed., V. 5.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Cardoso L. y Croce D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 589 - 592. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Weinberg Z.G.; Yan Y.; Chen Y.; Finkelman S.; Ashbell G. y Navarro S. 2008. The effect of moisture level on high - moisture maize (*Zea mays* L.) under hermetic storage conditions—in vitro studies. *J. Stored Prod. Res.*, 44:136–144.

Calidad nutricional de maíz almacenado en silo bolsa

Jorge Azcona¹
Marcelo Schang¹
Alejandro Couretot¹
Mauricia Sala²

Introducción

La producción mundial de maíz para la campaña 2013/14 fue de 984,0 millones de toneladas (USDA, 2014 a), de las cuales un 58,0% se destinó a la alimentación animal (USDA, 2014 b). Por su parte, la Argentina produjo 24,0 millones de toneladas, de las cuales consumieron internamente 8,3 millones. (USDA, 2014 a).

La producción argentina de aves durante 2013 fue de 732,0 millones de cabezas. Esto representó una producción de 1,9 millones de toneladas de carne de pollo, de las cuales se exportaron 366 mil toneladas. Por su parte, el consumo de carne de pollo alcanzó los 39,5 kg/hab/año. La producción de huevos en 2013 fue superior a las 10 mil millones de unidades, con un consumo de 232 huevos/hab/año. (Lamelas et al., 2014).

Paralelamente, la participación del maíz y de las proteínas de origen vegetal en las dietas ha crecido un 39,0% y un 52,0% respectivamente. Por el contrario, la participación de proteínas de origen animal ha decrecido. Como consecuencia de este crecimiento, la fabricación de alimentos balanceados insume el 55,0% del maíz que permanece en el país, del cual se estima que en la última campaña el 40,0% del total se almacenó en silo bolsas.

Considerando que no existen antecedentes sobre el valor nutricional del maíz conservado con este sistema de almacenaje, se realizaron diversos estudios utilizando un material proveniente de las cosechas 2002 a 2005, para determinar el valor nutricional de maíz almacenado en silo bolsa en función del contenido de humedad (CH) y del tiempo de almacenaje.

Materiales y métodos

El grano proveniente de las evaluaciones del 2002 a 2005 fue producido en INTA. Para lograr los tratamientos de grano con diferentes CH se realizaron cosechas en distintos momentos del fin del ciclo del cultivo, y se complementó con un control secado natural (aire ambiente) en bolsas de malla tipo “media sombra”.

Se utilizaron silo bolsas con 15,0 a 20,0 toneladas de maíz, y el tiempo de almacenaje osciló entre los 3 y 10 meses. Se extrajeron muestras de grano para evaluar calidad comercial, materia seca, proteína, lípidos, acidez (AACC, 1995) y micotoxinas (Trucksess, 1984; se analizaron aflatoxinas, ocratoxina, citrinina, zearalenona, DON (Vomitoxina),

¹INTA EEA Pergamino (Buenos Aires), Argentina.

²Laboratorio Aletheias, Ituzaingó (Buenos Aires), Argentina.

toxina T2, fusarenona X, nivalenol y DAS (Diacetoxycirpenol)), y energía metabolizable verdadera (EMV) (Sibbald, 1976). Esta última determinación se realizó utilizando 5 gallos adultos por tratamiento.

Finalmente se realizaron pruebas de crecimiento con pollos parrilleros para validar los resultados obtenidos mediante determinaciones químicas y de EMV.

Se utilizaron pollos parrilleros Cobb machos, los que se alojaron a piso o en jaulas a razón de 10 aves por m². Cada tratamiento contó con 6 réplicas distribuidas en un diseño completamente aleatorizado. Semanalmente se controló el peso y consumo de cada lote y se calculó la conversión alimenticia. Se suministró un plan de alimentación de 3 etapas; iniciador hasta los 21 días, crecimiento hasta los 35 días y terminador hasta los 49 días (Tabla 1).

El maíz proveniente de los silos bolsas se secó al aire hasta alcanzar la humedad del maíz control (14,0% – 15,0%), para que no hubiese diferencias en el aporte de materia seca, ni riesgos de desarrollo de hongos por exceso de humedad.

Los resultados fueron evaluados mediante análisis de variancia (ANOVA) y las medias separadas por la prueba de rangos múltiples de Duncan considerando un error α del 5,0%. (Snedecor y Cochran, 1967).

Tabla 1.

Composición de las dietas experimentales.

INGREDIENTES	1 A 21 DÍAS	22 A 35 DÍAS	36 A 49 DÍAS
Maíz	48,3	51,6	58,7
Poroto de soja	27,6	34,3	32,7
Harina de soja	17,4	7,5	2,3
Harina de carne	5,3	5,3	5,1
Conchilla	0,5	0,4	0,4
Metionina	0,2	0,2	0,2
Vitaminas + minerales	0,5	0,4	0,4
Nutrientes			
Proteína (%)	23,0	21,5	19,2
EMV (Kcal/Kg)	3350	3450	3500
Lisina (%)	1,3	1,1	1,0
Metionina + cistina (%)	0,9	0,8	0,8

EMV = Energía Metabolizable Verdadera.

En 2002 se compararon tres tratamientos:

- Maíz húmedo (19,0%), almacenado en silo bolsa.
- Maíz levemente húmedo (16,0%), almacenado en silo bolsa.
- Material secado natural.

El primer control se efectuó en agosto, a los 3 y 5 meses de almacenaje (materiales con 16,0% y 19,0% de CH respectivamente). El segundo control se realizó en octubre, a los 5 y 7 meses de almacenaje, según el nivel de humedad considerado.

En 2003 se compararon tres tratamientos:

- Maíz húmedo (19,0%), almacenado en silo bolsa convencional (20,0 t).
- Maíz húmedo (19,0%), almacenado en pequeñas bolsas (con material de silo bolsa) de 50,0 a 60,0 kg.
- Material secado natural.

Los controles se realizaron a los 4, 6 y 10 meses de almacenaje, siendo el último control a fines de enero de 2004, por lo que el silo bolsa quedó expuesto a las variaciones de temperatura propias de cada estación.

En 2004 se compararon dos tratamientos:

- Material levemente húmedo (16,0% CH), almacenado en silo bolsa convencional (20,0 t).
- Material secado natural.

Los controles se realizaron a los 3 y 10 meses de almacenaje.

En 2005 se compararon dos tratamientos:

- Silo bolsa convencional sin cobertura.
- Silo bolsa convencional con cobertura (“media sombra”).

Los controles se realizaron a los 10 meses de almacenaje (mayo de 2005).

Resultados y discusión

Se observó un deterioro de la calidad comercial asociada al CH, siendo el peso hectolítrico el parámetro más afectado (Tabla 2).

Tabla 2.

Peso hectolítrico del grano en función contenido de humedad del grano (%) y tiempo de almacenaje (meses), para diferentes años evaluados.

TIEMPO MESES	SECO NATURAL 14,0% CH			BOLSA 16,0% CH		BOLSA 19,0% CH	
	2002	2003	2004	2002	2004	2002	2003
Inicial	77,2	75,6	78,0	77,2	78,0	77,2	75,6
3	77,0		78,0	76,5	76,8		
4		75,0					73,4
5	78,2			78,1		76,5	
6			78,4		74,2		
7		76,1				75,0	74,2
10		74,4					73,2

CH = Contenido de Humedad

El peso hectolítrico de los materiales Seco Natural no varió en el tiempo, excepto cuando se evaluaron muestras luego de 10 meses de almacenaje, donde se observó una caída en este parámetro.

Por otra parte, los materiales conservados en silo bolsa mostraron una caída en el peso hectolítrico de 1,0 a 2,0 puntos porcentuales. En consecuencia, la permanencia de un maíz en grado 1 dependió del peso hectolítrico al momento de ser embolsado. Estudios realizados con bolsas experimentales (50,0 kg – 60,0 kg) mostraron que, a pesar de comprobarse una caída del peso hectolítrico, las pérdidas de peso fueron mínimas (-0,6%) después de 10 meses de almacenaje.

Además, se observó presencia de granos dañados como consecuencia del proceso de fermentación, más que por daño mecánico. También se detectó olor objetable (alcohol), particularmente en el caso de silo bolsas con mayor CH, lo que afectó negativamente la calidad comercial.

No hubo cambios en el CH inicial y final en los silo bolsas, ni en los contenidos de proteínas, lípidos y acidez luego de 3 meses de almacenaje. Los maíces almacenados con alto CH presentaron mayor acidez que el Seco Natural, y dicho diferencial se incrementó con el tiempo de almacenaje (Tabla 3). El aumento de acidez podría ser consecuencia del proceso de fermentación láctica, lo que no explica el aumento de acidez observado en el caso del material Seco Natural del año 2003.

Tabla 3.

Acidez* en función del contenido de humedad del grano de maíz (%) y tiempo de almacenaje (meses), para diferentes años de estudio.

TIEMPO MESES	SECO NATURAL 14,0% H°		BOLSA 16,0% H°	BOLSA 19,0% H°	
	2002	2003	2002	2002	2003
3	3,7		4,1		
4		2,8			4,7
5	5,5		7,4	4,3	
6		7,6			19,8
7				5,4	
10		25,6			50,3

*expresada como equivalente ácido oléico, %.
CH = Contenido de Humedad

El aprovechamiento de la energía bruta (EB) (EMV/EB) en general disminuyó entre 1,0 y 2,0 puntos porcentuales independientemente del CH del grano (Tabla 4). Este resultado también fue observado en el caso de maíz conservado en silos tradicionales y sería consecuencia del “envejecimiento” del grano.

En la Tabla 5 se muestran con mayor detalle los resultados obtenidos en el año 2002, donde se produjo la rotura de algunos silo bolsas. No se observaron diferencias entre tratamientos en el contenido de EB, EM o la relación entre ambas, excepto para el maíz con 19,0% de CH correspondiente al silo bolsa roto. En este caso se observó un incremento en el contenido de EM de 146,0 kcal/kg. Dicho incremento se debió principalmente, a

Tabla 4.

Relación EMV/EB en función del contenido de humedad del grano de maíz (%) y tiempo de almacenaje (meses), para diferentes años de estudio.

TIEMPO MESES	SECO NATURAL 14,0% CH			BOLSA 16,0% CH		BOLSA 19,0% CH	
	2002	2003	2004	2002	2004	2002	2003
3	91,4		91,1	91,2	91,5		
4		93,4					91,8
5	90,8			91,2		91,7	
6		90,3	89,9		89,8		91,2
7						90,8	
10		90,0					

CH = Contenido de Humedad

Tabla 5.

Contenido de EB, EMV y su relación (EB/EMV).

TRATAMIENTO (% CH)	MESES DE ALMACENAJE	EB	EMV	EMV/EB %
		KCAL/KG		
19,0 %	4 (silo roto)	4588	4294 ± 18 a	93,6
	5 (silo sano)	4557	4180 ± 58 b	91,7
16,0 %	3 (silo roto)	4548	4176 ± 46 b	91,8
	3 (silo sano)	4544	4145 ± 74 b	91,2
Seco Natural	3	4538	4150 ± 21 b	91,4

EB = Energía Bruta

EMV = Energía Metabolizable Verdadera (base seca)

CH = Contenido de Humedad

Media ± desvío estándar. Medias con distinta letra en una misma columna difieren significativamente ($p \leq 0,05$).

un aumento en la utilización de la EB de 2,8 puntos. Existen antecedentes similares que muestran que en condiciones de aerobiosis, la actividad microbiana modifica las proporciones de los distintos nutrientes (disminución de almidón) modificando el contenido de EB y/o facilitando la utilización de la misma (Azcona y Schang, 1998).

De todas maneras, este resultado no implica obtener una ventaja, por el contrario, este silo tuvo que ser descartado dado que hubo un deterioro importante de la calidad comercial y aparición de micotoxinas.

En el caso del silo roto con 16,0% de CH se procedió a reparar las roturas y continuar con la toma de datos, dado que no se observaron cambios importantes en su calidad.

No obstante, luego de 5 meses de almacenaje, al suministrarse alimento elaborado con maíz de dicho silo se observó un menor crecimiento (-4,2%) y peor conversión (+0,9%) comparado con el tratamiento a base de maíz seco natural (Tabla 6).

Tabla 6.
Resultados zootécnicos (49 días).

TRATAMIENTO	MESES DE ALMACENAJE	CONSUMO	PESO VIVO	CONVERSIÓN
		G		
19	7 (silo sano)	5368 ± 124 a	2961 ± 68 a	1813 ± 38
16	5 (silo roto)	5087 ± 152 b	2751 ± 103 c	1850 ± 52
16	5 (silo sano)	5297 ± 89 a	2908 ± 50 ab	1821 ± 27
Seco Natural	5	5264 ± 122 a	2871 ± 60 b	1832 ± 25
CV (%)		2,0	2,5	2,0

Media ± desvío estándar. Medias con distinta letra en una misma columna difieren significativamente ($p \leq 0,05$).

Esta respuesta se debería a la presencia de micotoxinas, lo que condujo a un menor consumo de alimento (-3,4%). En esta oportunidad se detectaron aflatoxina B1 (22 ppb) y fuseranona X (500 ppb).

En cambio, los pollos alimentados con maíz almacenado con 19,0% de CH y conservado en óptimas condiciones (silo bolsa sin roturas), crecieron un 3,1% más que los pollos alimentados con maíz Seco Natural y tuvieron una mejor conversión alimenticia (-1,0%). Estas ventajas fueron de menor magnitud en el caso del silo sano con 16,0% de CH (Tabla 6).

Este resultado podría estar asociado a una movilización de nutrientes originada por la actividad enzimática que se desarrolla en condiciones de CH, como fuera reportado en estudios realizados con centeno remojado (grano y agua en partes iguales) y almacenado en silo bolsas cerrados durante 144 h (Pawlik et al., 1990). Esta “pre digestión” permitiría una utilización más rápida del alimento y en consecuencia un mayor consumo.

En el presente estudio, si bien se observó un mayor consumo comparado con el tratamiento Seco Natural, dicha diferencia no fue significativa.

En la Tabla 7 se presenta una síntesis de los resultados correspondientes a las 7 pruebas de crecimiento realizadas entre 2002 y 2004. Los mismos se expresan como diferencias (%) respecto del material Seco Natural.

Tabla 7.
Resultados zootécnicos.

AÑO	TIEMPO ALMACENAJE MESES	DURACIÓN ENSAYO DÍAS	HUMEDAD %	PESO DIF. %	CONVERSIÓN DIF. %
2002	5	49	16	1,2	-0,6
	7	49	19	3,1	-1,0
2003	4	49	19	1,9	-1,6
	6	42	19	3,6	-1,7
	10	44	19	-0,8	2,9
2004	3	35	16	-3,0	0,4
	6	49	16	-1,3	-0,2

Dif. = Diferencia (%) respecto del material Seco Natural.

Las mejoras en crecimiento y conversión observadas en 2002 con maíces ensilados con 19,0% de CH también se repitieron en 2003, excepto cuando el tiempo de almacenaje fue de 10 meses. En este último caso, el silo sufrió los cambios de temperatura propios de la primavera – verano, situación que afectó negativamente el valor nutricional del maíz.

En 2004 los resultados fueron adversos debido a que en el silo bolsa se produjeron micotoxinas durante el almacenaje (aflatoxina B1 = 28 ppb, citrinina = 20 ppb y fuseranona = 500 ppb) por roturas causadas por roedores.

En la Tabla 8 figuran los resultados correspondientes al estudio sobre protección con “media sombra” realizado en 2005.

Tabla 8.

Efecto de la cobertura sobre la calidad comercial y valor nutricional del maíz conservado en silo bolsa.

PARÁMETROS	TRATAMIENTOS		
	SIN COBERTURA	CON COBERTURA	SECO NATURAL
Peso hectolítrico	74,0	75,2	77,2
Granos dañados (%)	5,3	5,1	11,4
Acidez (eao)	12,6	14,2	9,2
EMV/EB (%)	91,9	93,6	93,3
Consumo (g)	2523 b	2632 a	----
Peso (g)	1716 b	1785 a	----
Conversión	1,469 a	1,474 a	----

(eao) = equivalente ácido oleico.

Medias con diferente letra en una misma fila difieren significativamente ($p \leq 0,05$)

EB/EMV = Relación entre energía Bruta y Energía Metabolizable Verdadera (%)

El empleo de cobertura (“media sombra”) en maíz almacenado con 14,0 – 15,0% de CH durante 10 meses redujo la caída del peso hectolítrico, lo que permitió mantener el material dentro de Grado 1. Por el contrario, el maíz almacenado sin cobertura tuvo una pérdida de peso hectolítrico mayor pasando a Grado 2. El porcentaje de granos dañados fue menor en los maíces conservados en bolsa plástica respecto del Seco Natural, probablemente debido a que no hubo daño por insectos. La acidez de los materiales embolsados fue mayor.

La relación EMV/EB fue similar entre maíz conservado con cobertura (93,6%) y Seco Natural (93,3%), en cambio, dicha relación en el caso del maíz sin cobertura fue menor (91,9%). Los pollos que recibieron el maíz embolsado con cobertura crecieron un 6,0% más que los pollos que recibieron maíz embolsado sin cobertura.

Conclusiones

El maíz almacenado en silo bolsa mostró, en todos los casos, una caída del peso hectolítrico de 1,0 a 2,0 puntos porcentuales, lo que afectó la calidad comercial, dependiendo del peso hectolítrico inicial. Esta caída en el peso hectolítrico no implicó una pérdida de peso importante, registrándose una merma de solo el 0,6% luego de 10 meses de almacenaje.

A mayor humedad de almacenaje, mayor riesgo de pérdida de calidad comercial y valor nutricional, particularmente si hay roturas en el silo bolsa.

Maíces embolsados con 19,0% de humedad mostraron una mejora en el valor nutricional y consecuentemente en el desempeño de las aves cuando no hubo roturas del silo bolsa. Como contrapartida se observó una caída de la calidad comercial por menor peso hectolítrico y olor a alcohol. Cuando la humedad de almacenaje fue de 16,0%, las mejoras en la respuesta zootécnica fueron de menor magnitud.

El empleo de “media sombra” como cobertura durante 10 meses permitió mantener la calidad comercial del grano y lograr un mejor desempeño de los pollos comparado con la opción de no utilizar cobertura.

Es indispensable evitar roturas o debilitamiento del polietileno que conforma el silo bolsa para mantener la calidad comercial y el valor nutricional del maíz.

La principal causa de pérdida en la respuesta zootécnica de los pollos es debida a la formación de micotoxinas cuando no se aseguran condiciones de anaerobiosis.

En síntesis, para evitar pérdidas de calidad comercial y valor nutricional se debe tener en cuenta el contenido de humedad y tiempo de almacenaje del grano con la condición que no se produzcan roturas en el silo bolsa.

Referencias

- AACC. 1995. Method 58-15: Free fatty acids. En: Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 9th ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.
- Azcona J.O. y Schang M.J. 1998. Uso de “EUROMOLD L – PLUS” para la conservación de maíz. Acuerdo INTA - EUROTEC.
- Lamelas K.; Mair G. y Beczkowski G. 2014. Anuario 2013. *Boletín Avícola*, 71.
- Pawlik J.R.; Fengler A.I. y Marquardt R.R. 1990. Improvement of the nutritional value of rye by the partial hydrolysis of the viscous water-soluble pentosans following water-soaking or fungal enzyme treatment. *Br.Poult.Sci.* 31: 525-538.
- Sibbald I.R. 1976. A bioassay for true metabolizable energy in feeding stuffs. *Poult. Sci.* 55: 303-308.
- Snedecor G.W. y Cochran W.G. 1967. Statistical methods, 6th ed. Ames: Iowa State University Press.
- Trucksess M.W.; Nesheim S. y Eppley R.M. 1984. Thin layer chromatographic method for deoxynivalenol (DON) vomitoxin in wheat and corn. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 67: 40-43.
- USDA. 2014 a. World corn production, consumption and stock. Disponible en: <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>. Accedido en Agosto del 2014.
- USDA. 2014 b. World corn and barley: Supply and demand. Disponible en: <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>. Accedido en: Agosto del 2014.

Almacenaje de sorgo en silo bolsa

Jorge Azcona¹
Bernardo Iglesias¹
Alejandro Couretot¹

Introducción

La producción mundial de sorgo durante la campaña 2013/14 fue de 59,7 millones de toneladas. La Argentina produjo 4,2 millones de toneladas, de las cuales 2,7 se destinaron al consumo interno (USDA, 2014).

La conservación de este cereal en silo bolsa es una práctica creciente y no se dispone de información local sobre el valor nutricional para aves. Otro aspecto a considerar es que buena parte del sorgo producido en el país es de alto contenido en taninos, lo cual le confiere ventajas agronómicas pero pérdidas importantes de su valor nutricional para aves y cerdos (Azcona et al., 2010).

Trabajos de Price y Butler (1978) mostraron que el proceso de “amoniación” consistente en el agregado de hidróxido de amonio a sorgo humedecido y almacenado en bolsas de plástico permitió mejorar su valor nutricional. Este resultado se debería a que los taninos se acomplejan con el nitrógeno del amonio en lugar de los aminoácidos, dejándolos disponibles para el animal. Esta práctica, si bien efectiva, no se ha difundido por no resultar viable desde el punto de vista económico.

La alternativa de utilizar silo bolsas permite almacenar granos con cierta humedad, condición necesaria para poder incorporar urea y generar liberación de amoníaco que actuaría como “secuestrante” de los taninos. En base a estos antecedentes, se realizaron diversos estudios con aves para determinar el valor nutricional del sorgo conservado en silo bolsa con y sin el agregado de urea.

Materiales y métodos

Se utilizaron sorgos con alto contenido de taninos provenientes de diferentes campañas (2004 a 2008), cosechados con distinto contenido de humedad (CH). El contenido de taninos se determinó por la técnica de Folin-Denis (AOAC, 1970) y el contenido de energía metabolizable verdadera (EMV) por la técnica de Sibbald (1976).

Los tratamientos con material húmedo se almacenaron en bolsas de 70,0 kg. Posteriormente fueron secados al aire antes de ser utilizados. Como control se empleó el mismo sorgo seco naturalmente y conservado en bolsas de “plastillera” dentro de un galpón.

El tipo de aves y diseño experimental utilizados fueron similares a los descritos en los estudios con maíz. Las dietas (Tabla 1) difirieron únicamente en el tratamiento aplicado al cereal utilizado.

¹INTA EEA Pergamino (Buenos Aires), Argentina.

Tabla 1.

Composición y aporte de nutrientes de las dietas experimentales.

INGREDIENTES (%)	1 – 7 DÍAS	8 – 21 DÍAS	22 – 35 DÍAS
Sorgo	55,3	59,2	62,3
Soja Harina 40	15,8	11,2	3,3
Soja Poroto Extrusión	20,0	20,0	25,0
Carne Harina <50	6,4	6,2	5,8
Aceite	1,0	2,1	2,2
Sal	0,3	0,2	0,2
Conchilla	0,3	0,3	0,3
DL Metionina	0,2	0,2	0,2
Lisina	0,0	0,0	0,1
Premix	0,2	0,2	0,0
Cocciostato	0,0	0,0	0,1
Colina	0,0	0,0	0,0
NUTRIENTES (%)	1 – 7 DÍAS	8 – 21 DÍAS	22 – 35 DÍAS
Proteína	21,0	19,3	18,0
Lípidos	6,7	7,7	8,5
EMV (kcal/kg)	3288	3383	3476
Lisina	1,2	1,1	1,0
Metionina+Cistina	0,8	0,8	0,8
Treonina	0,8	0,7	0,7
Lisina Dig.	1,0	0,9	0,9
Metionina+Cistina Dig.	0,7	0,7	0,6
Treonina Dig.	0,6	0,5	0,5
Calcio	1,0	0,9	0,9
Fósforo Disponible	0,5	0,4	0,4

EMV: Energía Metabolizable Verdadera.

En el año 2004 se compararon 4 tratamientos utilizando sorgo cosechado húmedo con 3 meses de almacenaje.

- Sorgo seco natural.
- Sorgo húmedo (28,0% CH).
- Sorgo húmedo (28,0% CH) + 2,0% hidróxido de amonio + 3,0% agua.
- Sorgo húmedo (28,0% CH) + 2,0% urea granulada.

En el año 2005 se compararon 4 tratamientos con sorgo cosechado seco, humedecido por la adición de un 3% de agua y almacenado por 3 meses.

- Sorgo seco natural.
- Sorgo húmedo (19,0% CH).
- Sorgo húmedo (19,0% CH) + 3,0% urea granulada.
- Sorgo húmedo (1,0% CH) + 6,0% urea granulada.

En el año 2006 se compararon 4 tratamientos con sorgo cosechado seco, humedecido por la adición de un 3,0% de agua y almacenado por 2 meses.

- Sorgo seco natural.
- Sorgo húmedo (17,0% CH).
- Sorgo húmedo (17,0% CH) + 1,0% urea granulada.
- Sorgo húmedo (17,0% CH) + 2,0% urea granulada.

En el año 2008 se compararon 3 tratamientos con sorgo cosechado con 29,0% de CH y almacenado por 5 semanas.

- Sorgo seco natural.
- Sorgo húmedo (29,0% CH).
- Sorgo húmedo (29,0% CH) + 1% urea granulada.

Resultados y discusión

Comparación sorgo seco natural vs. sorgo húmedo en silo bolsa

En la Tabla 2 figuran los resultados de contenido de taninos expresados como equivalente ácido tánico (% eat).

Tabla 2.

Contenido de taninos (% eat).

COSECHA	SECO NATURAL	HUMEDAD DE ALMACENAJE (%)		
		28-29	19	17
2004	1,0	1,0		
2005	1,5		1,5	
2006	1,2			1,4
2008	1,2	1,1		

eat: equivalente ácido tánico.

No se observaron cambios en el contenido de taninos debido a las condiciones de almacenaje.

En la Tabla 3 figura la relación EMV/EB comparando materiales secos, conservados en bolsas de “plastillera”, con materiales con distintos niveles de CH, conservados en bolsas plásticas.

Se observó una mejora significativa en la utilización de la energía (EMV/EB) como consecuencia de conservar el sorgo húmedo en silo bolsa, lo que estaría asociado a actividad

enzimática que facilitaría la utilización de nutrientes como se indicara también en el caso de maíz (Pawlik et al., 1990).

Tabla 3.
Relación EMV/EB (%).

COSECHA	SECO NATURAL	HUMEDAD DE ALMACENAJE (%)		
		28,0-29,0	19,0	17,0
2004	81,6	85,1*		
2005	81,3		84,1*	
2006	81,2			84,4*
2008	79,6	84,5*		

* Difiere significativamente del Seco Natural ($p \leq 0,05$).

Tabla 4.
Peso y conversión alimenticia expresada como diferencia (%) respecto del control seco natural.

COSECHA	PARÁMETROS	HUMEDAD DE ALMACENAJE (%)		
		28,0-29,0	19,0	17,0
2004	Peso	+1,6*		
	Conversión	-0,4		
2005	Peso		+2,9*	
	Conversión		=	
2006	Peso			+0,5
	Conversión			-0,3
2008	Peso	-1,3		
	Conversión	+0,7		

* Difiere significativamente del Seco Natural ($p \leq 0,05$).

En la Tabla 4 se presentan los resultados zootécnicos. Se observó un mayor peso con los materiales conservados con 28,0 y 19,0% de CH. Este resultado confirma las mejoras observadas en términos de utilización de la energía. Con 29,0% de CH (año 2008) no se observaron mejoras en el desempeño de las aves a pesar de haberse registrado un incremento en la relación EMV/EB. Esta respuesta podría deberse a que en esta oportunidad no hubo aminoácidos disponibles para la síntesis de proteínas por acción de los taninos. Con baja CH (17,0%) no se observaron mejoras en peso y conversión, probablemente debido a que esta humedad no fue suficiente para generar mejoras en la utilización de los nutrientes.

Comparación sorgo seco natural vs. sorgo húmedo en silo bolsa más secuestrantes de taninos

En la Tabla 5 figuran los resultados de contenido de taninos. Cuanto mayor fue el CH del sorgo, mayor la reducción en el contenido de taninos, debido a la acción de los “se-

Tabla 5.
Contenido de taninos.

COSECHA	TRATAMIENTOS	HUMEDAD	TANINOS
		%	% EAT
2004	Seco natural		1,0
	Hidróxido de amonio 2,0%	28,0	0,7
	Urea granulada 2,0%		0,4
2005	Seco natural		1,5
	Urea granulada 3,0%	19,0	1
	Urea granulada 6,0%		0,9
2006	Seco natural		1,5
	Urea granulada 1,0%	17,0	1,6
	Urea granulada 2,0%		1,5
2008	Seco natural	29,0	1,3
	Urea granulada 1,0%		0,6

eat: equivalente ácido tánico.

cuestrantes” utilizados, ya sea hidróxido de amonio o urea granulada. Con 17,0% de CH no se observó reducción en el contenido de taninos.

En la Tabla 6 figura la relación EMV/EB de materiales secos naturales conservados en bolsas de “plastillera” y de materiales con distintos niveles de CH, conservados en bolsas plásticas más la inclusión de secuestrantes de taninos.

Tabla 6.
Relación EMV/EB.

COSECHA	TRATAMIENTOS	HUMEDAD	EMV/EB
		%	
2004	Seco natural		81,6
	Hidróxido de amonio 2,0%	28,0	86,8*
	Urea granulada 2,0%		86,8*
2005	Seco natural		81,3
	Urea granulada 3,0%	19,0	85,9*
	Urea granulada 6,0%		85,3*
2006	Seco natural		81,2
	Urea granulada 1,0%	17,0	81,9
	Urea granulada 2,0%		84,4
2008	Seco natural	29,0	79,6
	Urea granulada 1,0%		86,3*

* Difiere significativamente del Seco Natural ($p \leq 0,05$).
EB/EMV: Relación entre energía Bruta y Energía Metabolizable Verdadera (%).

El aprovechamiento de la energía (EMV/EB) mejoró debido a la inclusión de “secuestrantes” al grano húmedo, siendo más evidente el efecto con alto CH.

En la Tabla 7 se presentan los resultados correspondientes a peso vivo y a conversión.

Tabla 7.

Peso vivo y conversión expresados como diferencia (%) respecto del control seco natural.

COSECHA	TRATAMIENTOS	HUMEDAD (%)	PESO (%)	CONVERSIÓN (%)
2004	Seco natural		100	100
	Hidróxido amonio 2,0%	28,0	+5,6*	-4,4
	Urea granulada 2,0%		+2,4*	-0,5
2005	Seco natural		100	100
	Urea granulada 3,0%	19,0	-1,4	+1,6
	Urea granulada 6,0%		-3,5*	+1,7
2006	Seco natural		100	100
	Urea granulada 1,0%	17,0	-1,0	+1,0
	Urea granulada 2,0%		-0,2	+2,7
2008	Seco natural	29,0	100	100
	Urea granulada 1,0%		+4,1*	-5,1

* Difiere significativamente del Seco Natural ($p \leq 0,05$).

Las dietas elaboradas con sorgo almacenado con 28,0% de CH permitieron un incremento significativo en el peso de 5,6% con 2,0% de hidróxido de amonio y de 2,4% con 2% urea. Las mejoras observadas en conversión no fueron significativas.

Con dietas con 19,0% de CH y 3,0 o 6,0% de adición de urea se observó una caída en el peso y una peor conversión alimenticia. Este resultado podría deberse a un exceso de nitrógeno en el organismo del ave cuya eliminación requiere un gasto de energía extra.

Con menores niveles de urea y bajo CH (17,0%) se observó una tendencia a peor conversión, sin cambios en el peso de las aves, probablemente debido a que faltó agua para que la urea reaccione con el tanino, este hecho se hizo evidente al observar gránulos de urea sin disolver al finalizar el período de conservación.

Las dietas elaboradas con sorgo almacenado con 29,0% CH y 1,0% de urea permitieron un incremento significativo en el peso de 4,1%.

Conclusiones

El almacenaje de sorgo húmedo no modificó el contenido de taninos, no obstante se observó una mejora en la utilización de la energía y, en algunos casos, en el desempeño de las aves.

La adición de hidróxido de amonio o urea como “secuestrantes” de taninos provocó una disminución en el contenido de taninos totales, efecto más evidente con altos niveles de humedad.

Con la adición de 2% de hidróxido de amonio o 1% de urea en condiciones de alta humedad del grano (28-29%) se mejoró la utilización de la energía y el desempeño de las aves.

Un exceso de urea, ya sea por utilizar altos niveles de inclusión (3 a 6%) o bajos niveles de humedad del grano (17%), afectó negativamente el desempeño de las aves.

Referencias

- AOAC. 1970. Method 90-81: Folin Denis. En: Official methods of analysis, 11th Ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.
 - Azcona J.O.; Schang M. J.; Couretot A. y Sala M. 2009. Calidad nutricional de maíz almacenado en bolsas plásticas, pp. 51 - 55. En: Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, 180 p.
 - Azcona J.O.; Iglesias B.F. y Charrière M.V. 2010. El Sorgo en la nutrición de aves, pp. 383. En: Proc. IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo, 17 - 19 de Noviembre, Centro de Convenciones de la Bolsa de Comercio, Rosario.
 - Pawlik J.R; Fengler A. I. y Marquardt R.R. 1990. Improvement of the nutritional value of rye by the partial hydrolysis of the viscous water-soluble pentosans following water-soaking or fungal enzyme treatment. *Br.Poult.Sci.* 31(3): 525 - 538.
 - Price M.L. y Butler L.G. 1978. Detoxification of high tannins sorghum grain. *Nutr. Rep. Int.* 17: 229 - 236
 - Sibbald I.R. 1976. A bioassay for true metabolizable energy in feeding stuffs. *Poult. Sci.* 55: 303 - 308.
- USDA. 2014. World sorghum production, consumption, and stocks. Disponible en: <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/psdHome.aspx>. Accedido en Agosto del 2014.

Almacenamiento de cebada cervecera en silo bolsas

José Massigoge¹
Leandro Cardoso²
Ricardo Bartosik²
Juan Rodríguez²
Ochandío Darío¹

Resumen

En Argentina la industria maltera/cervecera almacena cebada en bolsas plásticas herméticas (silos bolsa). Los objetivos de este trabajo fueron: 1) determinar la evolución de la calidad de la cebada cervecera almacenada en silos bolsa con destino industrial, y 2) establecer la relación entre la concentración de CO₂ en el interior del silo bolsa, indicador de la tasa de respiración debido a la actividad biológica del granel, y cambios en la calidad de la cebada embolsada.

El ensayo se realizó en instalaciones de Cervecería y Maltería Quilmes, localizada en la ciudad de Tres Arroyos en el sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina), donde se almacenaron más de 10,0 mil toneladas de cebada seca en algo más de 50 silo bolsas a las que se les realizó el seguimiento durante un periodo de almacenamiento de hasta 1 año. Los resultados de una muestra de estas bolsas demostraron que, bajo las condiciones de esta experiencia, es factible almacenar cebada cervecera seca en silo bolsa ya que, en general, los rubros más importantes desde el punto de vista industrial no se vieron afectados durante el periodo de almacenaje evaluado. Además, mediante la medición de la concentración de CO₂, fue posible detectar actividad biológica inusualmente alta en algunas bolsas.

Palabras clave: cebada cervecera, almacenaje, silo bolsa, CO₂.

Introducción

Argentina es el principal productor de cebada cervecera de América del Sur, y también el principal proveedor de cebada y malta de la región, exportando a países como Brasil, Colombia, Ecuador y Perú (CICA, 2010). La producción de cebada cervecera en la Argentina ha crecido considerablemente en los últimos años, llegando a casi 590 mil ha en la campaña 2008/9 (MAGPyA, 2009). A su vez, la provincia de Buenos Aires concentra aproximadamente el 95,0% del total nacional. Especialmente el sur de esta

¹EEAI Barrow, Tres Arroyos (Buenos Aires), Argentina.

²EEA INTA Balcarce (Buenos Aires) Argentina.

provincia es una importante zona productora de cebada. Esto se debe a que las características edafoclimáticas de esta región son aptas para la producción de cebada, y también a que las principales malterías están radicadas en esta zona (en Bahía Blanca se localiza la maltería de Cargill, con una capacidad de 225 mil toneladas. en Puán la Maltería Pampa, con 180 mil toneladas y en Tres Arroyos la maltería Quilmes, con 200 mil toneladas de capacidad de producción (CICA, 2010).

En Argentina la industria maltera tiene marcada ingerencia sobre la producción de cebada. Esta intervención se realiza mediante contratos que las malteras establecen con los productores agropecuarios donde, además del precio y otras condiciones, se fija la calidad que debe tener la producción, las condiciones de recibo, bonificaciones y rebajas a aplicar de acuerdo a esa calidad. Esto permite a la industria tener cierto control sobre la cantidad y calidad producida de su principal materia prima. (Massigoge, 2005).

Entre los principales atributos de calidad que interesan a la industria se deben mencionar el contenido de proteína, el calibre la cuarta clase y el poder germinativo (PG), entre otros. De todos estos, sin lugar a dudas el PG es el parámetro clave en la cebada para malteo. Esto se debe a que durante el proceso industrial de la cebada destinada a cerveza tiene mayores exigencias que el de otros cereales, ya que la transformación de cebada en malta es un proceso netamente biológico (para obtener la malta la cebada debe germinar). Por lo tanto, un bajo PG es un problema muy grave para la industria. Este defecto se relaciona con errores humanos en el manejo del cereal, ya sea por un inadecuado secado artificial (por altas temperaturas o excesivos tiempos de secado), o por un almacenamiento deficiente. Por lo tanto, el almacenaje de la cebada es considerado una etapa crítica del proceso, y es por esto que la industria exige la entrega de la mercadería inmediatamente después de la cosecha, para asegurar de esta manera el control de los factores que inciden en la conservación de su materia prima (Massigoge, 2005).

La capacidad de almacenaje en instalaciones fijas de las malterías argentinas se estima en 489,0 mil toneladas (Ochandio et al., 2009). Por otra parte, la industria adquiere anualmente 1,6 millones de toneladas de cebada aproximadamente, por lo que una porción importante de esta mercadería es almacenada en plantas de terceros y, cada vez en mayor proporción, en sistemas de almacenaje temporarios o silos bolsas (CICA, 2010).

El sistema de almacenamiento en silos bolsas consiste en almacenar grano en bolsas de plástico (polietileno de baja densidad) herméticamente cerradas. El principio básico del almacenamiento en silo bolsa, se basa en la creación de una atmósfera automodificada (Bartosik et al., 2009 a), producida por la respiración del granel, donde durante el almacenaje aumenta la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y disminuye la de oxígeno (O_2).

Investigaciones recientes ((Bartosik et al., 2009 b) encontraron que la concentración de CO_2 en el aire intersticial de los granos es un buen indicador de la actividad biológica en la masa de granos almacenados en silo bolsa, y una herramienta útil para determinar el nivel de riesgo de almacenamiento en este sistema.

Argentina es el país de mayor volumen almacenado bajo el sistema de silo bolsa. En la campaña 2007/08 se almacenaron 35,0 millones de toneladas de granos en este sistema (Rodríguez et al., 2009). Si bien hay estudios que trataron la evolución de distintos parámetros de calidad (humedad, peso hectolítrico, poder germinativo, etc.) en diferentes granos almacenados en bolsas plásticas, existen pocos antecedentes que demuestren la estabilidad de los parámetros de calidad industrial de cebada cervecera bajo este sistema

de almacenamiento, y su relación con la concentración de CO₂. Por estas razones, durante los años 2009/2010 se desarrolló un seguimiento de cebada cervecera almacenada en silos bolsa.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) determinar la evolución de la calidad de la cebada cervecera destinada a la industria almacenada en silos bolsas, y 2) establecer la relación entre la concentración de CO₂ en el interior de la bolsa, indicador de la tasa de respiración debido a la actividad biológica del granel, y variaciones en la calidad de la cebada embolsada.

Materiales y métodos

La experiencia se realizó en instalaciones de Cervecería y Maltería Quilmes localizada en Tres Arroyos, al sur de la provincia de Buenos Aires. En este lugar se almacenaron más de 10 mil toneladas de cebada cervecera en bolsas plásticas. Para ello se utilizaron bolsas de polietileno de 235 µm de espesor, de 2,7 m de diámetro y de 60 m de largo, con una capacidad de aproximadamente 170,0 toneladas de cebada.

Estas bolsas se confeccionaron desde diciembre de 2008 hasta agosto de 2009. La mayor cantidad de bolsas se hicieron durante los meses de diciembre de 2008, enero y febrero de 2009, con cebada procedente del campo. En las bolsas que se confeccionaron de marzo en adelante la cebada procedió de plantas de silos. En todos los casos, la cebada que se almacenó tenía un contenido de humedad (CH) inferior a la tolerancia de recibo que indica la norma de comercialización de cebada (12,5%).

El trabajo que aquí se presenta consistió en realizar un seguimiento de 56 bolsas, midiendo la evolución de la calidad y de la actividad biológica del granel. El seguimiento de la calidad se hizo mediante muestreo, análisis y observación. El muestreo se realizó con un calador de camiones, perforando cada silo bolsa en 3 sitios más o menos equidistantes. Después del calado, los orificios fueron reparados con el objetivo de mantener la hermeticidad de las bolsas. Esta tarea se repitió cada 75 días aproximadamente. El primer calado se hizo el 16 de marzo de 2009 y el último, que se informa en este trabajo, el 2 de febrero de 2010. En ese periodo cada bolsa se muestreó entre 3 y 5 oportunidades dependiendo del tiempo de almacenamiento. Las muestras fueron remitidas al laboratorio de Cervecería y Maltería Quilmes. Los parámetros de calidad evaluados fueron: CH, PG, proteína, calibre, cuarta clase, y presencia o ausencia de insectos vivos. El CH y el tenor proteico se midieron con un instrumento basado en la transmisión de infrarrojo cercano (Infratec 1241), y el PG con la técnica del vitascopio. El calibre (material retenido sobre la zaranda de 2,5 mm) y la cuarta clase (material que atraviesa la zaranda de 2,2 mm) se evaluaron con una zaranda de tajo de laboratorio. En la Tabla 1 se pueden observar los valores de PG, CH, proteína, calibre, cuarta clase e insectos de la norma de comercialización de cebada cervecera en Argentina (SENASA, 2010).

Además, al momento del vaciado de las bolsas, se constató por observación el estado de la mercadería que se cargaba (presencia o ausencia de material en descomposición, olores objetables, etc.) y el estado de las bolsas (presencia o ausencia de roturas, etc.).

Tabla 1.

Valores de poder germinativo (PG), contenido de humedad (CH), proteína, calibre, cuarta clase e insectos de la norma de comercialización de cebada cervecera en Argentina (SENASA, 2010).

PARÁMETRO	BASE DE COMERCIALIZACIÓN	TOLERANCIA DE RECIBO
PG	Mínimo: 98,0%	Mínimo: 95,0%
CH	Máximo: 12,0%	Máximo: 12,5%
Proteína	Mínimo: 10,0% Máximo: 12,0%	Máximo: 13,0%
Calibre		Mínimo: 85,0%
Cuarta clase		Máximo: 3,0%
Insectos		Libre

El seguimiento de la actividad biológica se realizó mediante la medición de la concentración de CO₂, con un analizador portátil de gases (PBI Dan Sensor CheqPoint, Dinamarca) que toma una muestra del gas del interior de la bolsa por medio de una pequeña aguja hipodérmica. Cada 5,0 m lineales de bolsa se tomó un punto de medición de CO₂. Esta tarea se repitió aproximadamente cada 30 días, comenzó el 5 de marzo de 2009 y finalizó este trabajo el 15 de febrero del 2010.

En la Tabla 2 se pueden observar los registros meteorológicos mensuales durante el periodo en que realizó la experiencia.

Durante el periodo evaluado llovieron 942 mm con una HR media del aire del 60,0%.

Tabla 2.

Registros meteorológicos mensuales (lluvia, humedad relativa (HR), temperaturas y cantidad de heladas) entre diciembre de 2008 y febrero de 2010.

MES	AÑO	LLUVIA (mm)	HR (%)	TEMPERATURA ABRIGO (°C)			Nº DE HELADAS
				MEDIA	MÁXIMA	MÍNIMA	
Diciembre	2008	2	50,0	22,4	292	13,2	0
Enero	2009	38	48,0	23,9	31,8	14,5	0
Febrero	2009	28	50,0	23,4	30,7	14,1	0
Marzo	2009	131	66,0	20,4	27,3	14,5	0
Abril	2009	26	61,0	15,2	23,8	7,4	2
Mayo	2009	42	70,0	11,5	18,5	5,5	6
Junio	2009	56	72,0	7,6	13,7	2,3	9
Julio	2009	38	71,0	6,1	12,7	0,6	16
Agosto	2009	4	60,0	11,2	18,5	4,6	4
Septiembre	2009	36	72,0	9,2	16,0	2,7	10
Octubre	2009	46	60,0	14,1	20,9	6,8	4
Noviembre	2009	74	54,0	18,1	24,7	8,7	1
Diciembre	2009	61	54,0	20,8	27,2	12,2	0

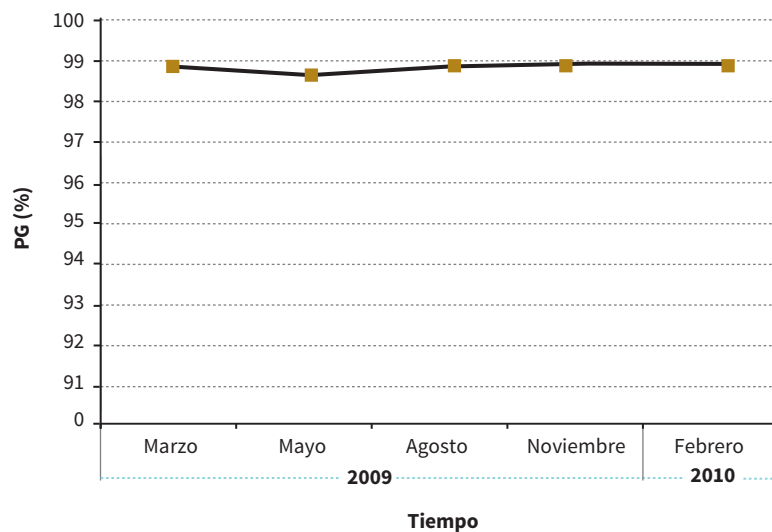
La temperatura media mensual del aire fue de 16,6 °C, con un máximo en los meses de enero, y un mínimo en julio, y con la ocurrencia de un total de 52 heladas.

Resultados y discusión

Como se mencionó anteriormente, el PG es muy importante en la cebada cervecera destinada a la industria. En ese sentido, entre los principales resultados se debe mencionar en primer lugar, que el PG promedio no se vio afectado durante el tiempo considerado, manteniéndose en un valor cercano al 99,0% (98,8% promedio con un desvío estándar (DS) de 0,14%).

Figura 1.

Evolución del poder germinativo (PG; %) promedio durante el tiempo de almacenaje evaluado.



De las 56 bolsas, solo 2 (3,5%) vieron afectado su PG, una en forma muy leve bajando al 94,0%, y la restante en forma un poco más marcada reduciendo su PG a un 86,0%.

Esto coincide con lo reportado por Bartosik et al. (2009 a) que para maíz, trigo, soja y girasol, y después de 150 días de almacenamiento, no encontraron caídas significativas en la mayoría de los parámetros de calidad, a excepción del PG que en algunos casos resultó ligeramente afectado.

Al mismo tiempo, como se puede observar en la Figura 2, tanto el CH como el contenido de proteína tampoco se modificaron durante el tiempo de almacenamiento (promedio 11,3% con un DS del 0,2%, y 11,7% con un DS de 0,1% respectivamente). Esto coincide con lo encontrado por Ochandio et al. (2009) para cebada, y por Bartosik et al. (2009 a) para maíz, trigo, soja y girasol almacenados en silo bolsa.

En cuanto al calibre y a la cuarta clase, tampoco se vieron afectados durante el tiempo de almacenamiento, tal como se puede ver en la Figura 3. El calibre arrojó un promedio de 76,4% (DS = 1,6%) y la cuarta clase, un promedio de 5,1% (DS = 0,7%). Las diferencias están relacionadas con errores experimentales (de muestreo y laboratorio).

Figura 2.
Evolución de la proteína (%) y el contenido de humedad (CH; %) promedio durante el tiempo de almacenamiento evaluado.

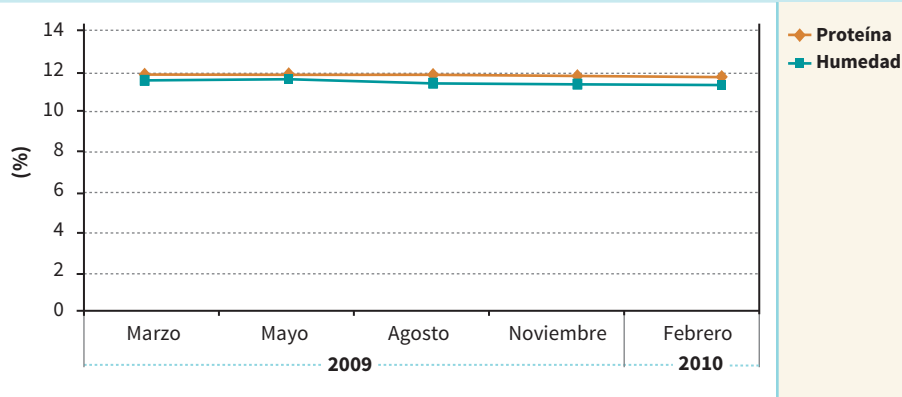
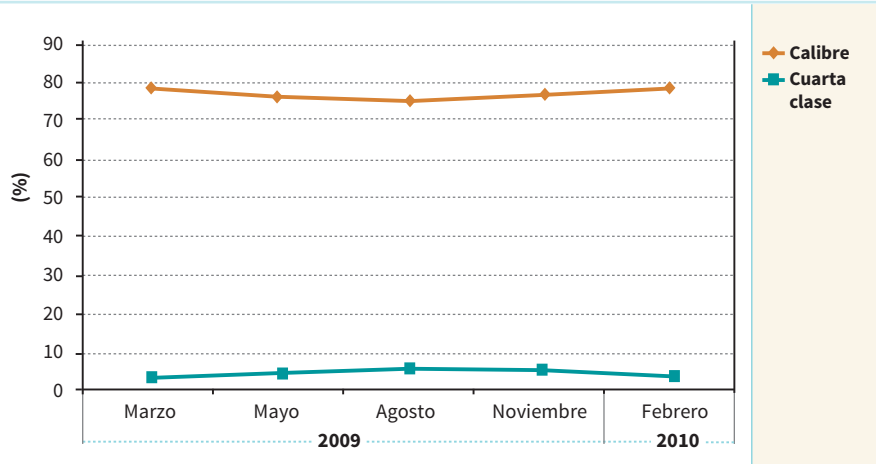


Figura 3.
Evolución del calibre (%) y la cuarta clase (%) durante el tiempo de almacenaje evaluado.



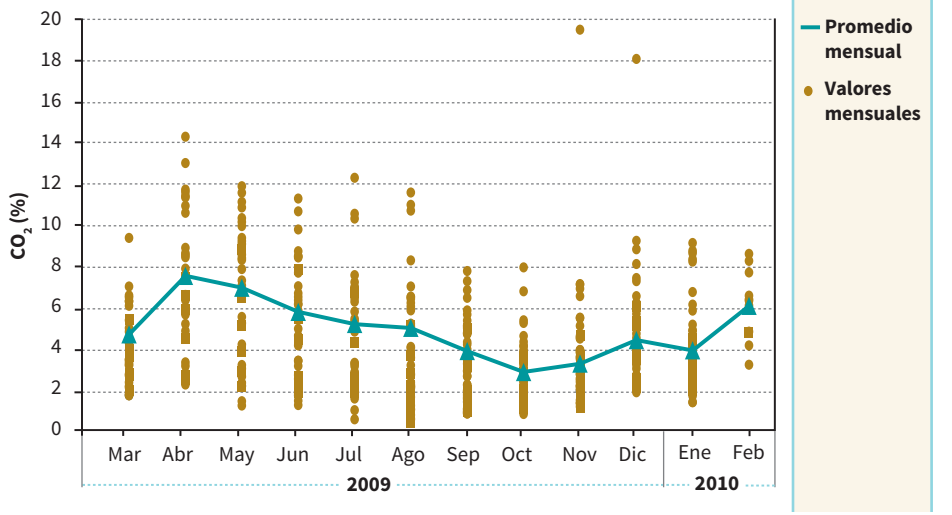
En 6 silo bolsas (algo más de un 10,0% de los casos) se detectaron insectos vivos (gorgojos y carcomas) principalmente durante los primeros meses de almacenamiento (entre marzo y mayo de 2009).

Con respecto a la concentración de CO_2 en el aire intersticial de la cebada almacenada en estas bolsas, se pudo observar variaciones a lo largo del tiempo. Esto es coincidente por lo reportado por Darby y Caddick (2007), quienes para el sur de Australia y luego de 6 meses de almacenamiento de cebada, encontraron cambios significativos en la composición de los gases del interior de los silo bolsas, con incrementos de CO_2 en detrimento del O_2 .

Como se puede observar en la Figura 4, los valores de CO_2 en general siguieron la misma tendencia a lo largo del tiempo en los silo bolsas evaluados (con algunas excepciones que podrían atribuirse a la entrada de agua de lluvia por orificios inferiores en determinadas bolsas).

Figura 4.

Evolución de la concentración de CO₂ (%) promedio mensual (con línea) y valores mensuales (con puntos) de CO₂ (%) de cada silo bolsa.

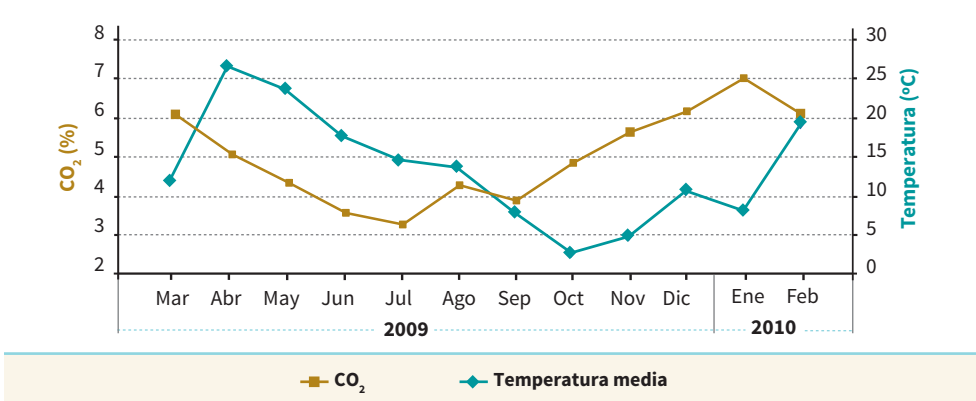


La concentración de CO₂ promedio aumentó durante el verano y el otoño, hasta llegar al máximo de 7,4% en abril. Durante el invierno comenzó a disminuir, con continuando en parte de la primavera hasta llegar a un mínimo de 2,6% en octubre. El valor medio anual fue de 4,7% (DS = 1,6%).

Como se puede ver en a Figura 5, la evolución de la concentración de CO₂ en el aire intersticial de la cebada almacenada en las silo bolsas guardó cierta relación con la temperatura media mensual del aire.

Figura 5.

Evolución de la concentración de CO₂ (%) en el aire intersticial promedio y de la temperatura media mensual del aire (°C) durante el tiempo de almacenaje evaluado.



Estos resultados son consistentes por los reportados por Bartosik et al. (2009 a), para silo bolsas de maíz, trigo, soja y girasol y por Ochandio et al. (2009) para silo bolsas de

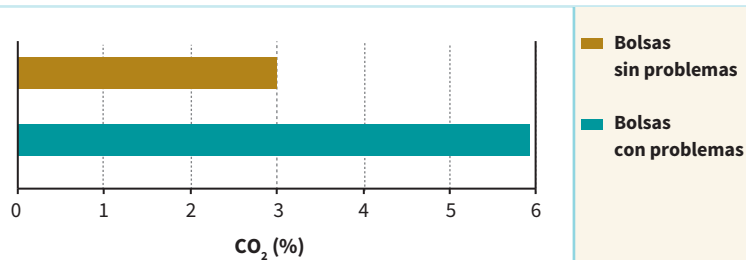
cebada, donde la temperatura del grano sigue el patrón de la temperatura ambiente. La temperatura puede actuar en el granel como catalizador de la actividad biológica (granos, microorganismos e insectos si los hubiere). Es así que la curva de concentración de CO₂ (que mide de alguna manera esa actividad biológica) siguió, con cierto retraso, a la curva de la temperatura media mensual del aire. Por otra parte, de los silos bolsas vaciados, en el 30,0% de los casos se detectaron pérdidas por descomposición de granos en cantidad variable. Esto se detectó casi exclusivamente en los extremos, y en especial en los cierres de las bolsas. Ya sea en los extremos, o en otros lugares, la descomposición del grano se debió fundamentalmente a la entrada de agua y aire.

Solo en el 9,0% de las bolsas abiertas las pérdidas fueron importantes, llegaron a las 10,0 toneladas por bolsa aproximadamente (5,2% de la cebada almacenada en la bolsa). En el 21,0% de los casos hubo pérdidas de entre 3,0 a 5,0 toneladas. En el resto (70,0%), las pérdidas fueron muy bajas, prácticamente despreciables. Al considerar todas las bolsas cargadas hasta el momento, menos del 0,007% de la mercadería resultó en mal estado y tuvo que ser descartada.

En los silos bolsas en las que las pérdidas por descomposición fueron más importantes, se observaron altos valores de CO₂ (más del 10,0%) en al menos un punto de muestreo, durante al menos 4 meses (con un promedio de 5,8%, 7,6% y 8,6% de concentración de CO₂ durante todo el tiempo de almacenaje). En el 21,0% donde las pérdidas fueron de 3,0 a 5,0 toneladas por bolsa, también se verificó que, en al menos 1 punto y durante al menos 1 mes, se midieron valores de CO₂ mayores al 10,0%.

Las 2 bolsas que vieron afectado su PG, también tuvieron altos valores de concentración de CO₂ (promedio de todo el periodo de 6,6% y 8,6%), con valores medios de más del 10,0% de CO₂ durante al menos 1 mes.

Figura 6.
Valores promedio de CO₂ (%) de silos bolsas con algún problema de calidad detectado, y sin problemas detectados.



Lo mismo ocurrió en todas las bolsas en que se detectaron insectos vivos. En ellas, se midieron valores de CO₂ mayores al 10,0%, en al menos 1 sección de la bolsa y como mínimo durante 2 meses.

No obstante, en una bolsa que se midió actividad biológica inusualmente alta durante un tiempo, y que luego evidenció una disminución de sus valores de CO₂ a menos del 10,0%, no pudo detectarse ningún tipo de deterioro en la calidad del grano (ni en el PG, ni en pérdidas por descomposición, ni en desarrollo de insectos, etc.). Esto podría atribuirse

a que el sistema de monitoreo por medición de la concentración de CO₂ es muy sensible, y si bien en esa bolsa podría haberse desencadenado algún tipo de deterioro, no se pudo comprobar, por ser esta muy incipiente.

De cualquier manera, si se toma el conjunto de bolsas que tuvieron al menos un problema de pérdida de calidad (bajo PG, insectos vivos, o grano en descomposición), tuvieron mayores valores promedios de CO₂ que las que no tuvieron inconvenientes detectados (Figura 6).

Como se puede observar en la Figura 6, el valor medio de concentración de CO₂ de las bolsas con algún tipo de problema detectable, casi duplicó a la concentración de CO₂ de las bolsas que no tuvieron ningún inconveniente de calidad detectado (5,9% contra 3,0% respectivamente).

Conclusiones

Es factible almacenar cebada cervecera seca en el sistema de silo bolsa ya que en las condiciones que se hizo esta experiencia el contenido de humedad, la proteína, el calibre y la cuarta clase no se vieron afectados significativamente durante un año de almacenamiento.

La medición de la concentración de CO₂, en el aire intersticial, utilizada como indicadora de la actividad biológica en la masa del grano de cebada almacenado en silo bolsa fue una herramienta útil para determinar el nivel de riesgo de almacenamiento con este sistema.

Agradecimientos

A Cervecería y Malterías Quilmes, en especial al señor Marcelo Jezovski y al Ing. Agr. Fidel Cortese.

Referencias

- Bartosik R.; Rodriguez J.; Malinarich H. y Cardoso L. 2009 a. Almacenaje de maíz, trigo, soja y girasol en bolsas plásticas herméticas, pp. 2 - 14. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Bartosik R.; Cardoso L.; Ochandio D. y Croce D. 2009 b. Detección temprana de procesos de descomposición de granos almacenados en bolsas de plástico herméticas mediante la medición de CO₂, pp. 15 - 21. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- CICA (Cámara de la Industria Cervecería Argentina); 2010. Disponible en www.cam-aracervecera.com.ar. Accedido en marzo del 2010.
- Darby J.A. y Caddick L.P. 2007. Review of grain harvest bag technology under Australian conditions. A comprehensive analysis and field evaluation of harvest bag

technology: incorporating a review of hermetic and temporary storage, control of insects and fungi, and preservation of grain quality, under typical Australian storage and handling conditions. CSIRO Entomology. Technical Report N° 105.

- MAGPyA (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación). 2009. Disponible en <http://www.siiia.gov.ar/>. Accedido en marzo 2010.
- Massigoge J.I. 2005. Las principales industrias alimentarias de Tres Arroyos y sus encadenamientos productivos en la dinámica económica local. Tesis presentada como requisito para optar al grado de Magister Scientiae, Postgrado de Agroeconomía, Facultad de Ciencias Agrarias de Balcarce, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.
- Ochandio D.; Rodriguez J.; Rada E.; Cardoso L. y Bartosik R. 2009. Almacenamiento de cebada cervecera en bolsas plásticas herméticas. X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR, 1 - 4 de Septiembre, Rosario, Argentina.
- Rodriguez J.; Bartosik R.; Cardoso L. y Croce D. 2009. Factores que afectan la concentración de dióxido de carbono en el aire intersticial de trigo almacenado en bolsas plásticas herméticas, pp. 35 - 40. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- SENASA. 2010. Norma V Cebada. Disponible en <http://www.senasa.gov.ar/Archivos/File/File1144-anexos.pdf>. Accedido en abril de 2010.

Almacenamiento de cebada cervecera en silo bolsas con diferentes contenidos de humedad

Ricardo Bartosik¹
Dario Ochandio²
Leandro Cardoso¹
Diego De la Torre¹

Resumen

El almacenamiento de cebada cervecera seca (12,0% de humedad) en silo bolsas es una práctica bastante común en Argentina, sin que esto presente efectos perjudiciales en el proceso de malteado. Sin embargo, algunas veces los productores tienen que almacenar cebada con contenidos de humedad (CH) mayores al 12,0%, lo que implica un mayor riesgo para la calidad del malteado y, eventualmente, una pérdida monetaria para los productores (la cebada tiene que ser tratada como forraje). En este sentido, sería conveniente tener una herramienta de monitoreo que permita estudiar las condiciones de almacenamiento de la cebada en silo bolsas y realizar una rápida evaluación de los riesgos. El objetivo de este estudio fue cuantificar el efecto del CH de almacenamiento en la germinación de la cebada y determinar su correlación con la concentración de dióxido de carbono (CO₂), como un indicador de riesgo de almacenamiento.

Las pruebas fueron realizadas en 2 silo bolsas que almacenaban cebada con un rango de un CH entre 13,0% y 18,0%. Se recolectaron muestras de grano al comienzo del almacenamiento y cada 15 días durante un lapso de 5 meses. Las muestras fueron ingresadas al laboratorio para analizar el poder germinativo de la semilla. El CO₂ y la temperatura del grano también se midieron en el silo bolsa cada 15 días.

Para los valores de temperatura registrados durante el verano en Argentina, no es seguro almacenar cebada cervecera un CH superior al 14,0%. Con un CH menor al 14,0%, la cebada puede ser almacenada en silo bolsas por 5 meses sin afectar la germinación.

La medición de CO₂ es un indicador efectivo para detectar el nivel de riesgo de descomposición del grano causado por excesivo CH, o bien detectar potenciales problemas derivados de la filtración de agua en la bolsa durante el almacenamiento. Sin embargo, la evolución de CO₂ debería ser usado como un indicador de descomposición durante el almacenamiento, en lugar de una simple lectura en un momento determinado.

Palabras clave: almacenamiento de granos, dióxido de carbono, actividad biológica, poder germinativo, temperatura del grano.

¹EAAI Barrow, Tres Arroyos (Buenos Aires), Argentina.

²EAA INTA Balcarce (Buenos Aires) Argentina.

Introducción

Argentina es el productor más grande de cebada en Sudamérica, con una producción estimada de 4,0 millones de toneladas en 2011/2012 (Agrositio, 2012). El principal destino de la cebada es la industria de malteado. Los requerimientos de calidad de la cebada incluyen un poder germinativo (PG) de 98,5% con una tolerancia de 95,0%, tamaño del grano, contenido proteico y un bajo porcentaje de granos sin cáscaras o quebrados (Savio y Cattaneo, 2008).

La cebada es almacenada en estructuras permanentes de almacenamiento (silos o celdas) o en silo bolsas. El silo bolsa es un sistema de almacenamiento hermético de atmósfera modificada. La cobertura de plástico del silo bolsa está hecha de 3 capas de polietileno de 235 μm de espesor que previene el libre intercambio de gases entre el exterior del silo bolsa y el espacio intergranario. El proceso de respiración del granel (granos, hongos e insectos) produce un incremento de la concentración de CO_2 y una reducción de la concentración de oxígeno (O_2) (Bartosik et al., 2008 a).

Han sido reportados algunos estudios en almacenamiento de cebada seca, 12,0% de contenido de humedad (CH) o menos, en silo bolsas (Ochandio et al., 2008; Massigoge et al., 2010). Los resultados muestran que la calidad comercial no fue afectada luego de 12 meses de almacenamiento. Por otro lado, el almacenamiento de cebada con un CH más alto afecta negativamente el proceso de malteado por la caída en la germinación (Cardoso et al., 2010). En este sentido, Darby y Caddick (2007) mencionaron que el tiempo de almacenamiento seguro de cebada en silo bolsas con 14,0% CH y 35,0 °C podría estar reducido a solo 1 mes.

Durante los años lluviosos es común cosechar cebada con un CH mayor al 12,5% (tolerancia de comercialización), que suele ser almacenada húmeda en silo bolsas por unos meses hasta ser acondicionada al CH de almacenamiento seguro. Esto representa un riesgo de pérdida de calidad si, por algún motivo, el grano permanece almacenado en silo bolsas por un periodo más largo. Bartosik et al. (2008 a) demostraron que para trigo almacenado en silo bolsas, la concentración de CO_2 disminuye con el CH del grano y que el aumento de la actividad biológica en el grano húmedo puede producir pérdida de la calidad comercial. Massigoge et al. (2010) plantearon la hipótesis de que podría ser factible el monitoreo de la concentración de CO_2 para estimar el riesgo de pérdida de la calidad comercial para cebada almacenada en silo bolsa.

El objetivo de este estudio fue cuantificar el efecto del CH del grano en la germinación de la cebada y determinar su correlación con la concentración de CO_2 en silo bolsas como un indicador de riesgo de descomposición.

Materiales y métodos

Las pruebas fueron realizadas en el partido de Balcarce, provincia de Buenos Aires, Argentina. Fueron seleccionados 2 silo bolsas (A y B) con aproximadamente 180 toneladas de cebada cervecera, con un CH de 12,9% a 17,9%. Para cada silo bolsa se determinaron 3 puntos de muestreo basados en datos de CH del grano (alto, bajo e intermedio) obtenidos de muestras recolectadas durante la operación de embolsado (Tabla 1).

Tabla 1.

Contenido de humedad inicial (CH, %) para 3 puntos de muestreo de los silo bolsas A y B.

	CH INICIAL (%)		
	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Silo bolsa A	A1 = 13,8	A2 = 13,4	A3 = 12,9
Silo bolsa B	B1 = 17,9	B2 = 15,4	B3 = 13

El estudio comenzó el 13 de enero (15 días después del embolsado) y duró aproximadamente 135 días. Se determinó la concentración de CO₂, la temperatura del grano, el CH el PG. El proceso de muestreo consistió en medir la concentración de CO₂ con un analizador de gases portátil (PBI Dan Sensor, CheckPoint, Dinamarca), perforando la cubierta plástica con una aguja. Una varilla de madera con 3 sensores de temperatura a diferentes alturas fue insertada en la masa de grano (diagonalmente desde la parte superior a la inferior y hacia el centro del silo bolsa) para medir la temperatura del grano a aproximadamente 0,1 m, 0,7 m y 1,4 m desde la superficie del grano. Los valores de temperatura fueron obtenidos entre la media mañana y el mediodía. Luego, en cada punto de muestreo, una muestra de grano fue recolectada usando un calador sonda estándar, separada en 3 diferentes niveles (0,1 m, 0,7 m y 1,6 m de profundidad, correspondientes a la capa superior, media y baja, respectivamente, siendo la altura total del silo bolsa 1,7 m). Luego de realizar el muestreo del silo bolsa, las aberturas fueron selladas con una cinta especial con el objetivo de restablecer la hermeticidad. El proceso de muestreo descrito se repitió cada 2 semanas durante el periodo de almacenamiento. Las muestras de granos recolectadas fueron colocadas en bolsas de plástico selladas e ingresadas al Laboratorio de Poscosecha de Granos de INTA (Estación Experimental Balcarce), donde se determinó el CH del grano con un medidor de capacitancia (GAC 2100, Dickey-John). En el Laboratorio de Semillas de INTA (Estación Experimental Balcarce), se determinó el PG de las muestras de cebada según las normativas del ISTA (2008), enfriando las semillas por 48 h y luego dejándolas germinar durante 7 días a 20,0 °C con iluminación (fueron consideradas 4 réplicas de 50 semillas).

Resultados y discusión

La temperatura del grano (excluyendo la capa perimetral de grano en la bolsa) al comienzo del estudio (mediados de enero) fue de 22,0 °C para ambos silo bolsas (Figuras 1 y 2). La temperatura máxima se registró a fines de enero (24,0 °C y 26,0 °C para silo bolsas A y B respectivamente), luego disminuyó progresivamente hasta mediados de abril (otoño). En los subsiguientes muestreos se observó que la temperatura se estabilizó, llegando al 31 de mayo con 16,0 °C en ambas bolsas. Estos rangos de temperatura y su evolución son consistentes con aquellos reportados por Ochandio et al. (2009) y Cardoso et al. (2010) para localidades y periodos de almacenamiento similares.

La Figura 3 muestra que la germinación en los 3 puntos del silo bolsa A (A1, A2 y A3) y el punto 3 del silo bolsa B (B3) permanecieron claramente por encima de la tolerancia de comercialización (95,0%) durante el periodo del estudio.

Figura 1.

Concentración de CO₂ (%) para 3 puntos del silo bolsa A (A1 = 13,8% CH; A2 = 13,4% CH y A3 = 12,9% CH) y temperatura (°C) durante el tiempo de almacenamiento.

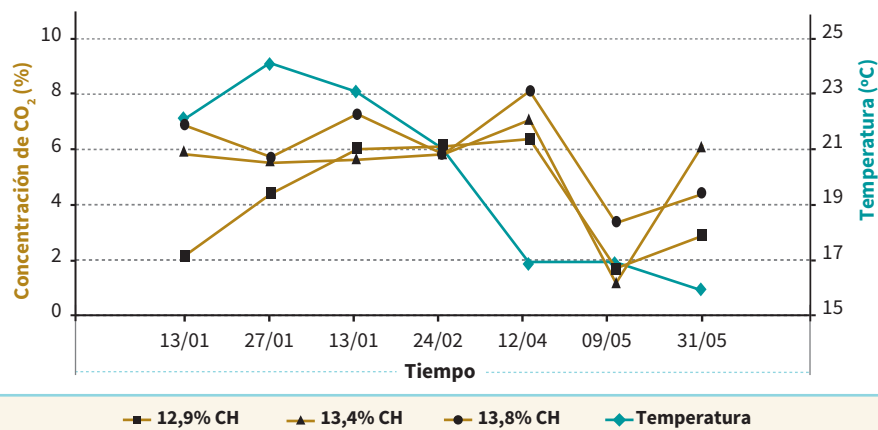
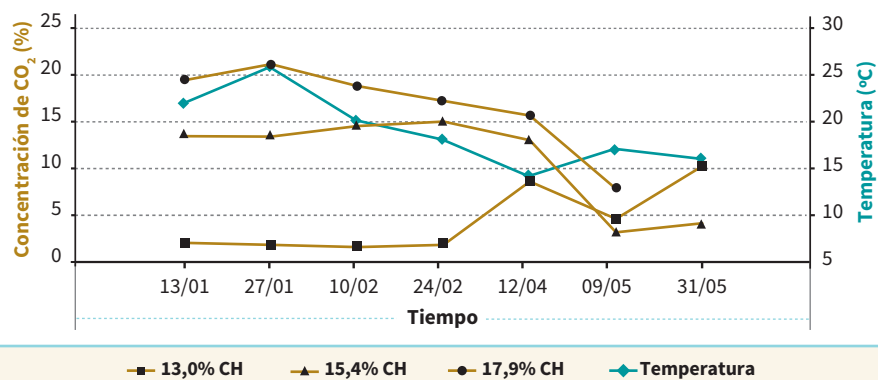


Figura 2.

Concentración de CO₂ (%) para los 3 puntos del silo bolsa B (B1 = 17,9% CH; B2 = 15,4% CH; y B3 = 13,0% CH) y temperatura (°C) durante el periodo de almacenamiento.

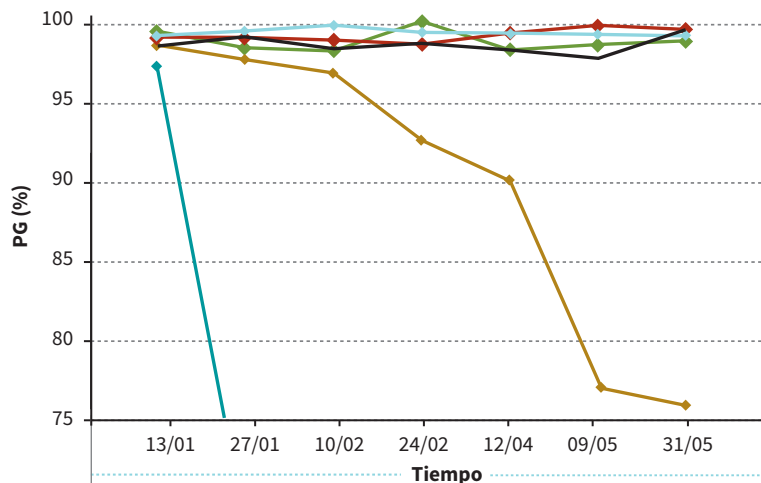


Para el rango de temperatura del grano observado en este estudio los valores de germinación son consistentes con las recomendaciones realizadas por Darby y Caddick (2007), quienes sugieren un tiempo seguro de almacenamiento de 6 a 9 meses para granos de cebada almacenados con un 13,0% a 14,0% CH, respectivamente (a 25,0 °C o menos). Estos autores también mencionaron que con una temperatura de 35,0 °C y CH de 14,0 %, el deterioro de la calidad se produce rápidamente.

En los puntos 1 y 2 del silo bolsa B (B1 y B2), con CH de 17,9% y 15,4%, respectivamente, los valores de germinación luego de 15 días de almacenamiento estuvieron por debajo del 98,0% (Figura 3). Durante el primer mes de almacenamiento la germinación en el punto B2 (CH de 15,4%) continuó con la tendencia decreciente, pero aún con valores superiores al 95,0%. Después del 10 de febrero se observó una rápida disminución de

Figura 3.

Poder germinativo (PG; %) para los 3 puntos del silo bolsa A (A1 = 13,8% CH; A2 = 13,4% CH y A3 = 12,9% CH) y del silo bolsa B (B1 = 17,9% CH; B2 = 15,4% CH y B3 = 13,0% CH) durante el tiempo de almacenamiento.



— 13,8% — 17,9% — 13,4% — 15,4% — 12,8% — 13%

la germinación, cayendo a 76,1% al finalizar el estudio. En el punto B1 (17,9% de CH) la germinación cayó a 30,0% luego del primer mes de almacenamiento. A fines de febrero, la germinación fue menor al 10,0% en ese punto.

Existió una correlación positiva entre la concentración de CO_2 y el CH del grano. Cuando el CH estuvo por debajo de 13,8% (silo bolsa A, y punto 3 del silo bolsa B) la concentración de CO_2 fue de aproximadamente 3,0 % a 8,0%. Cuando el CH del grano fue mayor, la concentración de CO_2 de ese punto del silo bolsa fue también mayor. Por ejemplo en el punto B1, con un CH de 17,9%, la concentración de CO_2 se elevó hasta 20,0%, mientras que en el punto B2, con un CH de 15,4%, la concentración de CO_2 fue de aproximadamente 15,0% (Figuras 1 y 2). Este resultado es consistente con los resultados obtenidos por Croce (2009) para silo bolsas con trigo a diferentes valores de CH.

La máxima concentración de CO_2 para cada sitio de muestreo se alcanza, en general, durante el primer mes de almacenamiento, cuando los valores de temperatura ambiente promedio son los más elevados. En el silo bolsa, la temperatura del grano es influenciada por la temperatura ambiente a lo largo de la temporada de almacenamiento (Bartosik et al., 2008 a). La cebada es almacenada al principio del verano, por lo tanto la temperatura máxima del grano se alcanza durante los primeros meses de almacenamiento. Durante el otoño, la temperatura del grano disminuye y por lo tanto disminuye la actividad biológica. La concentración de CO_2 medida en el silo bolsa es el resultado del balance entre la tasa de respiración (producción de CO_2), y la pérdida de CO_2 del silo bolsa por la permeabilidad del sistema a través de las perforaciones en la cobertura plástica o a través de la permeabilidad natural a los gases del material plástico. Esto explica la reducción en la

concentración de CO₂ medida en mayo, acompañando la disminución de la temperatura del grano. La misma relación entre la temperatura del grano y la concentración de CO₂ fue reportada por Croce (2009), quien observó una tendencia decreciente de la actividad biológica durante la temporada fría para trigo almacenado en silo bolsas. Esta tendencia fue más marcada con granos con CH a 13,0% o mayor.

Sin embargo, en el punto 3 del silo bolsa B (B3) existió un incremento de la actividad biológica luego de febrero, independizándose en cierta forma de la tendencia decreciente de la temperatura del grano (Figura 2). La concentración de CO₂ aumentó de 2,0% a aproximadamente 10,0%. Estos valores de actividad biológica no guardan relación con el CH (13,0%) ni con evolución decreciente en los valores de la temperatura del grano. Este aumento en la actividad biológica puede estar relacionado con la entrada de agua al sistema a través de perforaciones en el silo bolsa, lo que causa problemas de descomposición en ese lugar de la masa de granos. El incremento de CO₂ en otoño, como consecuencia de un deterioro sectorizado en la parte inferior del silo bolsa, fue también reportado por Massigoge et al. (2010) y Cardoso et al. (2010) para cebada seca almacenada en silo bolsas.

Bartosik et al. (2008 b) sugirió que el monitoreo de CO₂ puede ser usado como un indicador que permite anticipar problemas de descomposición en los silo bolsas. En este estudio, una relación entre la concentración de CO₂ y la calidad del grano podría ser establecida. Por un lado, en los puntos B1 y B2 (CH de 17,9% y 15,4%, respectivamente) existió una inmediata evidencia de actividad biológica, lo que resultó con una disminución substancial en la germinación. Durante todo el periodo de almacenamiento la concentración de CO₂ fluctuó entre el 13,0% y 20,0% en verano, y disminuyó a 5,0% - 10,0% en el otoño. Por otro lado, los lugares en donde el CH estuvo por debajo del 14,0% (A1 - A3 y B3) y la concentración de CO₂ fue de 2,0% a 7,0% al comienzo del almacenamiento, la germinación no disminuyó. Más aún, en el punto B3 existió un incremento de la concentración de CO₂ en mayo (Figura 2), pero no se observó efectos negativos en la germinación. Se puede reafirmar la hipótesis de que el incremento en la actividad biológica puede provenir de un área localizada en descomposición por entrada de agua a través de perforaciones, como fue explicado anteriormente. Esta masa localizada de granos en descomposición podría haber generado suficiente actividad biológica para afectar la concentración de CO₂ de ese sector, sin afectar la germinación de la cebada. Esto puede indicar que la evolución en la concentración de CO₂, en vez de lecturas aisladas, debería ser considerada cuando el CO₂ es usado como un parámetro de la calidad de almacenamiento. Entonces, si una única lectura de CO₂, tomada en un momento específico del almacenaje, es usada para estimar el riesgo de conservación de la cebada, el diagnóstico puede sobre o subestimar dicho riesgo.

Conclusiones

Estos resultados indican que, para los valores de temperatura registrados durante el verano en Argentina, no es seguro almacenar cebada con un CH por encima de 14,0%. Con un CH por debajo de 14,0%, la cebada puede ser almacenada en silo bolsas por 5 meses sin afectar la germinación. La medición de CO₂ es un indicador efectivo para detectar riesgo de descomposición del grano causado por excesivo CH o para detectar potenciales problemas derivados de filtraciones de agua en la bolsa durante el periodo de almacenamiento. Sin

embargo, la evolución de CO₂ debería ser usada como un indicador de descomposición durante el almacenamiento en lugar de una única lectura en un momento particular.

Referencias

- Agrositio. 2012. La producción de cebada cervecera fue la más alta en casi 90 años. Disponible en: <http://www.agrositio.com/vertext/vertext.asp?id=130914&se=3>. Accedido el 24 mayo 2012.
- Bartosik R.; Rodríguez J. y Cardoso L. 2008 a. Storage of corn, wheat, soybean and sunflower in hermetic plastic bags. En: Proceedings of the International Grain Quality and Technology Conference, 15 - 18 de julio, Chicago, IL, EE.UU.
- Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2008 b. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (Silo bags) using CO₂ monitoring, pp. 550-554. En: Guo D.L.; Navarro S.; Jian Y.; Cheng T.; Zuxun J.; Yue L.; Yang L. y Haipeng W. (Eds.). Proceedings of the 8th International Conference on Controlled Atmospheres and Fumigation in Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Cardoso L.; Ochandio D.; de la Torre D.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2010. Storage of quality malting barley in hermetic plastic bags, pp. 333-340. Proceedings of the International Working Conference on Stored Product Protection, 27 de junio -2 de julio, Julius Kühn-Institut, Berlín, Alemania Estoril, Portugal.
- Croce D. 2009. Concentración de CO₂ en el aire intersticial de trigo almacenado en bolsas plásticas herméticas. Tesis de Ingeniería Agronómica, Facultad Nacional de Ciencias Agrarias Balcarce, UNMDP, Balcarce, Argentina, 76 p.
- Darby J.A. y Caddick L.P. 2007. Review of grain harvest bag. CSIRO technical report. Disponible en: <http://www.csiro.au>. Accedido en enero del 2010.
- Massigoge J.; Bartosik R.; Rodríguez J.; Cardoso L. y Ochandio D. 2010. Storing of malting barley in plastics bags. En: Actas del Congreso CLIA-CONBEA 2010, 25 - 29 de julio, Vitoria, ES, Brasil.
- ISTA. 2008. International rules for seed testing. Bassersdorf, Switzerland, 1 ed., V. 5.
- Ochandio D.; Rodríguez J.; Rada E.; Cardoso L. y Bartosik R. 2009. Almacenamiento de cebada cervecera en bolsas plásticas herméticas, pp. 238. En: Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR, 1 - 4 de septiembre, Rosario, Argentina.
- Savio H. y Cattaneo M. 2008. Cebada cervecera, calidad comercial y su relación con la calidad Maltera. Disponible en: <http://www.cabcbue.com.ar>. Accedido en abril del 2009.

Almacenamiento de colza en silo bolsas herméticas

Darío Ochandio¹
Leandro Cardoso²
Ricardo Bartosik²
Diego de la Torre ²
Rodríguez Juan²
José Massigoge¹

Resumen

Debido al pequeño tamaño del grano, la colza o canola (*Brassica napus* o *Brassica campestris*) ofrece diferentes inconvenientes en la cosecha y en las subsiguientes operaciones de poscosecha. En Argentina, frecuentemente los productores no tienen suficiente capacidad de almacenamiento en sus instalaciones y superan este déficit mediante el uso de bolsas plásticas herméticas (silo bolsa). Los objetivos de este trabajo fueron: 1) determinar la factibilidad de los procesos de llenado (embolsado) y extracción de colza del silo bolsa, 2) monitorear la condición de la colza utilizando la medición periódica de la concentración dióxido de carbono (CO₂), la temperatura, el contenido de humedad (CH) y la calidad del grano. En la región sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, se confeccionó 1 silo bolsa de 30,0 toneladas de colza con un CH promedio del 6,0%. El periodo de almacenamiento se extendió desde noviembre de 2008 a noviembre de 2009. Las variables, medidas cada 2 semanas, fueron la concentración de CO₂, CH y parámetros de calidad del grano, tales como el contenido de materias extrañas, la acidez y el contenido de la materia grasa. La temperatura y humedad relativa del aire intersticial dentro de la bolsa y del ambiente externo también se registraron con una frecuencia de 1 hora. Se observó que, incluso dado el tamaño y las características del grano de colza, fue posible llevar a cabo las operaciones de embolsado y la extracción sin problemas. La humedad relativa del aire intersticial se mantuvo por debajo del 50% durante todo el periodo de almacenamiento. La temperatura del grano dentro de la bolsa se comportó de manera similar a la temperatura ambiente mensual promedio. La concentración de CO₂ varió de 1,0% a 8,0%, lo que indica una baja a moderada actividad biológica en la masa de granos. El CH, las materias

¹ EEA INTA Barrow, (Buenos Aires), Argentina

² EEA INTA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

extrañas y los valores de materia grasa se mantuvieron sin cambios durante todo el periodo de almacenamiento. La acidez de la materia grasa aumentó durante el almacenamiento en 0,7%, alcanzando un valor final de 1,4%, lo que no representa una pérdida de la calidad comercial. Se concluyó que, en las condiciones de temperatura y CH evaluados en este estudio, es posible almacenar colza en silo bolsa sin el deterioro de la calidad comercial.

Palabras clave: silo bolsa, concentración de CO₂, aire intersticial, contenido de humedad, acidez de la materia grasa.

Introducción

La colza (*Brassica campestris* o *Brassica napus*) es una oleaginosa ampliamente difundida en el mundo, que produce un aceite de calidad comestible excelente. La creciente demanda de aceites vegetales como fuente de energía renovable (biodiesel) transformó a la Unión Europea (UE) en el principal importador de soja, colza, girasol y aceite de palma en el 2006, siendo el aceite de colza el preferido para la elaboración de biodiesel. En Argentina, la provincia de Buenos Aires es el área de mayor difusión de la colza, con 14 mil has. La producción de este cultivo está limitada principalmente por la competencia con los cereales de invierno en el uso del suelo, y la producción de los cereales solía ser más rentable que la producción de colza. La falta de herbicidas selectivos que permitieran la eliminación del “nabo” (*B. napus*), una maleza ampliamente propagada que está estrechamente relacionada con la colza, es otro motivo por el cual se redujo su adopción en algunas áreas. Sin embargo, en la región cerealera argentina la colza constituye una alternativa de diversificación para enriquecer el esquema de rotación, especialmente en el sur de la provincia de Buenos Aires y la provincia de La Pampa. La colza se cosecha antes que el trigo permitiendo anticipar la siembra de soja un par de semanas; con esto se logran 2 cosechas por año en la misma tierra con mayor rendimiento que si sembrara soja luego de haber cosechado trigo (SAGPyA, 2010). Bajo este sistema de producción (doble cultivo), la combinación de colza - soja es más rentable que la combinación trigo - soja.

El aceite comestible obtenido a partir de la colza es uno de los más apreciados y demandados por su excelente calidad, y junto con el aceite de oliva, es considerado uno de los mejores para el consumo humano debido a su baja contribución en la formación de colesterol en la sangre. El mejoramiento genético en los últimos 40 años, principalmente en los cultivares canadienses, ha permitido aumentar la calidad de este aceite (SAGPyA, 2010).

Debido a su pequeño tamaño, el grano de colza ofrece diferentes dificultades en la cosecha y en las subsiguientes operaciones de poscosecha (Bartosik, 2008). Probablemente el factor que más afecte la calidad de la colza durante el almacenamiento es la condición con que el grano ingresa al almacenaje. La colza recientemente cosechada puede mantener altas tasas de respiración hasta por 6 semanas antes de tornarse quiescente. Este proceso comúnmente se denomina “transpiración” y constituye una condición muy inestable para la colza almacenada (Thomas, 1984). Durante esta etapa se requiere de un monitoreo constante, debido a que la intensa respiración del grano produce condiciones de calor y humedad que favorecen el desarrollo de hongos durante el almacenamiento. El crecimiento de los hongos a su vez produce más calor y humedad, y como consecuencia

de ello el grano de colza puede resultar dañado por el calor. El efecto de la “transpiración” puede minimizarse mediante el almacenamiento de la colza seca y fría.

Debido al pequeño tamaño del grano, es necesario revisar y reparar todos los orificios, grietas y fisuras de las instalaciones de almacenamiento, cosechadoras y equipos de transporte de granos.

Para los productores que no tienen estructuras permanentes para el almacenamiento de granos, el uso del silo bolsa es una alternativa en Argentina (Bartosik et al., 2008). Cada silo bolsa puede almacenar aproximadamente 200 toneladas de trigo (180,0 toneladas de soja) y con la maquinaria disponible en la actualidad, las operaciones de carga y descarga de grano son rápidas y sencillas. Estos silos bolsa son típicamente de 60,0 m de largo, 2,7 m de diámetro y están constituidos por un film de polietileno de 3 capas (blanco por fuera y negro por dentro) con 235 μm de espesor (Rodríguez et al., 2001 y 2002 a, b, c). Durante el almacenaje una atmósfera modificada se genera en el interior del silo bolsa, donde aumenta la concentración de CO_2 y la de O_2 disminuye.

El almacenamiento de colza en silos bolsa no ha sido documentado hasta este estudio. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) determinar la factibilidad de los procesos de embolsado y extracción de colza, 2) monitorear la condición de la colza utilizando la medición periódica de la concentración CO_2 , la temperatura, el contenido de humedad (CH) y la calidad del grano.

Materiales y métodos

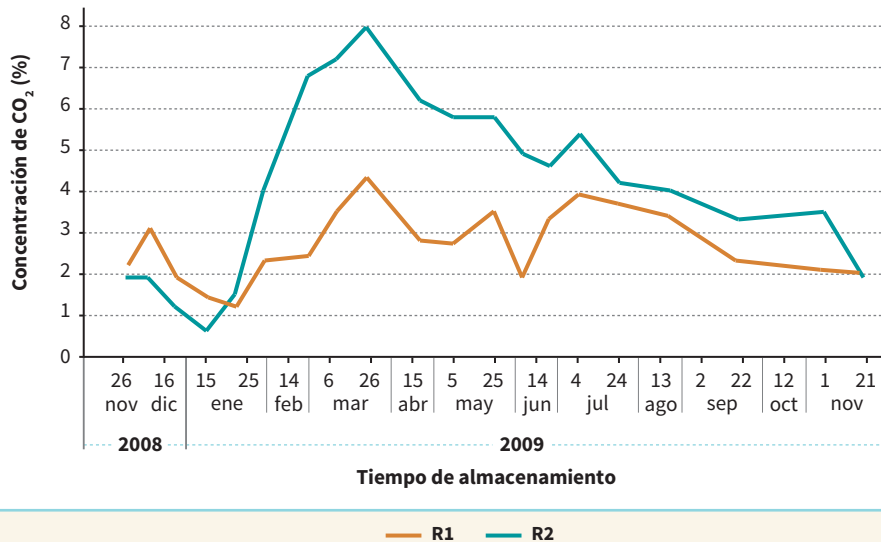
El ensayo se realizó en un establecimiento rural ubicado en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, donde 30,0 toneladas de colza fueron cosechadas y almacenadas en un silo bolsa. El ensayo comenzó inmediatamente después de la cosecha (25/11/2008) y se extendió hasta que el silo bolsa fue abierto para la venta del grano (23/11/2009). En el silo bolsa se establecieron 2 puntos de muestreo (R1 y R2), donde se determinó la concentración de CO_2 con un analizador portátil de gases (PBI Dan Sensor, CheckPoint, Dinamarca) en 3 niveles: en la parte superior de la bolsa, en la mitad de la altura de la bolsa y en la parte inferior de la misma. Además, se extrajeron muestras de grano para los análisis de calidad utilizando un calador sonda estándar. Después de cada extracción de muestra las perforaciones en polietileno del silo bolsa se sellaron con una cinta especial, con el fin de restablecer la hermeticidad. Este procedimiento de muestreo se repitió aproximadamente cada 2 semanas durante el periodo que duró el ensayo. Las muestras se llevaron al laboratorio para determinar su calidad comercial. Se analizó la cantidad de materias extrañas, CH, acidez y contenido de materia grasa según los procedimientos descritos en la Norma VII de comercialización de colza (SAGyP, 1994 a) y las metodologías indicadas por la Norma XXI de la SAGyP (1994 b). La temperatura y la humedad relativa (HR) del aire intergranario y del ambiente externo a la bolsa se registraron con la frecuencia de 1 hora, empleando 2 data loggers integrados por sensores de HR y temperatura, más un adquisidor de datos (Hobo, H8, pro series, Corporación Onset Computer). Para ello un data logger se colocó dentro del silo bolsa, en la zona central de la masa de granos, aproximadamente a 0,5 m de la superficie. El otro se colocó en el exterior del silo bolsa, protegido del efecto de la radiación solar mediante un cobertor plástico.

Resultados

A pesar del pequeño tamaño del grano y el bajo ángulo de reposo, las operaciones de embolsado y extracción de colza se llevaron a cabo sin problemas. Se registró una capacidad de almacenamiento es de 3,1 toneladas de colza por metro lineal de bolsa (similares a los de soja y maíz). El primer punto de muestreo (R1) alcanzó una concentración máxima de CO₂ de 4,3%, una mínima del 1,2% (Figura 1), con un promedio de 2,6% y una desviación estándar de 0,9%. En el segundo punto de muestreo (R2) se observó una concentración máxima de CO₂ de 8%, un mínima de 0,6% (Figura 1), un promedio del 3,8% y una desviación estándar de 2,2%.

Figura 1.

Evolución de la concentración de CO₂ (%) en 2 puntos de muestreo (R1 y R2) en el silo bolsa de colza.



El porcentaje de acidez de la materia grasa incrementó durante el almacenamiento desde 0,7% hasta 1,4% al final del tiempo de almacenamiento. El aumento de la acidez de la materia grasa se evidenció después de los 6 meses de almacenamiento, en el mes de mayo (Figura 3).

La Figura 4 muestra que el contenido de grasa se mantuvo constante en un rango de 44,5% y 45,0% durante el periodo de almacenamiento.

La Figura 5 muestra que el CH del grano de colza se mantuvo substancialmente constante durante el almacenamiento (entre 5,3 y 6,2%).

La temperatura del grano de colza en el momento de la cosecha fue de 37,0°C (a finales del mes de noviembre, a fin de la primavera). Durante el almacenamiento, la temperatura del grano disminuyó rápidamente acercándose a la media diaria del medio ambiente (25,0 °C). Durante el invierno disminuyó a 5,0 °C y después aumentó durante la primavera a casi 20,0 °C (Figura 6).

Figura 2.

Cantidad de materias extrañas (%) a lo largo del tiempo de almacenamiento en 2 puntos de muestreo (R1 y R2) del silo bolsa de colza.

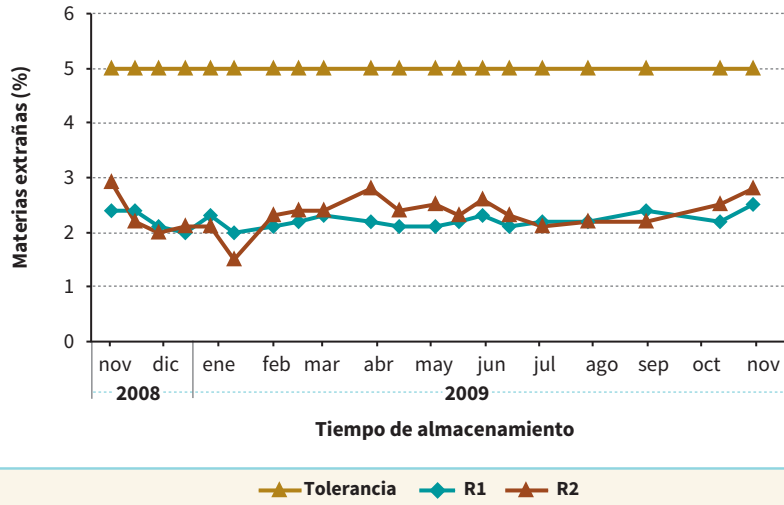
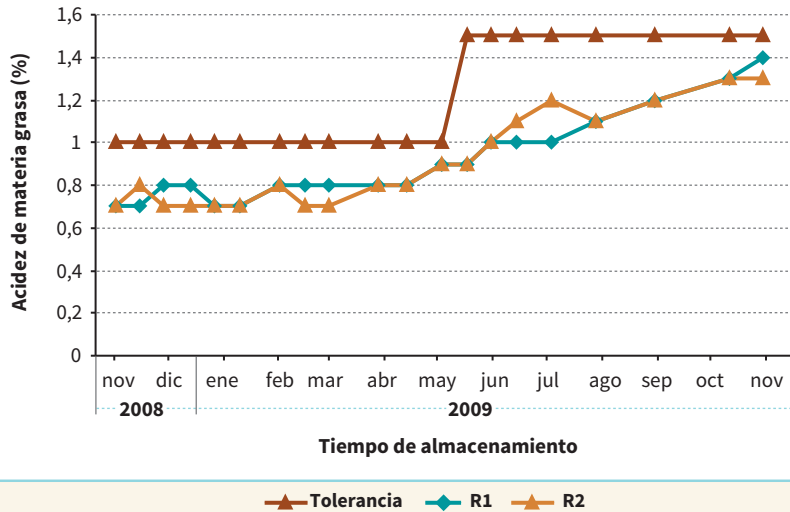


Figura 3.

Evolución en el tiempo de la acidez de la materia grasa (%), en 2 lugares de muestreo (R1 y R2) del silo bolsa de colza, y de su tolerancia (%) indicada por la norma de comercialización de colza.



Como se muestra en la Figura 7, la HR del aire intersticial se mantuvo entre el 40,0% y 50,0% durante todo el periodo de almacenamiento.

Figura 4.

Evolución en el tiempo del contenido de materia grasa (%), en 2 lugares de muestreo (R1 y R2) del silo bolsa de colza, y su tolerancia (%), indicada por la norma de comercialización de colza.

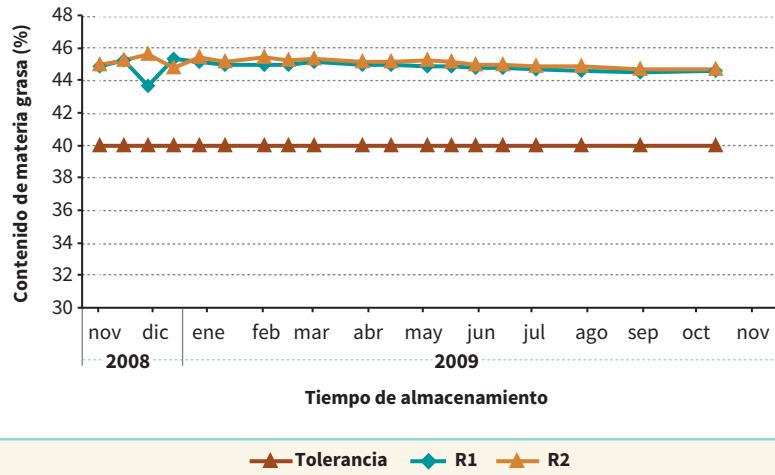


Figura 5.

Evolución en el tiempo del contenido de humedad (%), en 2 lugares de muestreo (R1 y R2) del silo bolsa de colza, y su tolerancia (%), indicada por la norma de comercialización de colza.

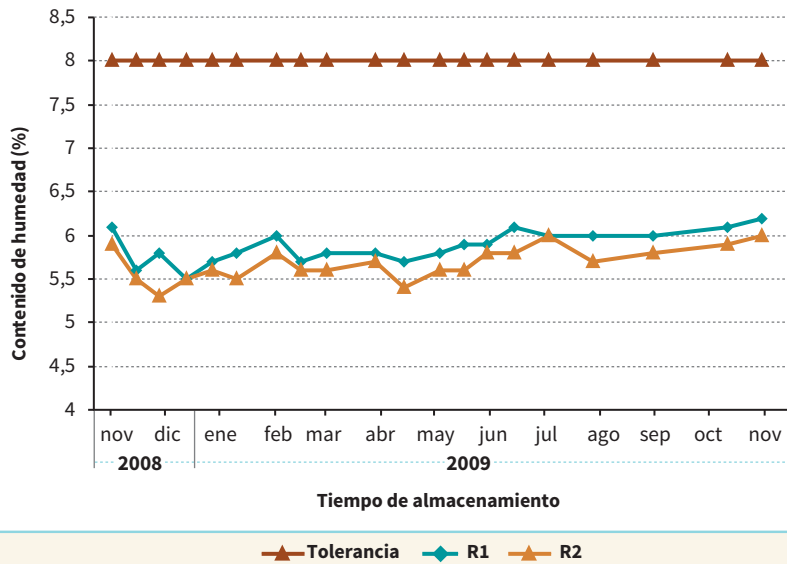


Figura 6.

Temperatura del grano en el interior del silo bolsa (°C) y temperatura ambiente en el exterior del silo bolsa (°C) durante el tiempo de almacenamiento.

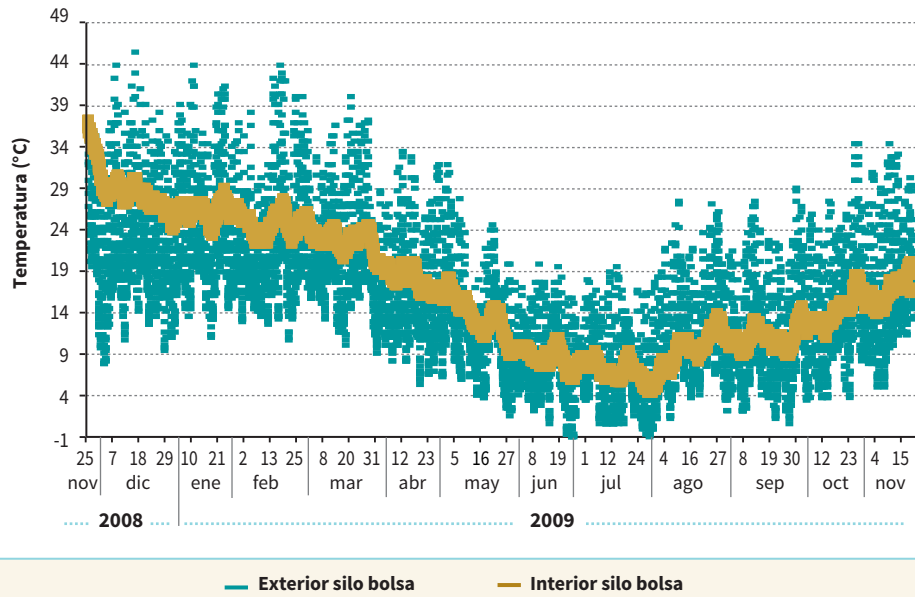
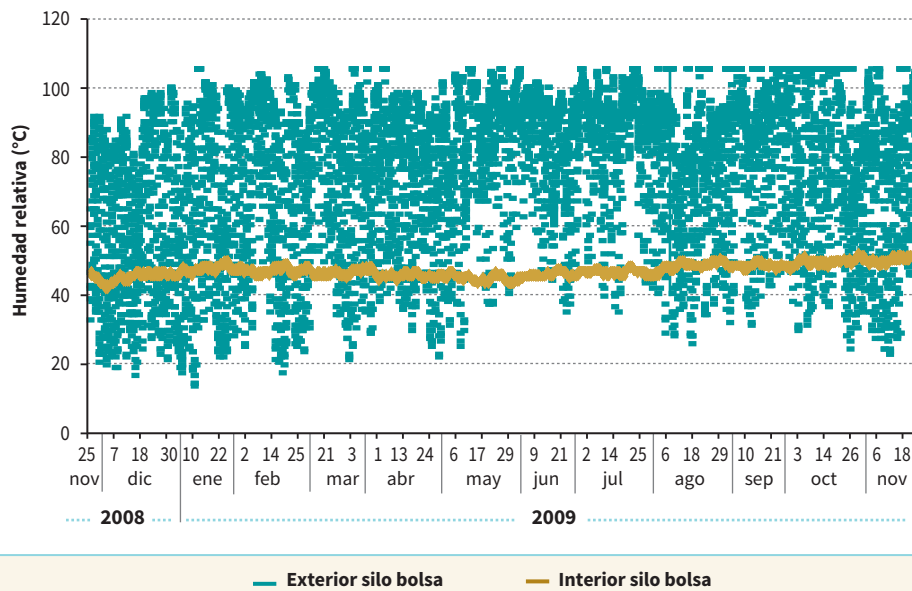


Figura 7.

La humedad relativa del aire intersticial en el interior del silo bolsa (%) y la del aire ambiente exterior del silo bolsa (%) durante el tiempo de almacenamiento.



Discusión

La concentración de CO₂ osciló entre 1,0% y 8,0%, lo cual indicó una baja a moderada actividad biológica en la masa de grano. La baja actividad biológica era previsible ya que el grano tenía un CH por debajo del límite de almacenamiento seguro de colza (8,0%). Estos valores de concentración de CO₂ concuerdan con los observados por Bartosik et al. (2008) y Rodríguez et al. (2002 a, b, c) para otros granos almacenados en silo bolsa (trigo, soja, girasol y maíz) en condiciones de almacenamiento seguro (seco y limpio). Además, estas concentraciones de CO₂ se corresponden con lo señalado por Darby y Caddick (2007) para la colza almacenada con los mismos niveles de CH y similares condiciones climáticas en Australia. En febrero y marzo, la concentración de CO₂ en el lugar de muestreo R2 aumentó de 1,5% a 8,0%. Este aumento de la actividad biológica pudo haber sido provocado por el ingreso de agua de lluvia a través de una perforación en la bolsa que permaneció sin sellar. Sin embargo, no se registró ningún problema con el grano almacenado en la bolsa. Inesperadamente, a medida que el tiempo de almacenamiento transcurrió, la concentración de CO₂ disminuyó al 2,0%. La hipótesis más probable indica que penetró agua en la bolsa mojando una pequeña proporción de grano, lo que provocó el aumento de la actividad biológica. Durante el tiempo de almacenamiento, la humedad localizada se esparció lentamente por movimientos de difusión y convección de aire por el resto de la masa de grano, disipándose del lugar que produjo el aumento de la actividad biológica.

La concentración de materias extrañas se mantuvo siempre por debajo del 3,0%, que es la tolerancia establecida por la norma de comercialización de colza en Argentina (SAGPyA, 1994 a). No se esperaba que este parámetro pudiese cambiar durante el almacenamiento, pero es importante establecerlo para garantizar que la operación de embolsado no aumente sustancialmente la presencia de materias extrañas, ni dañe al grano. La acidez de la materia grasa también se mantuvo por debajo del límite máximo para comercialización. La norma establece como tolerancia 1,0% de acidez de la materia grasa, desde el momento de la cosecha hasta mayo inclusive, mientras que las muestras estaban por debajo de 0,8%. Después de mayo, el límite permitido aumenta a 1,5%, mientras que las muestras tenían un máximo de 1,4% en noviembre, 1 año después de la cosecha. El cambio en la acidez de la materia grasa en la colza observada en este estudio fue similar a lo observado por Rodríguez et al. (2001) para las semillas de girasol (8,4% CH) almacenadas en silo bolsas, el cual pasó de 0,9% a 1,4% después de 160 días de almacenamiento.

El contenido de materia grasa se mantuvo sin cambios y por encima del límite mínimo (40,0%) establecido en la norma de comercialización de colza (SAGPyA, 1994 a). Posiblemente existe una relación entre, la conservación del contenido de materia grasa, con la baja actividad biológica observada en el silo bolsa. Los resultados de la evolución del CH coinciden con estudios anteriores (Bartosik et al., 2008; Rodríguez et al., 2002; Ochandio, 2008), indicando que el promedio del CH del grano no cambia durante el almacenamiento en silo bolsa.

La HR (45,0%) del aire intersticial fue esperada de la colza a un 6,0% CH. Dado que el CH del grano no cambia sustancialmente durante el almacenamiento, se esperaba también que la HR de equilibrio se mantuviese relativamente constante.

La temperatura del grano sigue la variación de la temperatura ambiente promedio mensual, de acuerdo a los resultados encontrados por Bartosik et al. (2008). La temperatura tuvo un mínimo de 4,6 °C en el invierno, a finales de junio, y comenzó a subir durante

la primavera, influenciado por el aumento de la temperatura del aire exterior. Además, se ha demostrado también que el centro de la masa de grano no sufrió la oscilación térmica diaria que puede ser observada en la temperatura del aire ambiente.

En este estudio se concluye que, a pesar del pequeño tamaño y las características especiales del grano de colza, fue posible llevar a cabo las operaciones de embolsado y la extracción del grano sin problemas. Bajo las condiciones de temperatura y CH de grano evaluados, es posible almacenar colza en silo bolsas sin deterioro de la calidad comercial por un periodo de tiempo relativamente largo (1 año de almacenamiento).

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la familia Ribner por facilitar su establecimiento agropecuario, granos de colza y logística para la confección y extracción del silo bolsa utilizado en este estudio. Un agradecimiento especial a Leandro Cambareri por ayudar con la recolección de datos. Gracias al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y las empresas de fabricación de silo bolsas (IPESA y Plastar) por el apoyo financiero de este estudio.

Referencias

- Bartosik R. 2008. Manejo en la poscosecha de colza/canola. Disponible en: <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/postcosecha/manejoPoscosechaColzaCanola.pdf>. Accedido en Octubre del 2009.
- Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2008. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Darby J.A. y Caddick L.P. 2007. Review of grain harvest bag technology under Australian conditions. CSIRO Entomology. Technical Report – N°. 105.
- Ochandio D. 2008. Factores que afectan la concentración de CO₂ de soja almacenada en bolsas plásticas herméticas. Tesis de Ing. Agr. Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ciencias Agrarias, Unidad Integrada Balcarce Argentina, 61 p.
- Rodríguez J.C.; Bartosik R.E. y Malinarich H.D. 2001. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: Sistema *silo bag*. Informe final de trigo. Fundación ArgenINTA. Disponible en: www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/silobag.htm. Accedido en Octubre del 2009.
- Rodríguez J.C.; Bartosik R.E.; Malinarich H.D.; Exilart J.P. y Nolasco M.E. 2002 a. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: Sistema *silo bag*. Informe final de girasol. Fundación ArgenINTA. Disponible en: www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/silobag.htm. Accedido en Octubre del 2009.
- Rodríguez J.C.; Bartosik R.E.; Malinarich H.D.; Exilart J.P. y Nolasco M.E. 2002 b. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: Sistema *silo bag*. Informe final de maíz.

Fundación ArgenINTA. Disponible en: www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/silobag.htm. Accedido en Octubre del 2009.

- Rodríguez J.C.; Bartosik R.E; Malinarich H.D.; Exilart J.P. y Nolasco, M.E. 2002 c. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: Sistema *silobag*. Informe final de soja. Fundación ArgenINTA. Disponible en: www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/silobag.htm. Accedido en Octubre del 2009.
- SAGPyA. 1994a. Norma VII: Comercialización de colza. Resolución N° S.A.G. y P. 1075 /94. Disponible en: <http://www.recibidoresgranosba.com.ar/descargas/norma26-metodologias-varias.pdf>. Accedido en Octubre del 2009.
- SAGPyA. 1994b. Norma XXVI: Metodologías varias. Resolución N° S.A.G. y P. 1075 /94. Disponible en: <http://www.bcr.com.ar/pagcentrales/laboratorio/normas.asp>. Accedido en Octubre del 2009.
- SAGPyA. 2010. Colza informe general. Disponible en: <http://www.sagpya.gov.ar/new/0/agricultura/otros/estimaciones/colza/infcolza.php>. Accedido en Octubre del 2009.
- Thomas P.M. 1984. Swathing- combining, storage and conditioning of canola. En: Canola Growers Manual. Canola Council of Canada, Winnipeg, Manitoba, pp. 1101 - 1215.

Silo bolsa de poroto. Concentración de dióxido de carbono en relación a las condiciones de almacenamiento

Adriana Godoy¹

Introducción

El poroto tiene como destino final el consumo humano directo, por lo que es importante que durante las operaciones de poscosecha no se produzca daño mecánico en el grano. No fue hasta el año 2007 que el silo bolsa comenzó a utilizarse para el almacenamiento de poroto en Argentina. Estimaciones del INTA indican que en Salta y Jujuy, principales provincias productoras de poroto, se almacena en silo bolsa apenas el 8,0% de la producción, lo que representó en la campaña 2009 alrededor de 22 mil toneladas.

Este retraso en la utilización del silo bolsa, respecto a otros granos producidos en Argentina, en parte se debió a que la maquinaria utilizada en operaciones de embolsado y extracción, en general utiliza uno o más tornillos sinfín para transportar el grano. El sinfín puede producir daño mecánico y partido del grano, sobre todo porque el poroto se cosecha con bajo contenido de humedad (CH; alrededor de 12,0%) (De Simone y Godoy, 2006). Actualmente se cuenta con la disponibilidad de embolsadoras que no poseen sinfín, con lo cual se reduce significativamente el porcentaje de grano partido (inferior a 0,5%) (Godoy y De Simone, 2010).

El desarrollo de máquinas extractoras de grano que carezcan de sinfín (cubierto o encamisado) se ha demorado más que las embolsadoras. Actualmente existen algunos implementos en desarrollo basados fundamentalmente en el transporte del grano con sinfines desnudos y cangilones con porcentajes de partido de 0,3% y de 2,0%, respectivamente (Godoy y De Simone, 2010).

Experiencias realizadas por el INTA Salta desde el año 2007 demuestran que este sistema de almacenamiento se puede incorporar al manejo de poroto en la poscosecha. Es posible almacenar sin riesgo poroto sano, seco y limpio 150 días sin pérdidas de calidad. El poder germinativo (PG) no sufre grandes variaciones por 150 días, mientras que el parámetro más afectado a partir de allí es la reabsorción de agua durante la cocción (De Simone et al., 2009 a y b).

Ensayos donde se tomaron bolsas de polipropileno (las más comunes empleadas en las estivas en galpones) como testigo o patrón de comparación, evidenciaron un deterioro más rápido y acentuado en éstas que en silo bolsa, a iguales condiciones de almacenamiento (Tabla 1). El mismo efecto, pero más agravado, se observó cuando se almacenaron granos húmedos y dañados comparados con granos secos (alrededor de 12,0% CH) y sanos (De Simone et al., 2009 a).

¹INTA EEA Cerrillos (Salta), Argentina.

Tabla 1.

Riesgo durante el almacenamiento en relación al tiempo. De Simone et al. (2009 a y b).

TIPO DE ENVASE Y CONTENIDO DE HUMEDAD (CH %)	RIESGO BAJO	RIESGO MEDIO	RIESGO ALTO
Bolsa polipropileno 12,0% CH	100 días	150 días	
Silo bolsa 12,0% CH	100 días	150 días	
Silo bolsa 16,0% CH	60 días	100 días	150 días
Silo bolsa 18,0% CH	No hay	50 días	100 días

Si bien aún no se estudió en profundidad, de la práctica se observó un efecto negativo en la calidad (incremento acentuado del deterioro) con el aumento de la proporción de materias extrañas (tierra, terrones, restos de vainas, tallos e insectos, etc.) embolsadas junto con el granel y originadas en la cosecha.

El silo bolsa es impermeable al paso del agua y tiene un alto grado de hermeticidad a los gases. Durante el almacenaje se forma una atmósfera automodificada, con una disminución del contenido de oxígeno (O_2) y un aumento concentración de dióxido de carbono (CO_2), respecto a los valores típicos de la atmósfera (con 21,0% de O_2 y 0,03% de CO_2). Los organismos vivos que están en el granel (granos, insectos y hongos) son los respiran produciendo este cambio. Por ejemplo, durante el almacenaje la concentración de CO_2 podría aumentar (de 0,03%) a 5,0%, y la concentración de O_2 disminuir (21%) a 15,0 - 16,0% (Bartosik et al., 2009 a).

La manera en que se modifican estas concentraciones se puede relacionar con la actividad biológica en el interior del silo bolsa y permite emplear la medición de CO_2 como técnica de monitoreo para detectar problemas tempranos de almacenaje (granos dañados) (Bartosik et al., 2009 a y b; Cardoso et al., 2009).

Las concentraciones típicas de CO_2 para condiciones de almacenaje segura y riesgosa fueron determinadas para diferentes tipos de granos (Bartosik et al., 2009 b). Estos valores son útiles para implementar este sistema de monitoreo, y hasta el momento no se han establecido para poroto almacenado en silo bolsa.

Objetivo

Establecer valores de la concentración de dióxido de carbono que puedan emplearse como referencia del nivel de riesgo de deterioro, en relación a la condición de almacenamiento del grano.

Materiales y métodos

Se evaluaron 4 silo bolsas (bolsas N° 4A, N° 5, N° 7 y N° 15) armadas entre el 1 y el 3 de setiembre de 2009 en la planta ALIMAR S.A., localidad General Güemes, provincia de Salta. Las características de las mismas se resumen en la Tabla 2.

Se efectuó un monitoreo mensual iniciado el 12 de diciembre de 2009 y finalizado el 5 de marzo de 2010. Dicho monitoreo se basó en la medición de CO_2 a través de un dispositivo portátil de industria nacional (Silcheck). Asimismo se extrajeron muestras de grano

de los puntos que mostraban el máximo, el mínimo y el valor promedio de CO₂ de cada bolsa para determinar CH de los granos (en estufa, norma ASAE S352 1996 a) y poder germinativo (PG). A través de estos parámetros se evaluó la evolución de la calidad del grano. En los casos que se consideró necesario, se analizaron las muestras a nivel sanitario en el Laboratorio de Fitopatología de INTA EEA Salta.

Tabla 2.

Características de los silo bolsas evaluados.

Nº SILO BOLSA	FECHA DE ARMADO	CAPACIDAD ALMACENADA (t)	GRAMAJE	CAÍDA TOTAL* (%)
4	20/07/09	97,8	187,0	37,0
5	20/07/09	150,9	244,0	34,4
7	02/09/09	144,6	263,0	36,0
15	26/09/09	166,4	219,0	60,6

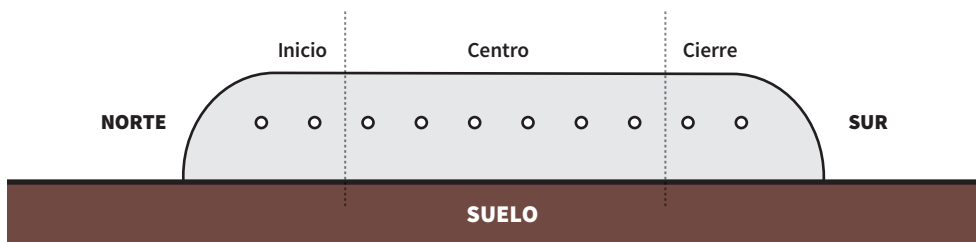
*Ítem que hace referencia a la proporción de granos manchados, partidos, con la testa dañada, aquellos granos pequeños fuera de gramaje que pasan por una zaranda de 4,5 mm y a la proporción de materias extrañas (SAGPyA - Norma XVI, 1994)

De las experiencias desarrolladas se conoce que el CO₂ se encuentra en distintas proporciones a largo del silo bolsa, es decir que el mismo presenta una difusión limitada en el sentido longitudinal. Si se toman puntos separados, por ejemplo a 6,0 metros de distancia, se obtendrán valores distintos de CO₂ en caso de que la condición del grano sea desuniforme.

Por esta razón se dividió al silo bolsa en 10 partes iguales a lo largo, y de cada una de ellas se tomó una medición de CO₂ a la altura del pecho del operario. Para la medición se introduce la aguja hipodérmica atravesando el polietileno de la bolsa. Entonces, el instrumento, mediante una bomba interna, toma una muestra del aire del interior de la bolsa y se detiene automáticamente cuando alcanzó el nivel de CO₂ en ese punto de medición.

Figura 1.

DETALLE DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE CO₂ A LO LARGO DEL SILO BOLSA



Resultados y discusión

Al efectuar mediciones de la concentración de CO₂ surgieron valores generalizados por debajo de 5,0% en las bolsas correctamente armadas: sobre superficies regulares con

cierta pendiente que evitaba el anegamiento, reparadas en tiempo y forma, con grano limpio; tal es el caso de las bolsas N° 4 y N° 5 (Figura 2). En estos silo bolsas, la evolución de la concentración de CO₂ fue progresiva y mostró pequeñas variaciones en el período de almacenamiento. El CH del grano prácticamente se mantuvo constante, lo cual coincide con lo estudiado por Cardoso et al., 2009. Allí, los valores de PG se mantuvieron por encima de los límites aceptables (PG > 75,0%) hasta los 100 días de almacenamiento. A partir de allí el PG comenzó a disminuir, hecho que coincide con el incremento de la concentración de CO₂, cuando se superaron los 180 días de almacenaje.

La bolsa N° 4 permitió observar el efecto negativo de una rotura que favoreció la entrada de agua (Figura 2). Como consecuencia, el CH del grano mostró un incremento de 9,6% a 10,3% (es decir de 0,7%). En consecuencia, la concentración de CO₂ en el sector afectado pasó de ser la más baja del silo bolsa, al inicio del ensayo, a presentar los valores más altos al final del almacenamiento.

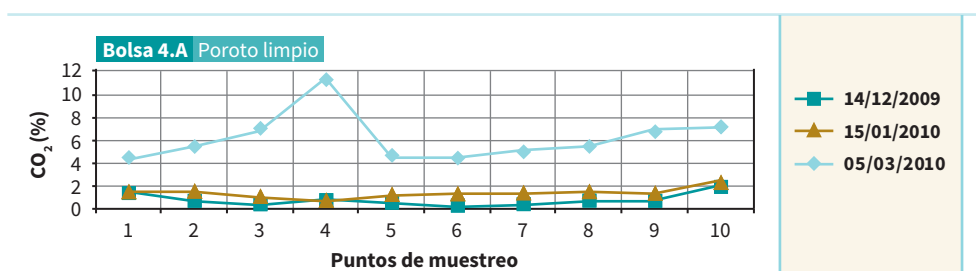
En la bolsa N° 7, donde se almacenó poroto con alto grado de impurezas (casi 30,0%, tal como fue cosechado y sin previo proceso de limpieza), los niveles de CO₂ se incrementaron notablemente (Figura 3). A los 102 y 133 días (14/12/09 y 15/01/10 respectivamente) aparecieron valores superiores a 5,0% de CO₂ (en algunos puntos mayores a 10,0%). Así mismo, durante este lapso de tiempo se observó una tendencia decreciente del PG, que alcanzó valores inferiores a 50,0% (datos no mostrados). A los 182 días de almacenaje, todos los registros de CO₂ superaron los valores observados a los 133 días, para alcanzar 21,0%. Esta elevada actividad biológica coincidió con la aparición de moho sobre los granos, incluso en menos tiempo de almacenamiento que en los silo bolsas con poroto limpio. Este comportamiento es similar a lo reportado por De Simone et al. (2009 a y b), quienes evidenciaron deterioro del poroto en períodos de tiempo semejantes.

Estos valores elevados de CO₂ estarían relacionados fundamentalmente con el alto contenido de impurezas. Además de tierra, también se separaron restos de vainas, tallos de poroto y otras plantas con diferentes tenores de humedad, así como también semillas de malezas. Análisis efectuados en el Laboratorio de Fitopatología de INTA Salta revelaron la presencia de hongos de almacenamiento y de suelo (tal es el caso de *Rhizoctonia sp.*) en muestras extraídas de puntos que llamamos “críticos” (donde se midieron elevadas concentraciones de CO₂).

La bolsa N° 15 permitió estudiar el efecto de un cierre ineficiente. En la misma se presentó un abrupto incremento de la concentración de CO₂, justamente en esa porción de

Figura 2.

Concentración de CO₂ (%) de poroto limpio a lo largo del período de almacenamiento (bolsa N°4).



Nota: en el punto 4 se produjo una rotura que permitió el ingreso de agua, se registró un incremento en el CH del grano de 9,6% a 10,3%.

Figura 3.

Concentración de CO₂ (%) de poroto con alto grado de impurezas a lo largo del período de almacenamiento (bolsa N°7).

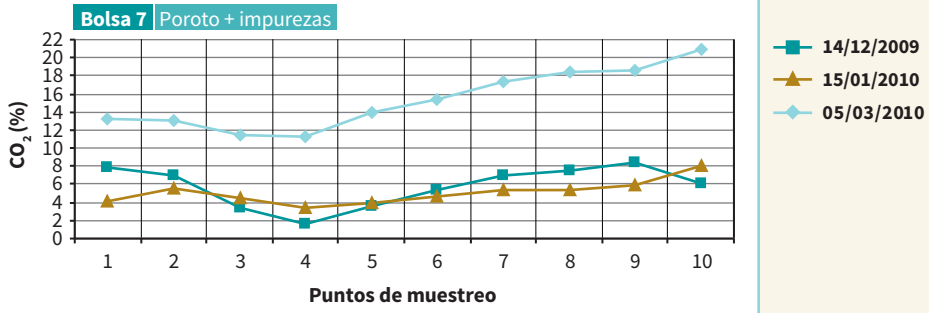
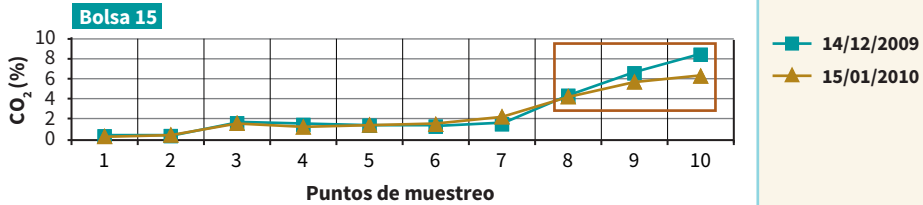


Figura 4.

Incremento de la concentración de CO₂ (%) hacia el cierre del silo bolsa (bolsa N° 15).

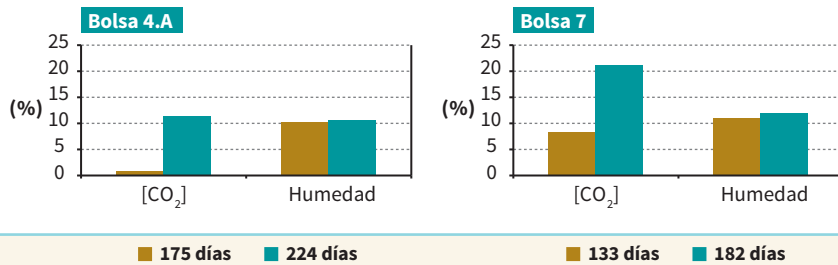


la bolsa, para todas las fechas de observación (Figura 4), acompañado de mayores CH del grano. Se estima que el anegamiento del silo bolsa en el período estival fue determinante de esta condición.

De lo evidenciado en los silo bolsas N°4, N°7 y N°15, se podría inferir que pequeños incrementos en el CH del grano estarían relacionados con grandes incrementos en la concentración de CO₂ medida, tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 5.

Incrementos de la concentración de CO₂ (%) y de la humedad del grano en los últimos 49 días de almacenamiento en silo bolsa. Izquierda: silo bolsa N° 4 - derecha: silo bolsa N° 7.



De acuerdo con lo observado se debe poner especial atención en resolver los principales problemas para evitar los riesgos de deterioro antes mencionados:

- **Armado del silo bolsa con alto grado de impurezas:** tal como se dijo anteriormente esto genera la predisposición del deterioro del grano por sumar humedad e incrementar la actividad biológica del granel.



Figura 6.
Muestra extraída de un silo bolsa de poroto con alto grado de impurezas.

- **Cierre del silo bolsa:** este constituye el problema más común y serio pues altera gravemente el grado de hermeticidad y con ello la concentración relativa de los gases. Favorece la entrada de agua (proliferación de hongos) y la acción de insectos y animales.

Se observan a menudo en el campo las siguientes formas incorrectas de cerrar:

- Nudos con alambre o hilo sisal.
- Enroscado y tapado con piedras.
- Enroscado y tapado con tarimas o palets de madera.

- **Roturas sin recomponer.**
- **Armado en zonas bajas.**
- **Armado sobre superficies irregulares.**



Figura 7.
Cierre defectuoso de silo bolsa.



Figura 8.
Silo bolsa de poroto anegada. Se observa a la derecha el sinfín a cinta empleado para el desarmado de la bolsa.



Figura 9.
Superficie con piedras y terreno desuniforme, incluso anegado.



Figura 10.
Desarmado manual de silo bolsa de poroto, se observa una costra inferior de grano humedecido por roturas en la base de la bolsa.

Conclusiones

La calidad final del poroto almacenado en silo bolsa depende de las características compositivas del granel.

La medición de CO₂ es un indicador de la actividad biológica en el silo bolsa de poroto y se relaciona con la evolución de la calidad del grano.

El poroto almacenado en silo bolsa con alto grado de impurezas es sometido a un deterioro más acelerado que aquél ocurrido en bolsas con poroto limpio.

Se pueden establecer los siguientes valores de referencia de CO₂ para el poroto:

Normal hasta 5,0% (12,0% CH) - entre 5,0 y 8,0% se presentan condiciones inseguras de almacenamiento - más de 8,0% representa una condición de riesgo de almacenaje.

Recomendaciones para futuros trabajos

Es preciso profundizar el análisis del efecto del material extraño sobre el deterioro del grano de poroto almacenado en silo bolsa.

Agradecimientos

A la empresa ALIMAR S.A.

Al Sr. Eduardo Martín y al CPN Marcelo Camacho por la atención brindada.

A los Sres. Roberto Mendoza y Rubén Martínez por su buena predisposición y por brindarnos toda la información necesaria.

Referencias

- ASAE. 1996. Norma ASAE S352 1996 a - determinación de humedad de granos.
- Bartosik R.; Rodríguez J.C.; Malinarich H. y Cardoso L. 2009 a. Almacenaje de maíz, trigo, soja y girasol en bolsas plásticas herméticas, pp. 2 - 14. En: Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Bartosik R.; Cardoso L.; Ochandio D. y Croce D. 2009 b. Detección temprana de procesos de descomposición de granos almacenados en bolsas de plástico herméticas mediante la medición de CO₂, pp. 15 - 21. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Cardoso L., Bartosik R. y Rodríguez J. C. (2009) Estudio de la evolución de la humedad de los granos individuales en bolsas plásticas de maíz y soja, pp. 23 - 33. En: Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA I.S.S.N. 1667 - 9199
- De Simone M.E. y Godoy A.I. 2006. Sistema de recolección directa, pp. 23, 48 - 50. En: Poroto: Eficiencia de cosecha y postcosecha, PRECOP, manual técnico N°4. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. I.S.S.N. 1667 - 9199.
- De Simone M.E.; Fili J.M. y Godoy A.I. 2009 a. Almacenamiento de poroto (*Phaseolus vulgaris* L.) en bolsas plásticas con relación al contenido de humedad inicial,

deterioro de los granos y el tiempo, pp. 162 - 168. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina ,180 p.

- De Simone M.E. y Godoy A. 2009 b. Evaluación del efecto de media sombra en la calidad del poroto almacenado en bolsas plásticas con sistema de embolsado por gravedad, pp. 169 - 180. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina ,180 p.
- Godoy A.I. y De Simone M.E. 2010. Almacenamiento de poroto en bolsas plásticas. Actualización técnica N° 53. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 12 p.
- SAGPyA.1994. Norma de poroto blanco seleccionado oval y alubia. Norma XVI - anexo A, Resolución 1075/94.

Conservación de arroz en silo bolsas. Una década de investigación en Argentina

Ramón Hidalgo¹
Oscar Pozzolo²

Resumen

El INTA y la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste investigan desde hace 10 años el sistema de conservación de arroz en silo bolsas. Se han desarrollado y probado con éxito metodologías que actualmente adoptan técnicos y productores, en el ámbito nacional e internacional, para mitigar problemas de almacenamiento. Se trabajó principalmente sobre 4 aspectos: 1) suministrar pautas para una conservación segura de arroz en silo bolsa, 2) proporcionar herramientas para un monitoreo efectivo del silo bolsa, 3) desarrollar, utilizando el silo bolsa, una estrategia de secado de arroz para aumentar la eficiencia de dicho proceso, 4) evaluar al tornillo sinfín (o tornillo de Arquímedes), utilizado para la confección y extracción de los silo bolsas, respecto al daño mecánico de los granos. Se determinó que el arroz base cámara (contenido de humedad (CH) del 13,0%) se puede conservar aproximadamente por 1 año sin problemas de pérdida de calidad. El grano de arroz con 16,0% de CH se puede conservar hasta 4 meses. Con hasta 20,0% de CH es posible almacenarlo en silo bolsa por 40 días sin pérdidas de calidad, extremando las inspecciones. Respecto a las herramientas de control, se demostró que el análisis de granos manchados es una práctica de fácil adopción y un adecuado indicador del estado general del grano. En comparación, el análisis de grano manchado es más eficiente que la medición de CO₂, parámetro utilizado para monitoreo en otros granos. En relación al histórico problema de déficit en la capacidad de secado, se propuso realizar un secado diferencial combinándolo con la técnica de “tempering” o “temperado”, utilizando el silo bolsa a modo de silo buffer. Utilizando un secado gradual se logró aumentar más del 40,0%, en promedio, la capacidad de secado. Mediante el temperado se pudo mejorar la calidad del grano, ya que incrementó el porcentaje de grano entero. Además existieron otros beneficios, como la eliminación de picos de trabajo en la secadora y un menor consumo de combustible al disminuir el tiempo total de secado. Respecto a los implementos equipados con tornillos de Arquímedes o sinfines, se observó que el desgaste de la espira del sinfín produce importantes daños en el grano, pudiendo llegar a valores superiores al 6,0% de grano quebrado. También se detectó que el diseño del sinfín en la máquina embolsadora tiene incidencia en la rotura de los granos, comportándose mejor el sinfín corto y horizontal, que el sinfín largo e inclinado. Estos desarrollos, transferidos al medio, han colocado a Argentina en

¹Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE (Corrientes) Argentina.

²Instituto de Ingeniería Rural - INTA Castelar (Buenos Aires) Argentina.

una posición de liderazgo en información respecto a la conservación de arroz en silo bolsa.

Palabras clave: embolsadora, extractora, contenido de humedad, granos manchados, daño mecánico, tempering, Argentina.

Introducción

El incremento de la producción granaria en Argentina ocasionó limitantes en la capacidad de almacenamiento (Aposgran, 2005). Esto generó ineficiencias en la poscosecha de granos e incidió negativamente en la rentabilidad de la empresa agropecuaria. Actualmente, el sector productivo pudo solucionar parcialmente la falta de infraestructura para el almacenamiento de los granos mediante el uso de silo bolsas. Según estudios realizados por Casini y Rodríguez (2005) señalan que, en la campaña 2004/05, en el país se conservaron más de un 20,0% del total de granos producidos mediante este sistema. En la campaña 2006/07 la producción nacional fue de 95,0 millones de toneladas, solamente de trigo, soja, maíz y girasol; con un total de capacidad de almacenaje permanente estimada en 65,0 - 75,0 millones de toneladas (SAGPyA, 2007). Debido a esta insuficiente capacidad de almacenamiento, una parte importante de la producción de granos de la Argentina debe ser directamente entregada a los acopiadores, y de allí a los puertos (PRECOP, 2007).

Para superar estas circunstancias desfavorables, los productores de grano comenzaron a aumentar la capacidad de almacenaje en campo, para tener la oportunidad de comercializar el grano fuera de la temporada de cosecha. En este momento, el precio es usualmente más alto y los costos de servicio son menores. Otra de las principales causas de la adopción del silo bolsa es su bajo costo de inversión (Rodríguez et al., 2002) que se contrapone a la alta inversión económica requerida por los sistemas de estructuras rígidas (silos, celdas, etc.). Estos factores han jugado un rol fundamental en la generalización del uso de silo bolsas. Bartosik et al. (2009 a) indican que durante el año 2007 fueron almacenadas en silo bolsas alrededor de 35,0 millones de toneladas de granos, incluyendo soja, maíz, maíz pisingallo, trigo, girasol, cebada cervecera, arroz, sorgo y algodón.

En arroz, a principios del año 2000 se comenzó a estudiar el comportamiento de esta tecnología. Los primeros resultados indicaron que, en términos generales, las pautas básicas de conservación determinadas para granos como maíz, soja y trigo se podían aplicar a la conservación del arroz, con los ajustes propios del cultivo. Dichos ajustes refieren a que es un grano cosechado con alto contenido de humedad (CH) y con importantes castigos en la comercialización, en rubros como grano quebrado y grano manchado. Lo cual, sumado al efecto de su procesamiento industrial, provocan que el número de variables en estudio sobre el producto final, fuera superior al de los cultivos tradicionales (Hidalgo et al., 2006 a).

Aspectos relacionados a la confección del silo bolsa, en particular aquellos que potencialmente podían causar roturas de grano (tales como desgaste de equipos, sistemas de embolsado y otras variables relacionadas) demostraron tener una influencia decisiva en la calidad del arroz, a diferencia de lo ocurrido en otros granos. También se estudió la distribución temporal y espacial de la temperatura en el interior del silo bolsa. La aparición de síntomas asociados a hongos, en algunas situaciones, y su relación con umbrales de riesgo en los niveles de CO₂, así como su comportamiento, difieren de lo mencionado para otros cultivos. Hidalgo et al., (2006 a; 2012 a) y Pozzolo et al. (2006 a) sugieren que la pre-

sencia de la cáscara de arroz, que permanece con el grano al momento de ser ensilado, podría ser la principal causa de estos comportamientos diferenciales.

La conservación de arroz en silo bolsa fue en aumento. Estudios realizados por Hidalgo et al. (2008) señalan que para la campaña 2007/08 se han conservado alrededor de 70,0 mil toneladas de arroz mediante este sistema, y que en la campaña 2010 esta tendencia se mantuvo (Pozzolo et al., 2010).

Las recomendaciones del CH con el cual se deben almacenar los granos indican que no es aconsejable sobrepasar el valor base para la comercialización, que en cereales es alrededor de 13,0% - 14,0%. En general, cuanto menor es el CH del grano mejor será la conservación y mayor el tiempo permitido para una correcta conservación. Cuando se tratase de semillas las condiciones deben ser aún más estrictas (Casini et al., 2003).

El incremento en los rindes por hectárea y la introducción de nuevos cultivares con mayor potencial de rendimiento trajo aparejado como inconveniente la saturación de las plantas de secado. Esto motivó a analizar alternativas que puedan mejorar esta problemática, siendo una de ellas el almacenaje de granos con alto CH en silo bolsas.

Evaluaciones realizadas por el INTA (Bartosik y Rodríguez, 1999; Casini y Rodríguez, 2005; Rodríguez et al., 2002 y Bartosik et al., 2008) para almacenamiento de granos con diferentes CH en silo bolsa, demostraron que existe una tendencia al deterioro de la calidad de los granos cuando son almacenados a largo plazo. El almacenaje con alto CH solo podría ser viable a muy corto plazo.

Como desventajas de este sistema de conservación se pueden enumerar varias: la principal es la ruptura de la bolsa producida por distintas causas (climáticas y roedores, principalmente) que si no es reparada a tiempo, se pierde hermeticidad. Esto provoca el ingreso de O₂ y de humedad ambiente, lo que ocasiona un incremento del ritmo respiratorio de todos los seres vivos. Esto incide negativamente en la calidad de los granos almacenados (Casini, 2002). Otra desventaja es el daño mecánico al grano en el manipuleo de embolsado y extracción. Se sabe que todo movimiento del grano en el proceso de secado y conservación le produce daño mecánico, más aún si es realizado por medio de tornillos sinfines, y si la posición de trabajo es en forma inclinada o vertical. Estudios realizados por Hidalgo et al. (2006 b) conservando arroz con distintos CH en silo bolsas, concluyen que el uso de embolsadoras y extractoras con sinfines en mal estado aumentó el daño mecánico al grano y ocasionó una merma de granos enteros del 10,6%.

Se trabajó principalmente sobre 4 aspectos: 1) suministrar pautas para una conservación segura de arroz en silo bolsa, 2) proporcionar herramientas para un monitoreo efectivo del silo bolsa, 3) desarrollar, utilizando el silo bolsa, una estrategia de secado de arroz para aumentar la eficiencia de dicho proceso, 4) evaluar al tornillo sinfín (o tornillo de Arquímedes), utilizado para la confección y extracción de los silo bolsas, respecto al daño mecánico de los granos.

Metodología

La metodología utilizada fue la recopilación de información descripta en distintos trabajos e informes referidos a la conservación de arroz en silo bolsas, desarrollados en forma conjunta por el INTA y la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste.

Resultados y discusión

Conservación de arroz a distintas humedades. Factores incidentes

Se evaluó, por más de 10 años, la posibilidad de almacenar arroces a 12,0%, 16,0% y 18,0% de CH, estudiando factores incidentes como el CH, temperatura, granos enteros, granos manchados, poder germinativo, daño mecánico al grano y el “tempering” o “temperado” del grano. De estas investigaciones las consideraciones más importantes fueron:

Contenido de humedad

Los primeros trabajos fueron con arroz con CH base cámara (13,0%), donde se comprobó que el CH de la masa granaria dentro del silo bolsa varía hasta producirse un nuevo equilibrio entre humedad relativa (HR), temperatura y CH, para luego estabilizarse. Los análisis de calidad de este grano confirmaron que puede conservarse por un periodo de 11 meses sin problemas de calidad (Pozzolo et al., 2006 a). Estudios posteriores corroboraron estas afirmaciones. (Hidalgo et al., 2006 a; 2012 a).

Análisis realizados por Hidalgo et al. (2006 a) afirman que arroz almacenado en silo bolsa a 16,0% de CH se puede conservar hasta 4 meses sin afectar la calidad del grano. Estas investigaciones fueron de suma importancia para el sector productivo, porque permitieron aumentar la capacidad de secado en menor tiempo. Por ejemplo, arroz con 24,0% de CH tarda aproximadamente 12 horas para llegar al CH de conservación (12,0%), mientras que con esta técnica, secándolo de 24,0% a 16,0% CH, tarda 8 horas. Durante estos 4 meses de almacenamiento a 16,0% CH, permite descomprimir la tarea de secado, ya que el productor no se ve obligado a enviar mercadería húmeda a las plantas de acopio. Esto posibilita terminar el proceso de secado de 16,0% a 12,0% CH en momentos de no cosecha. Por tal motivo, esta tecnología es utilizada por la mayoría de los acopios y productores que deciden guardar el cereal en su propio establecimiento. Para arroz con 18,0% de CH, estos autores señalan que es posible almacenarlo por 40 días sin pérdidas de calidad del grano, pero extremando los controles en el silo bolsa. Además, estas investigaciones indican que durante el periodo que duró el ensayo, la variable CH en arroces con 16,0% y 18,0% fue de escasa utilidad para determinar variaciones en la calidad del grano. Esto es sustentado por ensayos de arroz conservado con 16,0% de CH en silo bolsa, en donde un mal cierre provocó el ingreso de agua. Como consecuencia, se produjeron anomalías en el silo bolsa, con un marcado aumento de granos manchados, que no se detectaron por la toma de datos del CH (Hidalgo et al., 2012 a).

Temperatura

La conservación de arroz en silo bolsas se realiza en una atmósfera rica en CO₂ y pobre en O₂, debido a la alta hermeticidad del sistema. Es necesario que el silo bolsa se mantenga en buen estado (sin rupturas y con un cierre hermético) para evitar el intercambio gaseoso (la entrada de O₂ y la salida de CO₂) con el ambiente (Rodríguez y Bartosik, 2000; Rodríguez et al., 2008).

En condiciones normales de almacenamiento de arroz, la temperatura de la masa granaria toma valores similares a los de temperatura ambiente sin responder a los cambios bruscos de esta, sino con cambios suaves y constantes (Pozzolo et al., 2006 b; Hidalgo et

al., 2006 a). Comportamientos parecidos fueron detectados en otros granos almacenados en silo bolsa (Casini, 2003; Bartosik et al., 2009 b; Cardoso et al., 2008; Hidalgo et al., 2011).

Investigaciones realizadas por Hidalgo et al. (2006 a) coinciden en que la variable temperatura no es un indicador directo de cambios en la calidad del grano de arroz almacenado en silo bolsa. Cuando se produce un marcado incremento de temperatura dentro del silo bolsa es porque la calidad del arroz fue afectada perdiéndose el total de la mercadería. Generalmente se observa un alto porcentaje de granos manchados que afectan la comercialización (Hidalgo et al., 2007; 2012 a).

Granos manchados

Esta variable es considerada de gran utilidad para detectar, tempranamente, anomalías en la calidad del grano de arroz conservado en silo bolsas, siendo una práctica recomendable y de fácil adopción. Estudios realizados por Hidalgo et al. (2006 a) señalan que en arroz con 12,0% de CH no se detectó un incremento de granos manchados después de 10 meses de almacenado. El mismo material con 16,0% y 18,0% de CH presentó variaciones leves en el valor de granos manchados a los 4 meses (arroz con 16,0% CH) y a los 2 meses (arroz con 18,0% CH) posteriores al embolsado. Estas ínfimas variaciones se deben tener en cuenta para realizar la extracción del arroz de la bolsa, ya que en aproximadamente una semana después de estos indicios, se produce un incremento exponencial en el manchado de los granos, que puede llegar al 100% (Hidalgo et al., 2012 a).

Poder germinativo

La posibilidad de conservar semillas de arroz en silo bolsas fue estudiada por Hidalgo et al. (2010). Estos autores concluyen que semillas con 12,0% a 18,0% de CH pueden ser conservadas por periodos similares que para arroz comercial. Sin embargo, deben realizarse monitoreos periódicos, fundamentalmente en silo bolsas con semillas con CH superior al 12,0% - 13,0%. Con un alto CH de grano, una ruptura o mal cierre de la bolsa posibilita el ingreso de humedad y O₂. En estas condiciones, el poder germinativo puede mermar desde 97,0% - 98,0% a 2,0% en menos de 10 días de almacenado.

Daño mecánico al grano

El daño mecánico al grano de arroz provoca una disminución en el porcentaje de granos enteros. Esto incide en la determinación del precio en la comercialización. La fracción de granos enteros se determina luego del procesamiento industrial del arroz, y el valor base está fijado en 60,0%. Cuando este valor no es alcanzado presenta castigos, y cuando es superado recibe bonificaciones. Son varios los factores que afectan esta variable, tales como la variedad utilizada, el proceso de cosecha, el CH de trilla y las condiciones ambientales, entre otros.

En el proceso de embolsado y extracción de arroz comúnmente las máquinas poseen tornillos sinfín para llevar el grano a la bolsa, y luego sacarlo para su posterior industrialización. El proceso se inicia en la carga desde la secadora o silos a los carros tolva autodescargables, y de estos a la embolsadora, cuyo órgano alimentador lo constituye, en la mayoría de los casos, un tornillo sinfín. Al finalizar el periodo de conservación, para desembolsar el grano se utiliza una máquina extractora, que también cuentan con este

mecanismo para mover el grano. Es necesario que las espiras y el tubo del sinfín se encuentren en buen estado y no estén gastados para evitar daños al grano.

Investigaciones realizadas por Hidalgo et al. (2005) concluyen que en el proceso de cosecha de arroz uno de los principales causantes del quebrado de grano es el desgaste del sinfín alimentador de noria. Por otra parte Hidalgo et al. (2006 b) afirman que una embolsadora con sinfín largo, inclinado y desgastado produjo mayor quebrado de granos que la embolsadora con sinfín corto, recto y sin desgaste, expresado en 3,5 y 0,6 puntos porcentuales menos de granos enteros, respectivamente. Cuando la extractora utilizada presentó un marcado desgaste de las espiras del sinfín extractor, fue la herramienta que más incidió en el daño al grano (en promedio 5,2% menos de granos enteros).

El daño mecánico al grano de arroz en todo el proceso (circuito alimentación a embolsadora - embolsado - extracción - alimentación a planta de industrialización) también fue estudiado por estos autores. Se concluyó que al utilizar embolsadora y extractora, con sinfines no adecuados para minimizar la rotura de grano, ocasionó una merma de granos enteros del 10,6%. El solo hecho de usar una embolsadora con sinfín alimentador adecuado disminuyó el daño mecánico del grano en un 4,2%, reduciendo la cantidad de grano partido en todo el proceso a 6,4%.

El grano de arroz con cáscara tiene la particularidad de ser muy abrasivo, lo cual ocasiona un rápido desgaste de sinfines alimentadores de embolsadoras y extractoras, incrementando el daño mecánico al grano. Hidalgo et al. (2013) evaluaron el desgaste de 4 sinfines alimentadores con un tratamiento antidesgaste en las espiras del sinfín: 1) endurecido con acero al boro, 2) endurecimiento con la técnica de arco presurizado, 3) recubrimiento con “acero durom” y 4) tratamiento con poliuretano kapher. Con los 3 primeros sinfines alimentadores se embolsaron 1750 toneladas de arroz (10 silo bolsas comerciales de 2,7 m de diámetro y 75,0 m de largo). La incidencia en el incremento de granos quebrados fue del 0,2% en los sinfines endurecidos con acero al boro y con la técnica de arco presurizado, mientras que el sinfín endurecido con “acero durom” provocó un incremento de granos quebrados del 0,6%. El sinfín tratado con poliuretano kapher tuvo un marcado desgaste de este material al término de la primera bolsa. Estas determinaciones indican que el endurecimiento de las espiras de los sinfines alimentadores, tanto con acero al boro como con arco presurizado, son los más apropiados para evitar el desgaste de estos elementos, y por ende minimizar el daño mecánico al grano.

En el mercado argentino existen 3 tipos de diseño de alimentación de embolsadoras: 1) alimentación por gravedad sin tornillo sinfín alimentador, 2) con tornillo sinfín de 60,0 cm de diámetro, 45,0 cm de largo y posición horizontal, 3) con tornillo sinfín de 60,0 cm de diámetro, 65,0 cm de largo e inclinado. Hidalgo et al. (2012 b) estudiaron cuál de estos 3 diseños era el menos agresivo. Se utilizaron 3 embolsadoras en buen estado, cada una con uno de los sistemas de alimentación mencionado. Se concluyó que la presencia de sinfines en el sistema de carga de embolsadoras causa mayor daño en el grano de arroz en la medida que presentan mayor inclinación y largo. Además, señalan que las embolsadoras por gravedad y las de sinfín alimentador horizontal en óptimas condiciones, no causan daños significativos al grano de arroz en el proceso de embolsado, por lo que son las más aconsejables para el manejo de poscosecha de este cultivo. Los sistemas de embolsado, ya sean por sinfines o por gravedad, no producen estratificación del grano por grado de quebrado dentro de la bolsa.

Tempering

Las variables a ajustar para mejorar el rendimiento de grano entero son fundamentalmente 2: controlar el proceso de cosecha (estado y sistemas de las máquinas y el CH de cosecha) y los procesos en la planta de acopio (movimiento de los granos, proceso industrial y el proceso de secado).

Por un lado, el secado es una de las tareas más sensibles de las que se realizan en la planta de acopio y muchas veces constituye un cuello de botella, ya que el arroz se comienza a cosechar con alto CH (alrededor del 24,0%). Es por ello que su procesamiento insume más tiempo que otros cultivos, hecho que atenta contra la eficiencia del funcionamiento de la planta. Además, esta situación provoca que frecuentemente se eleve la temperatura de secado intentando acortar el proceso, lo que provoca mermas en el porcentaje de entero y mayores costos de planta.

Por otro lado, la amortización de la infraestructura de secado es una de las más costosas de una planta de acopio. Esto está sustentado en que su funcionamiento se produce en un momento puntual del ciclo productivo. Por lo tanto, la incorporación de tecnología que permita mejorar los procesos de secado, puede generar un impacto relevante en el análisis de costos e incidirá directamente en el beneficio económico de la planta.

Se han realizado importantes avances en mejoras de secadoras, en cuanto a eficiencia térmica y a homogeneidad de temperatura de granos, entre otros. Sin embargo, existe tecnología complementaria del proceso que no siempre es aplicada en forma empírica. Es el proceso llamado “tempering” o “temperado” del grano post - secado. Esta técnica consiste en dejar en reposo a los granos luego de que pasen por la secadora. De esta manera se consigue homogenizar los valores de humedad y temperatura en el interior del grano.

Algunos estudios ya habían demostrado que el grano de arroz no se fisura durante el proceso de secado, sino después del mismo, es decir, cuando ingresa humedad del medio al interior de un grano. En este momento, existen tensiones dentro del grano, producto de tener temperaturas y humedades no uniformes entre la superficie y el interior del mismo (Siebenmorgen et al., 1986; Cnossen y Siebenmorgen, 2000). A partir de allí, se tomó conciencia de la importancia de realizar el proceso de temperado, como una forma de elevar los porcentajes de grano entero. Mientras más gradual sea el proceso de temperado, más efectivo será.

Almacenar arroz con valores elevados de CH implica tomar el riesgo de que la mercadería almacenada pueda tener un deterioro generalizado en la calidad, por lo que el proceso de secado es necesario. Sin embargo, arroz con aproximadamente 17,0% CH se ha almacenado en silo bolsas por más de 90 días sin deterioro. Teniendo en cuenta estas premisas, Pozzolo et al. (2010) plantearon combinar técnicas de secado con temperado del grano en el silo bolsa para mejorar la eficiencia del secado. Así, decidieron realizar el secado en 2 etapas, lo suficientemente alejadas en el tiempo para permitir aumentar la capacidad de secado de la planta. La primera etapa consistió en llevar el arroz de humedad de cosecha a CH de 17,0% aproximadamente, para luego almacenarlo en silo bolsas (se evitó ocupar o demandar infraestructura de silos con aireación). La segunda etapa fue el secado final, de 17,0% a 12,0% - 13,0%, para la posterior industrialización. La segunda etapa de secado se realizó en un periodo de hasta 90 días posteriores al embolsado del grano sin alteraciones de calidad. El estudio fue realizado durante la campaña 2007 y pos-

teriormente repetido en la campaña 2008. Durante este último año se procedió a realizar una prueba comercial de secado de arroz con un CH inicial promedio del 25,0%, para llevarlo a un CH del 17,0% (humedad de inicio del temperado, promedio de las 2 campañas). Para ello, se sometió al grano a una temperatura de aproximadamente 48,0 °C, valores muy altos para un secado convencional, pero compatible para estos guarismos de altos CH. Se pretendió maximizar la eficiencia del proceso al aprovechar la mayor facilidad de secado de los primeros puntos de humedad, lo que se consiguió al cabo de un promedio de 6 horas de secado. A partir de ese momento se procedió a embolsar el grano (aún caliente) en silo bolsas, para luego dejarlo por un periodo de aproximadamente 45 días, periodo más que suficiente para el temperado. Se pretendió secar fuera de los picos de demanda, a un grano de arroz sin tensiones internas para que el CH del grano migrara del interior hacia la superficie homogeneizando la masa de almidón.

Luego del temperado, se extrajo el grano del silo bolsa para proceder a su secado final hasta obtener 12,0% de CH y realizar los análisis de rendimiento de grano entero. El tiempo de secado promedio fue de 4 horas y la temperatura del grano promedio de 39,0 °C; los granos que se utilizaron fueron de las 2 campañas.

Paralelamente, se realizó una secada convencional con temperatura de grano de entre 38,0 °C y 40,0 °C, hasta alcanzar un CH cercano al 12,0%, lo que se logró después de 12 horas de secado.

Cuando se analizaron los resultados de grano entero se observó un promedio de 63,0% para el grano que tuvo temperado versus 54,0% para el grano secado en forma convencional. Estas diferencias permiten afrontar los gastos producidos derivados del proceso de embolsado. Además de las mejoras respecto a los porcentajes de grano entero se observó un sustancial aumento en la capacidad de secado. Por otro lado, se determinó una mejora de un 20,0% del tiempo operativo (valores absolutos), es decir 10 horas de secado con temperado versus 12 horas en el secado convencional. Pero si se consideran los tiempos operativos, desde el punto de vista de la capacidad de secado de la planta, como tiempo de oportunidad de capacidad de secado, las ventajas son sustantivas. Para los momentos de recibo del grano la capacidad de secado se aumenta en un 50,0%, lo que mejora notablemente los costos de la planta y aumenta su capacidad productiva.

Referencias

- Aposgran. 2005. Diálogos sobre Jornatec 2005. *Revista Aposgran*, 92:14.
- Bartosik R. y Rodríguez J.C. 1999. Evaluación de una técnica de almacenaje de granos a 8,4% de humedad en bolsas plásticas - Sistema silo bag. Informe INTA - IPESA.
- Bartosik R.; Cardoso L.; Ochandio D. y Croce D. 2009 a. Detección temprana de procesos de descomposición de granos almacenados en bolsas de plástico herméticas mediante la medición de CO₂. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Bartosik R.; Rodríguez J.; Malinarich H. y Cardoso L. 2009 b. Almacenaje de maíz, trigo, soja y girasol en bolsas plásticas herméticas, pp. 2 - 14. En: Casini C.; Ro-

- driguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
 - Casini C. 2002. Guía para almacenar grano en bolsas plásticas. Información técnica Proyecto eficiencia de cosecha y poscosecha de grano. INTA Manfredi, Córdoba, 4 p.
 - Casini C.; Clemente G.; Pagliero M. y Quartucci J. 2003. Efecto de la temperatura exterior sobre la atmósfera interior del sistema silo bag durante el almacenamiento de granos. Disponible en <http://www.agriculturadepresición.org>.
 - Casini C. y Rodríguez J.C. 2005. Atmósfera modificada, pp. 219 - 229. En: Bragachini M. y Casini C. (Eds.). SOJA. Eficiencia de Cosecha y Poscosecha. Manual Técnico N°3. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
 - Cnossen A.G. y Siebenmorgen T.J. 2000. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on milling quality. *Transactions of the ASAE*, 25 (4):1037 - 1040.
 - Hidalgo R.; Mirón M.; Pozzolo O.; Ferrari H. y Curró C. 2005 Análisis de diferentes aspectos relacionados con la eficiencia en la cosecha de arroz. En: Congreso Internacional de Ingeniería Rural. CADIR 2005, 9 - 12 de noviembre, San Luis, Argentina.
 - Hidalgo R.; Pozzolo O.; Barrionuevo C.; Ferrari H. y Curró C. 2006 a. Estudios de distintos factores incidentes en la calidad de arroz (*Oriza sativa*) conservado en bolsas plásticas. En: XVII Congreso Internacional de Plásticos Para la Agricultura - Comité Internacional de Plásticos en Agricultura - (CIPA) VIII Congreso Iberoamericano - Comité Iberoamericano para el Desarrollo y Aplicación de los Plásticos en Agricultura - (CIDAPA) I Congreso Argentino Comité Argentino de Plásticos para la Agricultura (CAPPA), 23 - 25 de octubre, Buenos Aires, Argentina.
 - Hidalgo R.; Meza H.; Pozzolo O.; Ferrari H. y Curró C. 2006 b. Efecto de tornillos de Arquímedes de embolsadoras y extractoras en la calidad de arroz. En: XVII Congreso Internacional de Plásticos Para la Agricultura - Comité Internacional de Plásticos en Agricultura - (CIPA) VIII Congreso Iberoamericano - Comité Iberoamericano para el Desarrollo y Aplicación de los Plásticos en Agricultura - (CIDAPA) I Congreso Argentino Comité Argentino de Plásticos para la Agricultura (CAPPA), 23 - 25 de octubre, Buenos Aires, Argentina.
 - Hidalgo R.; Domínguez F. y Kramer J. 2007. Incidencia de ciertos factores climáticos en la conservación de arroz en bolsas plásticas. Informe Técnico, Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina, 10 p.
 - Hidalgo R.; Domínguez F. y Kramer J. 2008. Relevamiento de la producción de arroz conservado en bolsas plásticas. Campaña 2007 - 2008. Informe Técnico. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina, 6 p.
 - Hidalgo R.; Pozzolo O.; Domínguez F. y Botta G. 2010. Conservación de semillas de arroz y arroces comerciales a distintas humedades en bolsas plásticas. Resultados preliminares. En: Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de

la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNNE, 18 - 19 de julio, Resistencia, Chaco, Argentina.

- Hidalgo R.; Domínguez F. y Botta G. 2011. Detección temprana de la variabilidad en la calidad de semillas crudas de algodón (*Gossypium hirsutum*) conservadas en bolsas plásticas mediante mediciones de la concentración de CO₂. Resultados Preliminares. En: Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNNE, 4 - 6 de julio, Resistencia, Chaco, Argentina.
- Hidalgo R.; Pozzolo O.; Domínguez F.; Serafini E. y Botta G. 2012 a. Validación de la técnica de medición de CO₂ para determinación temprana de cambios en la calidad de semillas de arroz conservadas en bolsas plásticas. Resultados preliminares. Presentado en la Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNNE, 11 - 13 de julio, Corrientes, Argentina.
- Hidalgo R.; Pozzolo O.; Domínguez F.; Behr E. y Botta G. 2012 b. Incidencia del diseño de embolsadoras en la calidad del arroz conservado en silo bolsa. En: X Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola e XLI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola CLIA/CONBEA 2012, 15 - 19 de julio, Londrina - PR, Brasil.
- Hidalgo R.; Pozzolo O.; Domínguez F.; Serafini E. y Botta G. 2013. Análisis del desgaste de sinfines alimentadores de embolsadoras para arroz usando distintas técnicas de endurecimiento. *Revista Agrotecnia*, 20: 23 - 29.
- Pozzolo O.; Hidalgo R.; Ferrari H. y Curró C. 2006 a. Conservación de arroz en bolsas plásticas a humedad base cámara. XVII Congreso Internacional de Plásticos Para la Agricultura - Comité Internacional de Plásticos en Agricultura - (CIPA) VIII Congreso Iberoamericano -Comité Iberoamericano para el Desarrollo y Aplicación de los Plásticos en Agricultura - (CIDAPA) Congreso Argentino Comité Argentino de Plásticos para la Agricultura - (CAPP), 23 - 25 de octubre, Buenos Aires, Argentina.
- Pozzolo O.; Hidalgo R.; Ferrari H. y Curró C. 2006 b. Conservación de arroz a diferentes humedades en silo bolsa. Efecto de la media sombra. En: XVII Congreso Internacional de Plásticos Para la Agricultura -Comité Internacional de Plásticos en Agricultura - (CIPA) VIII Congreso Iberoamericano - Comité Iberoamericano para el Desarrollo y Aplicación de los Plásticos en Agricultura - (CIDAPA), I Congreso Argentino Comité Argentino de Plásticos para la Agricultura- (CAPP), 23 - 25 de octubre, Buenos Aires, Argentina.
- Pozzolo O.; Hidalgo R.; Botta G. y Curró C. 2010. Secado de arroz (*Oryza sativa*). Efecto del tempering combinado con silos bolsas. En: IX Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA XXXIX Congresso Brasileira de Engenharia Agrícola, 25 - 29 de julio, Vitoria, ES, Brasil.
- PRECOP. 2007. Eficiencia de Poscosecha: generación, desarrollo y difusión de tecnologías para aumentar la eficiencia de acondicionado, secado y almacenaje de cereales, oleaginosas y cultivos industriales del país. Proyecto Nacional del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. INTA PE AEAI5742.
- Rodríguez J. y Bartosik R. 2000. Almacenaje de granos en bolsas plásticas. Ensayo de simulación. EEA INTA Balcarce. Informe interno, Inédito.

- Rodríguez J.; Bartosik R.; Malinarich H.; Exilart J. 2002. Almacenaje de granos en bolsas plásticas, girasol. Resumen Informe Final. INTA EEA Balcarce, Buenos Aires, Argentina, 8 p.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Cardoso L. y Croce D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 589 - 592. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- SAGPyA. 2007. Estimaciones agrícolas mensuales - estimaciones oficiales a 17 de octubre del 2007. Reporte de la Secretaría de Agricultura. Disponible en: www.sagpya.gov.ar. Accedido en octubre del 2007.
- Siebenmorgen T.J.; Freer M.W.; Benz R.C. y Loewer O.J. 1986. Controlled atmosphere storage system for rice. *Paper ASAE*, 86 - 6511: 26.

DetECCIÓN TEMPRANA DE LA VARIABILIDAD EN LA CALIDAD DE SEMILLAS CRUDAS DE ALGODÓN (*Gossypium hirsutum*) CONSERVADAS EN SILO BOLSAS MEDIANTE MEDICIONES DE LA CONCENTRACIÓN DE CO₂

Ramón Hidalgo¹
Fabio Domínguez¹
Guido Botta^{2, 3}
Oscar Pozzolo⁴
Mario Tourn³
Hernán Ferrari⁵

Resumen

Investigaciones realizadas por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste, en forma conjunta con el INTA y las Facultades de Agronomía de la Universidades de Buenos Aires y de Luján, posibilitaron el uso cada vez más masivo de silo bolsas para la conservación de semillas de algodón con linter (pelos epidérmicos), utilizada como suplementación de ganado. Sin embargo, aún faltan estudios que permitan detectar tempranamente variaciones en la calidad de dicho producto. Contar con una metodología de monitoreo podría reducir pérdidas parciales o totales durante el almacenaje de algodón en silo bolsas. Por tal motivo, en la provincia del Chaco se evaluó la factibilidad del uso de la técnica de medición de CO₂ en semillas crudas de algodón conservadas en silo bolsas a distintas humedades (13,5% y 15,6%) durante 4 meses. Estos valores se compararon con los resultados de la medición de parámetros incidentes en la calidad de estas semillas, utilizadas en la alimentación de ganado bovino: materia seca (MS), proteína bruta (PB), fibra bruta (FB), extracto etéreo (EE), fibra insoluble en detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA). El máximo valor de CO₂ fue del 18,4%, esto indica una alta actividad biológica que afectó en forma relativa la calidad de la semilla. Sin embargo los valores nutricionales evaluados después de finalizado el ensayo continuaban siendo compatibles para su uso como ración en la dieta animal. Factores como EE, PB y FDA disminuyeron para luego estabilizarse a los 30 días de almacenaje. La disminución de los contenidos grasos es un indicativo de procesos

¹Facultad de Ciencias Agrarias, UNEE (Corrientes) Argentina.

²Facultad de Agronomía, UNLu (Buenos Aires) Argentina.

³Facultad de Agronomía, UBA (Buenos Aires) Argentina.

⁴Instituto de Ingeniería Rural - INTA Castelar (Buenos Aires) Argentina.

⁵EEA INTA Concepción del Uruguay (Entre Ríos) Argentina.

de degradación que se produjeron durante el primer mes de almacenaje, hasta estabilizarse dentro de valores aceptables para la alimentación de ganado. La semilla de algodón no presentó rancidez y fue consumida por los animales sin ningún tipo de inconvenientes después de 4 meses de conservada en silo bolsas.

Palabras clave: suplementación, almacenamiento, poscosecha, factores incidentes.

Introducción

El uso de semillas enteras de algodón para la alimentación de ganado bovino en pastoreo es frecuente, ya que resulta un recurso fácilmente disponible, de bajo costo y es considerado una excelente fuente de proteínas y energía (Balbuena y Kucseva, 2006). Según Kucseva et al. (2001) la semilla de algodón entera, motosa o con borra, se ha utilizado como suplemento para la alimentación de rumiantes con buenos resultados en la producción de leche y de carne.

Las cualidades que posicionan a este suplemento como un buen recurso alimenticio están dadas por distintos factores: el valor nutritivo en base seca es de 23,9% de proteína bruta (PB), 23,1% de extracto etéreo (EE; lípidos), 3,5 Mcal de energía metabolizable (EM) y 39,0% de pared celular (fibra insoluble en detergente neutro, FDN). Estos valores siempre dependen de las diferentes partidas de semillas. Los resultados analíticos en ciertas regiones productoras de Argentina usualmente muestran menores cantidades de PB y lípidos (Balbuena et al., 2005).

La conservación de este tipo de semillas fue un problema irresuelto por los ganaderos del Noreste Argentino (NEA), debido a que la forma más común de preservarlas era acopiándolas en galpones o tinglados en forma de parva. Ello no garantiza la manutención de la calidad del material, siendo afectada en ciertos momentos del año por las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente. Las alteraciones producidas en la calidad (material ardido y rancidez de los aceites) ocasionan el rechazo parcial o total del alimento por el ganado. Según Romero et al. (2001), el alimento se conserva muy bien cuando está bien protegido y el contenido de humedad (CH) de la parva no supera el 10,0%. Con valores superiores al 15,0% de CH comienzan a aparecer problemas tanto en la conservación y en su posterior consumo. Los problemas se deben a la actividad de hongos que producen el calentamiento del material y pueden producir micotoxinas. Estas toxinas pueden ser nocivas para los animales y, posteriormente, para los consumidores del producto final. Para subsanar este inconveniente, la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste, en forma conjunta con las Facultades de Agronomía de las Universidades de Buenos Aires, de Luján y con la colaboración del Instituto de Ingeniería Rural del INTA, realizó investigaciones referidas a la conservación de semillas de algodón con linter (pelos epidérmicos), utilizadas como suplementación de ganado (Hidalgo et al., 2007). Estos estudios ayudaron a multiplicar la implementación de este sistema por parte de los productores.

Según Rodríguez y Bartosik (2000), el desarrollo tecnológico de la agricultura y la ganadería en Argentina provocó profundos cambios en los sistemas productivos. Uno de ellos es la utilización de plásticos agrícolas para el almacenaje de granos secos, granos húmedos y en la conservación de forraje (silaje, henolaje). De esta manera la plasticultura

garantizó, con materiales tecnológicos, el mantenimiento de las características óptimas de forrajes y granos conservados a través del tiempo.

La utilidad de la medición de CO_2 en la atmósfera intergranaria del silo bolsa para detectar tempranamente variaciones en la calidad en grano almacenado en silo bolsa ha sido estudiado para diferentes granos, como soja y trigo (Bartosik et al., 2007). El uso de esta metodología para el monitoreo de algodón almacenado en silo bolsas permitiría reducir pérdidas parciales de calidad, y con ello las incidencias negativas en la rentabilidad.

El objetivo de este estudio es evaluar factibilidad de uso de la técnica de medición de CO_2 como indicador de riesgo de conservación de semillas crudas de algodón conservadas en silo bolsas a distintas humedades (13,5% y 15,6%), y cuyo destino es la alimentación de ganado bovino. Los resultados son promedios de 2 años de investigación.

Materiales y métodos

En la provincia del Chaco se confeccionaron 4 silo bolsas comerciales de (2,7 m de diámetro y 60,0 m de largo) con semillas de algodón crudas, enteras sin deslinter con 2 diferentes CH = 13,5% (silo bolsas 1 y 2) y 15,6% (silo bolsas 3 y 4). Se utilizó como testigo el mismo tipo de semillas almacenada en parva dentro de un galpón de acopio, con CH del 13,5%. Estos ensayos se realizaron en los años 2010 y 2011 de igual manera y en similares condiciones de CH y momentos del año. (Figura 1 a, b).



Figura 1.

a. Confección de silo bolsas con 13,5% y 15,0% de CH. **b.** Bolsas con semilla de algodón con linter.

La cantidad a embolsar fue de aproximadamente 30,0 toneladas de semilla de algodón por silo bolsa. El ensayo tuvo una duración de 4 meses y quincenalmente, en 3 lugares del silo bolsa (al inicio, zona media y final del silo bolsa) y en 3 estratos por sitio de muestreo (superior: 30,0 cm de profundidad del polietileno del silo bolsa, medio: centro del silo bolsa, inferior: 30,0 cm por encima de la parte basal) se realizaron las mediciones de las concentraciones de CO_2 y O_2 (analizador de gases marca “Dan Sensor CheckPoint”, Dinamarca). Además se extrajeron muestras, por medio de un calador tipo “sonda”, para luego analizar en laboratorio las posibles variaciones de los factores incidentes en la calidad, (Figura 2 a, b). En la parva, la toma de muestras se realizó de igual manera, (superior, parte media y parte basal) con distribución al azar.

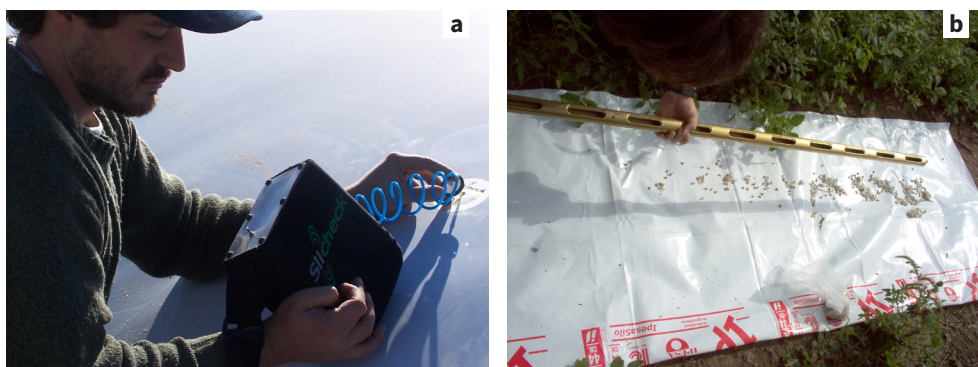


Figura 2.

a. Medición de CO_2 y O_2 . **b.** Toma de muestra con un calador tipo sonda.

El análisis estadístico se efectuó mediante un ensayo completamente aleatorizado, realizándose determinaciones de varianza. Las diferencias entre medias se determinaron a través de una prueba de Tukey (nivel de significancia de $p < 0,05$). Los tratamientos fueron semillas de algodón enteras con linter con 13,5% y 15,6% de CH. Las variables analizadas fueron: CH, temperatura, materia seca (MS), PB, fibra bruta (FB), EE, fibra detergente ácida (FDA), FDN y tiempo de conservación.

Resultados y discusión

Análisis de la concentración de CO_2 y O_2

La concentración de CO_2 mostró un incremento durante el transcurso del ensayo en todos los silo bolsas (Tabla 1). En aquellas con CH de 13,5% existió un aumento promedio cercano a 10,0% (de 3,6% hasta 13,6%), mientras que en los silo bolsas con CH de 15,6% el incremento fue superior al 15,0% (de 2,5% hasta 18,0%). Estudios realizados en trigo por Rodríguez et al. (2008) indican que la concentración de CO_2 en silo bolsas, en condiciones de almacenaje seguras, aumenta con el CH del grano (5,0% de CO_2 para 13,0% de CH o menos, y hasta el 17,0% de CO_2 para 16,0% de CH). Este comportamiento, en ciertos aspectos, es similar a lo ocurrido en las semillas de algodón con linter conservadas en silo bolsas. Posiblemente este aumento este más ligado al CH, superior a los recomendados para su almacenamiento, que origina una humedad relativa intersticial no restrictiva para la actividad biológica (cercana al 80,0%). Además, por tratarse de una semilla motosa, con linter, es posible esperar características distintivas a otros tipos de granos.

Los valores registrados de la concentración de CO_2 al final del ensayo podrían indicar el tiempo de conservación, que para las condiciones del ensayo sería de 3 meses. A partir de este período se registran disminuciones de calidad. La PB disminuyó en las 2 últimas mediciones con valores por bajo de 25,4% y 23,9%, a pesar de ser aún considerados adecuados para alimento de vacunos. El contenido celular también disminuyó después de los 3 meses de conservación, determinado indirectamente a través del aumento de FB, afectó considerablemente la calidad nutritiva. No obstante los valores registrados en las 2 últimas fechas de muestreo (43,6% y 43,3%) se encuentran dentro del rango considerado

aceptable para forraje (20,0% - 60,0%). Otro factor que disminuyó fue el EE, indicador que en algodón no debería ser inferior al 23,0%, observándose valores menores a los 4 meses.

No se detectó presencia de O₂ al final del ensayo, a diferencia de otros granos en silo bolsas. Seguramente la actividad biológica sumada a la hermeticidad fue responsable de este resultado (Tabla 1).

Tabla 1.

Evolución de la concentración de CO₂ y O₂ en silo bolsas con semilla de algodón con linter a humedades de 13,5% y 15,6%. Valores expresados en porcentajes.

FECHA	SILO BOLSAS							
	SILO 1		SILO 2		SILO 3		SILO 4	
	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂
5-2	3,3 p	15,9 c	4,0 o	13,8 ef	3,0 p	15,7 c	2,0 q	16,0 c
11-2	3,7 0	13,8 ef	3,9 o	14,0 rf	3,7 o	13,6 ef	2,6 pq	15,8 c
23-2	4,4 no	15,1 d	4,8 n	12,3 g	4,0 o	13,8 ef	5,0 n	13,2 f
15-3	5,4 mn	12,0 g	5,6 mn	13,0 f	5,0 n	13,0 f	6,2 m	13,0 f
29-3	6,4 m	7,2 l	7,9 k	6,2 m	7,8 k	8,1 k	8,0 k	9,0 j
12-4	10,9 hi	3,0 p	10,1 i	5,0 n	11,0 hi	2,5 pq	12,6 fg	3,2 p
26-4	11,5 h	1,0 r	12,8 f	0,5 rs	14,6 e	1,0 r	13,2 f	2,0 q
14-5	13,3 f	0,0 s	14,1 ef	0,0 s	15,7 c	0,0 s	15,0 d	0,7 r
26-5	13,6 f	0,0 s	14,2 ef	0,0 s	18,2 a	0,0 s	18,0 a	0,0 s
10-6	13,2 f	0,0 s	14,0 ef	0,3 s	18,4 a	0,0 s	17,8 b	0,0 s
Media	8,6	6,8	9,1	6,5	10,1	6,9	10,0	7,3
Desv. Est.	4,3	6,8	4,4	6,2	6,2	6,6	6,0	6,8
C.V.	50,2	99,8	48,2	95,3	61,2	95,3	60,2	92,9

Números seguidos de letras diferentes en la columna indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$). Silo bolsas 1 y 2 = 13,5% CH; Silo bolsas 2 y 3 = 15,6% CH. Desv. Est.: desvío estándar. C.V.: Coeficiente de variación.

Temperatura

Los resultados de temperatura de la masa granaria dentro del silo bolsa indicaron que esta fue copiando la temperatura ambiente, manteniéndose más constante a los cambios bruscos, similar al comportamiento de otros granos (soja, maíz, arroz) almacenados en silo bolsas (Siebenmorgen, 1986; Casini, 2004; Hidalgo et. al, 2007; Cardoso et al., 2008). Al principio del ensayo la temperatura promedio fue cercana a los 26,0 °C (silo bolsas 1 y 2) y 28,0 °C (silo bolsas 3 y 4) para los 3 estratos de la bolsa (superior, medio e inferior). Luego la temperatura fue descendiendo paulatinamente hasta llegar al final del ensayo con aproximadamente 18,0 °C, para los silo bolsas 1 y 2, y 21,0 °C para los silo bolsas 3 y 4. Sin embargo, si se compara el algodón con otros granos almacenados en silo bolsa, se observa una menor asociación entre las temperaturas registradas con las variaciones climáticas y la estratificación dentro del silo bolsa (Bank, 1980; Annis, 1986; Clemente et al., 2002). Posiblemente

estas diferencias estén asociadas a que se trata de una semilla con cubierta seminal provistas de linter (Tabla 2). En el testigo, la temperatura de la parva tuvo un comportamiento distinto al del silo bolsa. Se produjo un leve aumento durante los primeros 6 días, a los 18 días de iniciado el ensayo se detectó un marcado aumento con valores de 32,0 °C (datos no mostrados). Las semillas presentaban un proceso de descomposición con olor rancio y color oscuro, por lo que se decidió interrumpir la conservación.

El hecho de que la temperatura es uno de los factores que acusa notables variaciones cuando el grano o semilla almacenada pierde calidad, contrasta con la falta de modificaciones de esta variable en todo el ensayo. Podría especularse que la adecuada conservación se debe a que el algodón se almacena en condición de ambiente confinado, sin presencia de O₂, donde se produciría un detenimiento de los procesos de respiración.

Tabla 2.

Análisis estadístico de la temperatura intergranaria en los silo bolsas.

Comparación con la temperatura ambiente. Valores expresados en grados centígrados.

FECHA	SITIOS. SILO BOLSAS 1 Y 2			SITIOS. SILO BOLSAS 3 Y 4			T A
	Superior	Medio	Inferior	Superior	Medio	Inferior	
5-2	26,2 a	26,7 a	26,4 a	27,3 a	27,8 a	27,5 a	26,0 a
11-2	26,3 a	26,7 a	26,5 a	27,3 a	27,7 a	27,5 a	26,0 a
23-2	24,4 b	24,7 b	23,9 b	26,9 a	26,9 a	26,4 a	24,0 b
15-3	25,8 a	25,3 ab	24,9 b	24,6 b	25,1 ab	24,9 b	24,0 b
29-3	21,9 c	22,2 c	22,5 c	25,8 a	25,0 ab	25,6 a	23,0 b
12-4	20,3 c	20,5 c	19,5 cd	23,0 b	22,8 b	23,4 b	19,0 d
26-4	18,4 d	18,5 d	19,1 d	22,6 b	23,0 b	22,3 b	21,0 c
14-5	18,4 d	18,5 d	18,7 d	20,4 c	20,0 c	20,2 c	27,0 c
26-5	18,7 d	18,5 d	19,1 d	21,3 c	20,5 c	20,7 c	23,0 b
10-6	18,5 d	18,3 d	19,0 d	20,7 c	20,0 c	20,4 c	20,0 c
Media	21,9	22	23	23,9	23,9	23,9	
Desv. Est-	3,5	3,6	3,28	2,69	3,1	2,9	
C.V.	15,6	16,3	14,7	11,2	12,9	12,3	

Números seguidos de letras diferentes registran diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

TA: temperatura ambiente. Silo bolsas 1 y 2 = 13,5% CH; silo bolsas 2 y 3 = 15,6% CH. Desv. Est.: desvío estándar.

C.V.: Coeficiente de variación.

Contenido de humedad

Las determinaciones de CH de semillas por estrato presentaron valores inconsistentes, lo que se atribuyó a la presencia del linter, que hacía que se comportara en forma heterogénea para el muestreo. Por este motivo se decidió utilizar la información de los valores de cada estrato (superior, medio e inferior) para determinar el CH promedio del silo bolsa, información que ofrecía mayor seguridad. Para los silo bolsas 1 y 2, al evaluar el comportamiento del CH en relación al tiempo de conservación, se observa una baja

correlación ($r^2 = 0,4$), indicando que no hubo incidencia del tiempo de conservación en una posible variación del CH. Esto fue corroborado por el análisis estadístico, donde no se registraron diferencias significativas entre valores durante el ensayo. Si bien al finalizar la experiencia el CH estuvo cercano al 15,0%, valor considerado crítico por Romero et al. (2001) para la conservación de semilla de algodón con linter, el material no sufrió alteraciones en su calidad. Esta información es relevante al considerar al silo bolsa como una alternativa de almacenamiento. En los silos bolsas 2 y 3 se observó una baja asociación ($r^2 = 0,3$) en forma descendente, lo cual indica nulidad en la incidencia del tiempo de almacenamiento sobre el CH. El hecho de no mostrar relación entre estas variables, condiciona los resultados del análisis estadístico con diferencias significativas entre sus valores.

En esta situación, el material embolsado no presentó síntomas de rancidez durante todo el ensayo. Este comportamiento está muy ligado al hecho de que las semillas se encontraban dentro de una atmósfera modificada, sin presencia de O_2 , debido principalmente a la hermeticidad del silo bolsa que no permitió el calentamiento del material. (Tabla 3; Figura 3 a, b).

Materia seca

Para ambas humedades estudiadas, el contenido de MS en función del tiempo de conservación presentó una baja correlación (un $r^2 = 0,4$ para los silos bolsas con 13,5% de CH, y $r^2 = 0,3$ para los silos bolsas con 15,6% de CH). Al analizar estadísticamente no se encontraron diferencias significativas entre los valores de MS. Este contenido de MS es aceptable para la suplementación de ganado vacuno, lo que confirma la posibilidad de uso de esta tecnología como alternativa de conservación de semillas de algodón enteras con linter. (Tabla 3; Figura 4 a, b).

Proteína bruta

Los silos bolsas con CH de 13,5% y 15,6% tuvieron un comportamiento similar en cuanto a la evolución de este parámetro. Se observa una alta correlación descendente entre PB y el tiempo de conservación (con un $r^2 = 0,8$ para los primeros y un $r^2 = 0,7$ en los segundos), corroborado a través de análisis estadístico cuyo resultado muestra diferencias significativas. En las últimas mediciones se observó que los valores de PB se encontraban muy por debajo de los considerados adecuados como alimento de ganado vacuno (25,4% y 23,9% para Romero et al. (2001) y Balbuena et al. (2005), respectivamente). Esto podría deberse a que parte del N de la semilla haya pasado a N gaseoso dentro del ambiente del silo bolsa, por desnitrificación. Ello explicaría la disminución de PB, valor solo tomado sobre la semilla y no en forma. (Tabla 3; Figura 5 a, b).

Fibra bruta

En todos los casos se observó un marcado incremento de esta variable en relación al tiempo de conservación ($r^2 = 0,8$ y $0,9$ para los silos bolsas con CH de 13,5% y 15,6% respectivamente). Se detectaron diferencias significativas en el análisis estadístico solo en las 2 últimas fechas del ensayo, lo cual indica que el período de conservación no debería superar los 3 meses. Luego de este tiempo se produjeron alteraciones en la calidad del

material, indicadas como mermas del contenido celular. Si bien el incremento de la FB afecta considerablemente la calidad nutritiva, los valores registrados en las 2 últimas fechas de muestreo (43,6% y 43,3%) se encuentran dentro del rango considerado aceptable para forraje (20,0% - 60,0%) según Calsimiglia (1997; 1999) (Tabla 3; Figura 6 a, b).

Tabla 3.

Contenido de humedad, materia seca, proteína bruta y fibra bruta.

Análisis estadístico de datos promedios. Valores expresados en porcentajes.

FECHA	CONTENIDO DE HUMEDAD		MATERIA SECA		PROTEÍNA BRUTA		FIBRA BRUTA	
	Silo 1	Silo2	Silo 1	Silo2	Silo 1	Silo2	Silo 1	Silo2
	----- % -----							
5-2	16,2 a	15,2 a	47,5 ab	51,3 a	50,3 b	55,2 bc	30,6 b	23,96 a
11-2	16,2 a	15,2 a	46,7 ab	51,2 a	53,2 ab	52,1 c	30,6 b	24,0 a
23-2	16,1 a	15,4 a	46,6 ab	49,5 ab	55,0 ab	50,7 c	26,7 b	24,0 a
15-3	16,3 a	15,3 a	47,4 ab	47,0 bc	61,5 a	50,4 c	30,4 b	24,0 a
29-3	16,0 a	14,6 ab	52,9 a	46,6 bc	55,9 ab	53,4 bc	33,9 b	24,4 a
12-4	15,5 a	15,1 a	45,5 b	49,8 ab	50,5 b	66,0 a	32,4 b	23,9 a
26-4	16,3 a	14,2 ab	47,3 ab	48,1 ab	51,6 b	57,8 b	32,0 b	16,9 c
14-5	13,8 b	14,0 ab	49,6 ab	43,5 c	56,0 ab	50,9 c	31,6 b	20,8 b
26-5	11,9 c	12,6 b	47,9 ab	50,4 ab	58,1 ab	55,4 bc	43,6 a	16,9 c
10-6	13,3 bc	13,3 a	49,0 ab	50,2 ab	57,8 ab	53,7 bc	43,3 a	17,8 c
Media	15,2	14,5	48,0	48,8	55,0	54,6	33,5	34,9
Desv. Est.	1,6	1,0	2,1	2,5	3,6	4,6	5,6	3,3
C.V.	10,4	6,9	4,3	5,0	6,6	8,5	16,6	9,6

Números seguidos de letras diferentes registran diferencias significativas $p \leq 0,05$.

Silo bolsas 1 y 2 = 13,5% CH; Silo bolsas 2 y 3 = 15,6% CH. Desv. Est.: desvío estándar. C.V.: Coeficiente de variación.

Figura 3.

Evolución del contenido de humedad total (CH; %) del silo bolsa en función al tiempo de conservación.

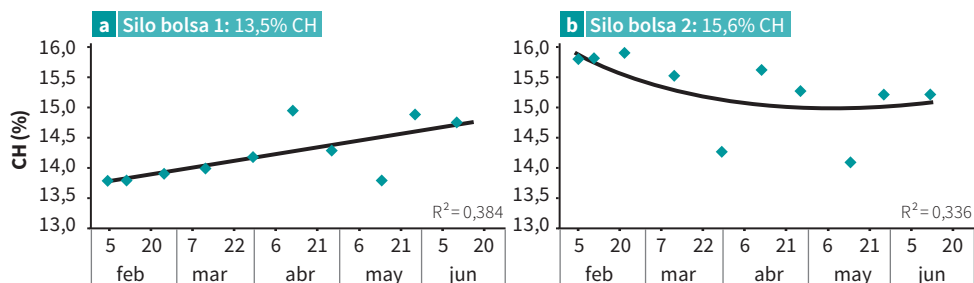


Figura 4.

Evolución de la materia seca total (MS; %) del silo bolsa en función al tiempo de conservación.

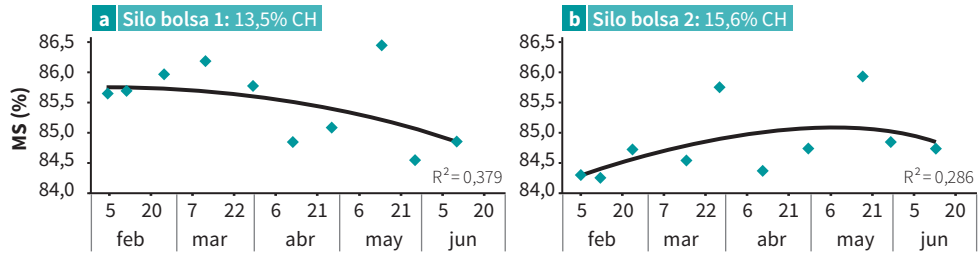


Figura 5.

Evolución de la proteína bruta total (PB; %) del silo bolsa en función al tiempo de conservación.

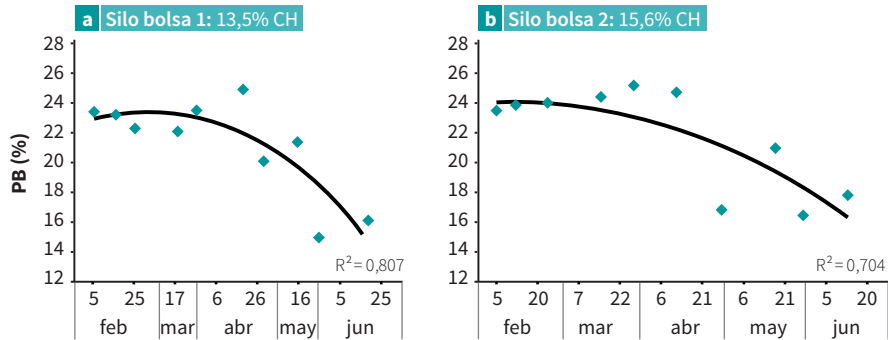
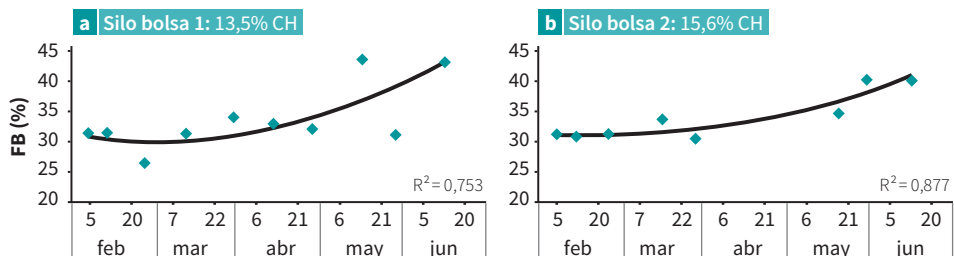


Figura 6.

Evolución de la fibra bruta total (FB; %) del silo bolsa en función al tiempo de conservación.



Extracto etéreo

Indica la cantidad de lípidos que en la semilla de algodón están presentes en considerable proporción. Romero et al. (2001) y Balbuena et al. (2005) consideran apropiado un contenido de entre 23,1% y 23,5% en las semillas de algodón utilizadas como alimentos de vacunos. En todos los silo bolsas, al comienzo del ensayo los valores de EE fueron

Tabla 4.

Extracto etéreo, fibra insoluble en detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácida (FDA). Análisis estadístico de datos promedios. Valores expresados en porcentajes.

FECHA	EXTRACTO ETÉREO		FDA		FDN	
	Silo 1	Silo2	Silo 1	Silo2	Silo 1	Silo2
	----- % -----					
5-2	16,2 a	15,2 a	47,5 ab	51,3 a	50,3 b	55,2 bc
11-2	16,2 a	15,2 a	46,7 ab	51,2 a	53,2 ab	52,1 c
23-2	16,1 a	15,4 a	46,6 ab	49,5 ab	55,0 ab	50,7 c
15-3	16,3 a	15,3 a	47,4 ab	47,0 bc	61,5 a	50,4 c
29-3	16,0 a	14,6 ab	52,9 a	46,6 bc	55,9 ab	53,4 bc
12-4	15,5 a	15,1 a	45,5 b	49,8 ab	50,5 b	66,0 a
26-4	16,3 a	14,2 ab	47,3 ab	48,1 ab	51,6 b	57,8 b
14-5	13,8 b	14,0 ab	49,6 ab	43,5 c	56,0 ab	50,9 c
26-5	11,9 c	12,6 b	47,9 ab	50,4 ab	58,1 ab	55,4 bc
10-6	13,3 bc	13,3 a	49,0 ab	50,2 ab	57,8 ab	53,7 bc
Media	15,2	14,5	48,0	48,8	55,0	54,6
Desv. Est.	1,6	1,0	2,1	2,5	3,6	4,6
C.V.	10,4	6,9	4,3	5,0	6,6	8,5

Números seguidos de letras diferentes registran diferencias significativas $p \leq 0,05$.

Silo bolsas 1 y 2 = 13,5% CH; Silo bolsas 2 y 3 = 15,6% CH. Desv. Est.: desvío estándar. C.V.: Coeficiente de variación.

Figura 7.

Evolución del extracto etéreo total (EE; %) del silo bolsa en función al tiempo de conservación.

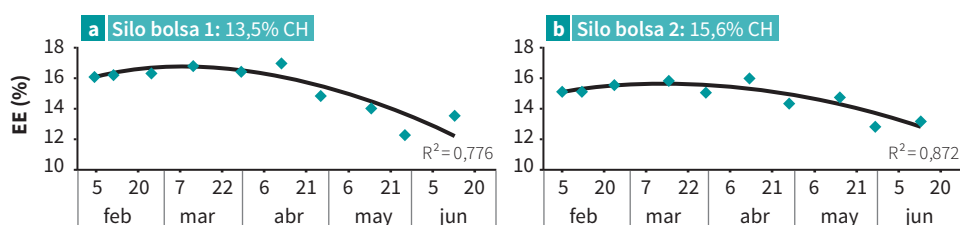


Figura 8.

Evolución de la fibra insoluble en detergente ácido (FDA; %) total del silo bolsa en función al tiempo de conservación.

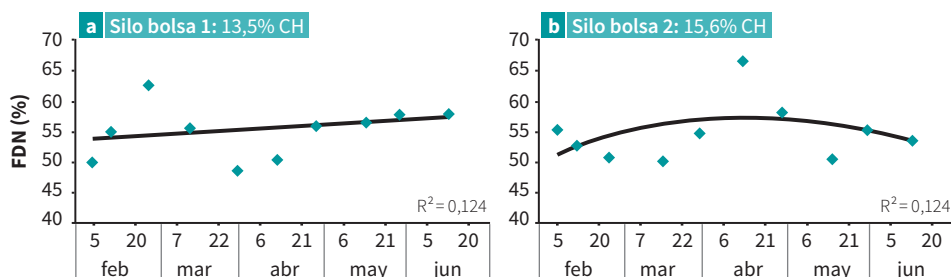
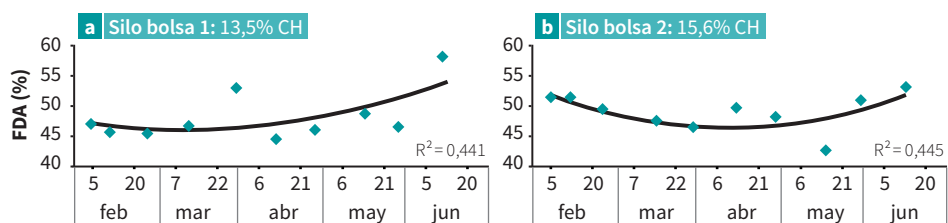


Figura 9.

Evolución de la fibra insoluble en detergente neutro total (FDN; %) del silo bolsa en función al tiempo de conservación.



inferiores a los recomendados. Los silo bolsas con CH de 13,5% tenían 16,2% de EE, y los silo bolsas con 15,6% de CH contenían 15,2% de EE. Al correlacionar el contenido de EE con el tiempo de conservación se observó una alta asociación en todos los silo bolsas, arrojando valores de r^2 de 0,8 y 0,9 para los silo bolsas con 13,5% y 15,6% de CH, respectivamente. El análisis estadístico indicó que se encontraron diferencias significativas en los valores de EE (respecto del contenido inicial) a partir de los 3 meses de almacenaje. Esta evolución es coincidente con el comportamiento de otras variables, como FB, respecto al tiempo máximo de conservación, así como estabilidad en las 2 últimas fechas de muestreo (Tabla 4; Figura 7 a, b).

Fibra insoluble detergente ácido

Este parámetro indica el porcentaje de celulosa y lignina. La correlación entre las variables FDA y tiempo de conservación mostró una baja asociación, con r^2 inferior a 0,5

para todos los silo bolsas. El análisis estadístico registró diferencias significativas entre casos (más marcadas en los silo bolsas 3 y 4), indicando que el tiempo transcurrido no es una variable que actúe sobre la FDA de acuerdo a alguna progresión predecible. En los 2 primeros silo bolsas las diferencias se dieron solo en la fecha 6 (12 de abril), observándose cierta estabilidad en los datos obtenidos para las restantes fechas de muestreo. Por otra parte, en los silo bolsas 3 y 4 se observó una leve disminución en la FDA con el transcurrir del tiempo, hasta las 2 últimas fechas donde se estabilizaron en valores cercanos al 50,0% (inferior a los valores iniciales). Estos resultados indican que prácticamente no se produjeron mermas en la cantidad de FDA, lo que implicaría también una relativa disminución del contenido celular. El incremento continuo de esta variable está relacionado a una merma del contenido celular, situación no deseada desde el punto de vista de las necesidades como alimento de vacunos. (Tabla 4; Figura 8 a, b).

Fibra insoluble en detergente neutro

No se registraron asociaciones al correlacionar las variables FDN y tiempo de conservación, con valores r^2 levemente superiores a 0,1 para los 4 silo bolsas analizados (Figura 9 a, b). Sin embargo, en el análisis estadístico se registraron diferencias significativas para los silo bolsas 1 y 2 (13,5% de CH) con un incremento de 7,5% entre el comienzo y el final del ensayo (Tabla 4). Los silo bolsas 3 y 4 (15,6% CH) tuvieron un comportamiento más errático, produciéndose aumentos y disminuciones en los valores de FDN para llegar a la última fecha (26 de abril) con un aumento de 4,5% en la FDN. Este aumento incide en forma negativa para la alimentación, ya que provocan una disminución en el consumo voluntario de MS (Gaggioti et al., 2001).

Conclusiones

La medición de la concentración de CO_2 puede ser considerada una herramienta para determinar tempranamente anomalías en la calidad de semillas de algodón con linter, conservada silo bolsa a distintos contenidos de humedad.

La concentración de CO_2 en silo bolsas con semillas de algodón entera con linter, en condiciones de almacenaje seguras, aumenta con el contenido de humedad del grano (13,0% - 14,0% de CO_2 para 13,5% de humedad y hasta 18,0% de CO_2 para 15,6% de humedad) a los 4 meses de conservación.

La temperatura interna de los silo bolsas tuvo un comportamiento similar a la temperatura ambiente, respondiendo a los cambios bruscos de ésta con cambios suaves y constantes, mientras que los valores de contenido de humedad se mostraron erráticos dentro del silo bolsa. Posiblemente las características del grano (pilosidad) obliguen a aumentar el número de muestras.

En el silo bolsa la disminución de los contenidos grasos indica procesos degradativos que continúan en forma más o menos constante hasta estabilizarse dentro de valores considerados aceptables como alimento de ganados.

El tiempo de conservación para las condiciones del ensayo fue de 3 meses. Luego ciertos factores de calidad como proteína bruta, contenido celular y extracto etéreo disminu-

yeron, registrándose valores inferiores a los aceptados para la alimentación de ganado vacuno.

El material conservado en silo bolsa mantuvo sus cualidades nutricionales después de 4 meses de almacenaje, no presentando rancidez o descomposición y siendo aceptado y consumido por los animales.

Se considera necesario complementar este ensayo con evaluaciones que aporten mayor información sobre posibles cambios que afecten la digestibilidad de este tipo de semilla (digestibilidad in vivo y/o in vitro).

Referencias

- Annis P.C. 1986. Towards rational controlled atmosphere dosage schedules: a review of current knowledge, pp 128 - 148. En: Donahaye E. y Navarro S. (Eds.). Proceedings of 4th Work Conference of Stored Product Protection, Tel Aviv, Israel.
- Balbuena O.; Kucseva C.D. y Stahringer R.C. 2005. Utilización de la semilla de algodón en la alimentación de bovinos para carne en la región chaqueña. Revista Idea 21: 69 - 72.
- Balbuena O., García P.; Kucseva C. y Stahringer R. 2006. Efecto de la suplementación invernal con diferentes niveles de semilla de algodón sobre la composición de la grasa en novillos. Información Técnica. INTA Colonia Benítez. XVI Reunión Latinoamericana de Producción Animal (ALPA), Facultad de Ciencias Veterinarias - UNNE; EEA INTA Colonia Benítez, Chaco, 48 p.
- Bartosik R.; Cardoso L.; Ochandio D. y Croce D. 2009. Detección temprana de procesos de descomposición de granos almacenados en bolsas plásticas herméticas mediante la medición de CO₂, pp. 15 - 21. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Bank H.J. y Annis P.C. 1980. Conversion of existing grain storage structures for modified atmosphere use, pp. 461 - 473. En: controlled atmosphere storage of grains Editorial Shejbal, Amsterdam, Holanda.
- Calsamiglia S. 1997. XIII Curso de especialización FEDNA, Madrid. Depto. de Patología y Producción. Animal, Universidad. Autónoma de Barcelona, España.
- Calsamiglia S. 1999. Nuevas bases para la utilización de la fibra en dietas para rumiantes. XV Curso de Especialización Avances en Nutrición y Alimentación Animal, FEDNA.
- Casini C. 2004. Guía para almacenar granos en bolsas plásticas. Información para divulgación. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina, 4 p.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.

- Clemente G; Casini C.; Pagliero M. y Quartucci J. 2002. Efecto de la temperatura exterior sobre la atmósfera interior del sistema silo - bag, durante el almacenamiento de granos. Disponible en: www.agrositio.com. Accedido en enero del 2010.
- Gaggiotti M.; Romero L.; Bruno O.; Comeron E. y Quaino O. 2001. Tabla de composición química de alimentos. Informe Técnico, Programa Requerimientos y Ración de Novillos. INTA EEA Rafaela, Centro Regional Santa Fe, Argentina.
- Hidalgo R.; Pozzolo O.; Barrionuevo C.; Ferrari H. y Curró C. 2006 a. Estudios de distintos factores incidentes en la calidad de arroz (*Oriza sativa*) conservado en bolsas plásticas. En: XVII Congreso Internacional de Plásticos Para la Agricultura - Comité Internacional de Plásticos en Agricultura - (CIPA) VIII Congreso Iberoamericano - Comité Iberoamericano para el Desarrollo y Aplicación de los Plásticos en Agricultura - (CIDAPA) I Congreso Argentino Comité Argentino de Plásticos para la Agricultura (CAPP), 23 - 25 de octubre, Buenos Aires, Argentina.
- Hidalgo R.; Arizaga J.; Pozzolo O. y Domínguez F. 2007. Estudios de distintos factores incidentes en la calidad del grano al conservar semillas de algodón (*Gossypium hirsutum*) en bolsas plásticas. VI Reuniones Científicas del NEA, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina.
- Kucseva C.; Balbuena O.; Slanac A.; Schreiner J.; Somma de Feré G.; Koza G. y Rochinotti D. 2001. Efecto de niveles de semilla de algodón en el suplemento sobre el consumo de heno en novillos. *Revista Argentina de Producción Animal*, 21(1): 5 - 6.
- Rodríguez J. y Bartosik R. 2000. Almacenaje de granos en bolsas plásticas. Ensayo de simulación. EEA INTA Balcarce. Argentina. Citado en www.elsitioagricola.com. Accedido en enero del 2010.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Cardoso, L. y Croce D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 589 - 592. En: *Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products*, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Romero L.; Giordano J.; Bruno O. y Gaggiotti M. 2001. Almacenamiento de semilla de algodón. Efecto del contenido de humedad y del agregado de un conservante. Informe Técnico, INTA Rafaela, Argentina.
- Siebenmorgen T.J.; Freer M.W.; Benz R.C. y Loewer O.J. 1986. Controlled atmosphere storage system for rice. *Paper ASAE*, 86 - 6511: 26.

3

Modelado

Simulación computacional de la difusión de gases en sistemas de almacenamiento hermético

Alien Arias Barreto¹
Rita Abalone^{1, 2}
Analía Gastón^{1, 2}

Resumen

Mediante un modelo 3D acoplado de transporte de energía y materia, (contenido de humedad, O₂ y CO₂) se determina la evolución de la temperatura y humedad de los granos almacenados en silo bolsa así como la difusión y evolución de la concentración de los gases de la atmósfera intergranaria. El sistema de ecuaciones resultantes fue implementado en COMSOL Multiphysics 4.2 y resuelto por el método de elementos finitos. Se analizaron condiciones altamente probables de ocurrir en el manejo de las bolsas en el campo como son el llenado del silo bolsa con granos a diferentes contenidos de humedad y la pérdida de integridad de la bolsa debido a roturas. Para distribuciones iniciales no uniforme del contenido de humedad de los granos, debido a la difusión en dirección longitudinal, se producen zonas de transición en donde el nivel de concentración aumenta significativamente respecto al de referencia. Sin embargo, este aumento no es el resultado de un proceso de deterioro de la zona en cuestión. Perforaciones de 10 mm de diámetro por metro de bolsa alteran significativamente la evolución de la concentración de O₂ y CO₂ pudiendo generarse focos importantes de deterioro. Este análisis aporta información básica para la implementación de un protocolo de monitoreo de las bolsas basado en la comparación del nivel de concentración de O₂ y CO₂ con valores de referencia.

Palabras clave: almacenamiento hermético, conservación, atmósfera automodificada, simulación numérica.

¹Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura. UNR, Rosario (Santa fe), Argentina.

²Instituto de Física Rosario (CONICET - UN Rosario), Rosario (Santa fe), Argentina.

³Carrera de Investigador Científico UNR, Rosario (Santa fe), Argentina.

Notación

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5	parametros de la ecuación de respiración, velocidad de producción de CO_2 , adimensional, $^{\circ}\text{C}^{-1}, \text{s}^{-1}, \text{s}^{-2}$, adimensional, respectivamente
A_s	área de intercambio de gases del silo bolsa por metro de silo bolsa, (m^2)
x, y	coordenadas cartesianas
c_b	calor específico del lecho de granos ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
d_m	velocidad del material seca consumida en la respiración aeróbica, en mg [materia seca] kg^{-1} [materia seca] en 24 h
D_{ef}	difusividad efectiva del vapor de agua en el lecho (m^2s^{-1})
D_i^*	difusividad efectiva de los gases a través del lecho, $i = \text{O}_2, \text{CO}_2$, (m^2s^{-1})
G	radiación solar incidente sobre la superficie del silo bolsa (Wm^{-2})
h_c	coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$)
k_b	conductividad térmica del lecho de granos ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
L_z	dimensión longitudinal del silo bolsa (m)
L_e	espesor del plástico del silo bolsa (m)
L_g	calor de desorción del agua en el grano (calor de vaporización) (Jkg^{-1})
M	contenido de humedad del grano (base húmeda, kg / kg grano húmedo)
M_{CO_2}	masa molecular del CO_2 , 44,0 gramos mol^{-1}
n	dirección normal
P_{atm}	presión atmosférica, 101325 Pa
P_{O_2}	permeabilidad del plástico al O_2 , $\text{m}^3\text{md}^{-1}\text{m}^{-2}\text{at}^{-1}$
P_{CO_2}	permeabilidad del plástico al CO_2 , $\text{m}^3\text{md}^{-1}\text{m}^{-2}\text{at}^{-1}$
P_i	permeabilidad efectiva del plástico, $i = \text{O}_2, \text{CO}_2$
q_H	calor de respiración, 10,7 $\text{J mg}^{-1} [\text{CO}_2]$
q_w	vapor de agua producido en la respiración, $4,1 \cdot 10^{-5} \text{ kg} [\text{H}_2\text{O}] \text{ mg}^{-1} [\text{CO}_2]$
r_{O_2}	velocidad de producción de O_2 , en $\text{m}^3\text{s}^{-1} \text{ kg}$ materia seca
r_{CO_2}	velocidad de producción de CO_2 , en $\text{m}^3\text{s}^{-1} \text{ kg}$ materia seca
R	constante universal de los gases, $8,3 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
t	tiempo (s)
T	temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
T_k	temperatura absoluta (K)
T_0	temperatura inicial de los granos ($^{\circ}\text{C}$)
V	volumen del lecho de granos, m^3
W_g	contenido de humedad del grano (base seca, kg / kg grano seco)
W_0	contenido de humedad inicial de los grano (base seca, kg / kg grano seco)
Y_{CO_2}	velocidad de producción de CO_2 , $\text{mg} [\text{CO}_2] \text{ kg}^{-1}$ [materia seca] en 24 h
CO_2	concentración de CO_2 , % V/V
O_2	concentración de O_2 , % V/V

Símbolos griegos

α	absortividad del silo bolsa
ε	porosidad (m^3 de aire/ m^3 de lecho)
Γ	frontera del dominio
ω	cambio de presión parcial p_v respecto al contenido de humedad, a temperatura constante, (Pa)
ρ_b	densidad del lecho de granos (kg grano húmedo/ m^3 del lecho)
ρ_{bs}	materia seca por volumen de lecho (kg grano seco / m^3 del lecho)
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$
ω	cambio de presión parcial p_v respecto a la temperatura, a contenido de humedad constante, (PaK^{-1})
ξ	emisividad del silo bolsa

Subíndices

a	aire intersticial
amb	ambiente
$cielo$	cielo
b	grano bulk
g	grano
0	inicial
$suelo$	suelo

Introducción

Ante el crecimiento de la producción granaria de los últimos 10 años en Argentina y la falta de capacidad de almacenamiento fijo, el silo bolsa ha adquirido gran difusión. En la campaña 2010, 40,0 millones de toneladas de granos fueron almacenados mediante este sistema.

Esta técnica consiste en el almacenamiento de granos en silo bolsas, donde el proceso respiratorio de los seres vivos del granel (ecosistema formado por granos, hongos, insectos, etc.) consume el oxígeno (O_2) y genera dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O) y libera energía. La constitución de esta nueva atmósfera, rica en CO_2 y pobre en O_2 , suprime, inactiva o reduce la capacidad de reproducción y/o desarrollo de insectos y hongos, como así también la propia actividad del grano, facilitando su conservación.

La concentración de los gases en los sistemas de almacenamiento en atmósferas automodificadas depende del balance entre la respiración del ecosistema, el ingreso de O_2 y la pérdida de CO_2 al medio ambiente debido a la permeabilidad de la cubierta plástica. A su vez, el ritmo de respiración es fuertemente dependiente del tipo, condición, temperatura y contenido de humedad del grano embolsado, de la concentración de O_2 y CO_2 de la atmósfera intergranaria y del tiempo de almacenamiento.

Recientemente, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Balcarce (INTA - EEA Balcarce) implementó una nueva tecnología para monitorear los silos bolsa (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008, Rodríguez et al., 2008). El procedimiento consiste en medir la concentración de CO_2 en algunos puntos de la bolsa y compararlos con un valor de referencia que indica condiciones adecuadas para el almacenamiento.

Analizar la evolución de la concentración de gases y el proceso de difusión dentro del silo bolsa para distintas condiciones de almacenamiento aporta un conocimiento básico para contribuir a definir un protocolo de monitoreo de los silos bolsas en cuanto a la localización de puntos de medición y frecuencia de muestreo. Con este propósito, se han desarrollado distintos modelos de simulación computacional para predecir la evolución de las variables relevantes relacionadas con la conservación de los granos. Gastón et al. (2009) presenta un modelo 2D para determinar la temperatura y contenido de humedad en función de las condiciones climáticas. Abalone et al. (2011 a, b) presenta un modelo global (*lumped*) para predecir la evolución de la concentración promedio de CO_2 y O_2 de la atmósfera intergranaria. Los mismos fueron validados comparando valores predichos con datos experimentales en experiencias a campo. Sin embargo, condiciones no uniformes de contenido de humedad inicial del grano embolsado limitan la aplicación de este último modelo (Abalone et al., 2011 c). Así mismo, no pueden analizarse efectos locales debidos a la infiltración de O_2 a través de perforaciones de la cobertura plástica. Ambas situaciones tienen alta probabilidad de ocurrencia en el almacenamiento a campo.

En el presente trabajo se extienden los modelos de simulación a 3D y se incorpora la difusión de los gases a las ecuaciones de balance. En particular el modelo se aplicó para:

1. Comparar las predicciones de la concentración de gases del modelo 3D con el modelo global.
2. Analizar la evolución de la concentración de los gases para distribuciones no uniformes del contenido de humedad de los granos embolsados.
3. Analizar la evolución de la concentración de los gases considerando perforaciones de distinto tamaño.

Materiales y metodos

Modelo físico. Silo bolsas

Los silos bolsa tienen 2,7 m de diámetro y 60,0 m - 75,0 m de largo, pudiéndose almacenar aproximadamente unas 200,0 toneladas de grano (Figura 1). La estructura de la bolsa está compuesta por capas de polietileno de alta (HDPE) y baja (LDPE) densidad y su espesor promedio es de 240 micrones. La cubierta interior es de color negro y la exterior de color blanco con estabilizadores para los rayos ultravioletas. En general los productos guardan su grano durante seis u ocho meses aunque las bolsas son diseñadas para una duración máxima de 2 años.

La Figura 2 muestra la aproximación propuesta de la geometría del silo bolsa, el dominio de cálculo Ω y su frontera Γ . Γ_1 representa la cubierta superior a través de la cual intercambia energía y masa (CO_2 y O_2) con el medio ambiente, Γ_2 la base impermeable a la transferencia de gases, Γ_3 las secciones transversales del silo bolsa. Dependiendo del

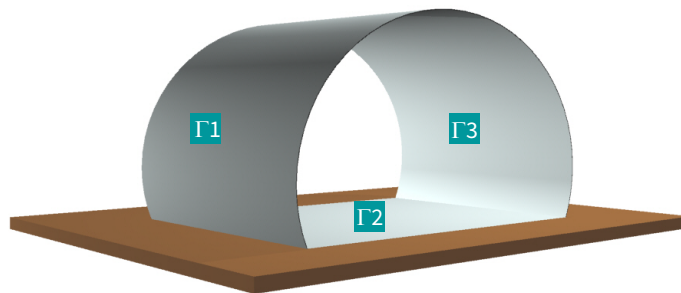
caso a analizar, sobre esta superficie se consideran condiciones de simetría o aislación a los efectos de despreciar efectos de borde.



Figura 1.
Almacenamiento de granos a campo en silos bolsa.

Figura 2.

DOMINIO DE CÁLCULO



Modelo matemático. Balance de energía y materia

Se introducen las siguientes hipótesis en la modelización del transporte de energía, de contenido de humedad del grano, de O_2 y CO_2 en el aire intergranario:

1. Se considera el lecho de granos ensilados como un continuo, con las fases aire y grano distribuidas uniformemente
2. En cada punto del lecho el aire intergranario se encuentra en equilibrio térmico y sorpcional con la masa de granos
3. Los gases se comportan como gases ideales

4. Se considera que la porosidad se mantiene constante
5. No existe producción de CO₂ debido a la respiración de insectos
6. La sorpción de CO₂ es despreciable
7. La masa de granos ocupa todo el volumen del silo bolsa. No existe un volumen libre de aire entre la superficie interior de los granos y la cobertura plástica, que pueda ser el resultado de un llenado defectuoso
8. No se incluye en la transferencia de energía y masa por convección

Planteando el balance de energía y materia en un volumen de control se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones, válido en el dominio de cálculo Ω (Figura 2):

$$c_b \rho_b \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_b \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_b \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \rho_b L_g \frac{\partial W_g}{\partial t} + \rho_{bs} q_H Y_{CO_2} \quad 1$$

$$\rho_b \frac{\partial W_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial x} + \omega \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial y} + \omega \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial z} + \omega \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \rho_{bs} q_w Y_{CO_2} \quad 2$$

$$\varepsilon \frac{\partial CO_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{CO_2}^* \left(\frac{\partial CO_2}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{CO_2}^* \left(\frac{\partial CO_2}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{CO_2}^* \left(\frac{\partial CO_2}{\partial z} \right) \right] + \rho_{bs} r_{CO_2} \quad 3$$

$$\varepsilon \frac{\partial O_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{O_2}^* \left(\frac{\partial O_2}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{O_2}^* \left(\frac{\partial O_2}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{O_2}^* \left(\frac{\partial O_2}{\partial z} \right) \right] + \rho_{bs} r_{O_2} \quad 4$$

donde T , en K, es la temperatura del grano, W_g , en base seca (bs), es el contenido de humedad del grano (CH), O_2 y CO_2 , en % V/V, son la concentración de oxígeno y dióxido de carbono en el aire intergranario, ε es la porosidad, ρ_{bs} , en kg m⁻³, es la densidad de lecho seco, c_b , en Jkg⁻¹K⁻¹, es el calor específico del lecho, k_b , en Wm⁻¹K⁻¹, es la conductividad térmica del lecho, D_w es un parámetro relacionado con la difusividad efectiva del vapor de agua en el lecho, L_g , en Jkg⁻¹, es el calor latente de vaporización de la humedad en el grano, η , en Pa, es el cambio en la presión parcial debido al cambio en MC manteniendo la temperatura constante, ω , en PaK⁻¹, es el cambio en la presión parcial debido a un cambio en la temperatura manteniendo MC constante y D_i^* , en m²s⁻¹ (con $i = CO_2, O_2$), es la difusividad efectiva a través de aire intergranario del dióxido de carbono y oxígeno, evaluado de acuerdo a Geankoplis (1998).

Los últimos términos de las ecuaciones (1) a (4) contabilizan la energía liberada, el vapor de agua producido, el CO₂ generado y O₂ consumido en el proceso de respiración de los granos. Este proceso se modeló considerando la combustión completa de un carbohidrato típico, de lo que resulta q_H igual a 10,7 Jmg⁻¹[CO₂], q_w igual 4,1 10⁻⁵ kg[H₂O]mg⁻¹[CO₂], siendo Y_{CO_2} la velocidad de producción de CO₂ en mg[CO₂]s⁻¹kg⁻¹[materia seca]. La velocidad de producción de CO₂, r_{CO_2} en m³s⁻¹kg⁻¹[materia seca], se calcula mediante la siguiente expresión:

$$r_{CO_2}(t) = \frac{Y_{CO_2}(t)}{1000M_{CO_2}} \frac{RT_k}{P_{at}}; \quad r_{O_2} = r_{CO_2} \quad 5$$

siendo R la constante universal de los gases, T_k , en K, la temperatura absoluta y M_{CO_2} , en $Kgmol^{-1}$, la masa molecular del dióxido de carbono.

White et al. (1982) midió la cantidad de dióxido de carbono liberado por distintos cereales en la respiración, estableciendo modelos que pueden representarse mediante la siguiente expresión:

$$\log Y_{CO_2} = a_1 + a_2 T_c + a_3 \theta + a_4 \theta^2 + a_5 M \quad \mathbf{6}$$

en donde θ en días, es el tiempo de almacenamiento, T_c en °C es la temperatura del grano y M el contenido de humedad en base húmeda % bh.

El valor local de la energía liberada y del vapor de agua producido por respiración, ecuaciones (1) y (2), puede calcularse para cada punto del silo bolsa si se conoce la temperatura y el contenido de humedad. Sin embargo, como la ecuación (6) no depende en forma explícita del nivel de concentración de CO_2 y O_2 de la atmósfera dentro de la bolsa, el proceso de transporte de estos gases en el espacio intergranario no influye en los valores locales de la temperatura y el contenido de humedad. Existen en la literatura, otras correlaciones de respiración para productos biológicos como frutas y hortalizas (Fonseca et al., 2001; Song et al., 2002) que si dependen explícitamente de la concentración de O_2 y CO_2 . Actualmente se está trabajando para obtener este tipo de correlaciones para los granos.

Finalmente cabe mencionar que la ecuación (6) contabiliza la producción de CO_2 debido a la actividad biológica de los granos y la microflora. Otra posible fuente de CO_2 proviene de la respiración de los insectos del granel. En el caso de los silos bolsas, el grano se cosecha y se embolsa directamente en el campo, por lo que está libre de infestación. Esta es más común, cuando el grano se almacena en los sistemas convencionales (silos metálicos, celdas, etc.).

Una deducción de las ecuaciones (1) y (2) así como la definición de los parámetros D_w , η , ω , L_g , puede consultarse en Abalone et al. (2006) y Gastón et al. (2009).

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno asociadas a las ecuaciones (1) a (4) son:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T - T_{amb}) + \alpha G - \xi \sigma (T^4 - T_{cielo}^4) \quad \text{en } \Gamma_1 \quad \mathbf{7}$$

$$T = T_{suelo}(x, 0, z, t) \quad \text{en } \Gamma_2 \quad \mathbf{8}$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, 0, t)}{\partial n} = -k \frac{\partial T(x, y, L_z, t)}{\partial n} = 0 \quad \text{en } \Gamma_3 \quad \mathbf{9}$$

$$\eta D_{ef} \frac{\partial W_g}{\partial n} = -\omega D_{ef} \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{en } \Gamma \quad \mathbf{10}$$

$$-D_{CO_2}^* \frac{\partial CO_2}{\partial n} = \frac{P_{CO_2} P_{atm}}{L_e} (CO_2 - CO_{2out}) = h_{CO_2} (CO_2 - CO_{2out}) \quad \text{en } \Gamma_1 \quad \mathbf{11}$$

$$-D_{O_2}^* \frac{\partial O_2}{\partial n} = \frac{P_{O_2} P_{atm}}{L_e} (O_2 - O_{2out}) = h_{O_2} (O_2 - O_{2out}) \quad \text{en } \Gamma_1 \quad \mathbf{12}$$

La condición (10) implica que el silo bolsa es hermético a la transferencia de humedad.

En las ecuaciones (11) y (12) P_{atm} en Pa, es la presión atmosférica, L_e en m, es el espesor de la capa plástica del silo bolsa, P_{O_2} en $m^3ms^{-1}m^{-2}at^{-1}$ es la permeabilidad equivalente al O_2 y P_{CO_2} al CO_2 de la capa plástica. Estas permeabilidades se estiman considerando un modelo de resistencias en serie dado que el silo bolsa está compuesto por capas de HDPE y LDPE (Abalone et al., 2011 a, b):

$$P_i = \frac{2P_{HD} P_{LD}}{P_{HD} + P_{LD}} \quad ; \quad i = CO_2, O_2 \quad 14$$

Cuando se considera que la superficie Γ_1 presenta una perforación, sobre el área de la misma se imponen condiciones de contorno tipo Dirichlet para la concentración de CO_2 y O_2 .

Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales correspondientes a las ecuaciones (1) y (2) son:

$$T(x, y, z, t=0) = T_0(x, y, z) \quad 15$$

$$W_g(x, y, z, t=0) = W_0(x, y, z) = f(z) \quad 16$$

Como el silo bolsa se encuentra al aire libre y contiene aire en su interior, para las ecuaciones (3) y (4) se tiene:

$$O_{2i}^0(x, y, z, t=0) = 0,21 \quad ; \quad CO_{2i}^0(x, y, z, t=0) = 0,003 \quad 17$$

$$O_{2out} = 0,21 \quad ; \quad CO_{2out} = 0,003 \quad 18$$

Solución numérica

El modelo matemático fue implementado en COMSOL Multiphysics 4.2 y resuelto numéricamente usando el Método de Elemento Finito. La discretización se realizó con una malla no estructurada con una densificación sobre la frontera del dominio, donde se concentran los mayores gradientes de temperatura, humedad y concentración de O_2 y CO_2 . Se emplearon elementos tetraédricos cuadráticos y un esquema de integración de cuatro puntos de Gauss.

Para la resolución del sistema de ecuaciones se empleó el método iterativo GMRES (Generalized Minimum RESidual). El número máximo de iteraciones por espacio de tiempo fue fijado en 10^4 y la tolerancia relativa se mantuvo en el valor 0,01, que por defecto propone el programa para ambos parámetros. El GMRES tiene la ventaja en comparación con los demás métodos iterativos disponibles en COMSOL de que aunque requiere más memoria y tiempo de cálculo arroja resultados más robustos.

Resultados obtenidos

Casos analizados

El modelo fue aplicado para simular el almacenamiento de granos de trigo desde enero a julio para las condiciones climáticas de la zona de Balcarce, provincia de Buenos

Aires. Se consideró una temperatura inicial de embolsado del grano de 25,0 °C, típica de esta zona agrícola y otra excepcionalmente elevada de 40,0 °C y humedades iniciales en el rango 12,0 - 16,0% bh (base húmeda).

Tomando los valores reportados por Osborn et al., (1992), para las permeabilidades al oxígeno y dióxido de carbono del HDPE y LDPE y aplicando la ecuación (12), resulta $P_{O_2} 9,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ md}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$ y $P_{CO_2} 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ md}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$. Para un espesor promedio de 240 μm la permeancia al O_2 es $4,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$ y al CO_2 $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$.

Los valores encontrados en la literatura para el coeficiente de difusión efectivo del dióxido de carbono a través de un lecho de trigo varían entre $3,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Ileleji et al., 2006) a $7,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Shunmugan et al., 2005). Para este trabajo se consideró $D_{CO_2}^*$ igual a $4,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y $D_{O_2}^*$ igual a $5,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ de acuerdo a los valores de tortuosidad y porosidad del lecho que figuran en la Tabla 1.

En la Tabla 1 se listan los parámetros del lecho de trigo empleados en este trabajo.

Tabla 1. Propiedades del grano y lecho de trigo.	
PROPIEDAD	EXPRESIÓN
Densidad del lecho de trigo [kgm^{-3}]	$\rho_b=824$
Porosidad del lecho	$\varepsilon=0,3$
Cond. térmica del grano de trigo [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	$k_g=0,1+0,68W$
Calor esp. de grano de trigo [$\text{Jkg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	$c_g=1300+0,4W$
Ecuación de Henderson [Pa]	$k_h=2,3 \cdot 10^{-5}$; $C_h=55,8$ $N=2,2857$
CO_2 producido por respiración, $\text{mg [CO}_2\text{] /kg [materia seca]}$ en 24 hs.	$\alpha_1=-4,0$; $\alpha_2=0,0$; $\alpha_3=-0,1$; $\alpha_4=0,0$; $\alpha_5=0,2$
Tortuosidad	$\tau=1,53$

Evolución de la concentración de gases. Distribución inicial uniforme de temperatura y contenido de humedad de los granos

Para condiciones iniciales uniformes, las ecuaciones (15) y (16) se reducen a $T(x, y, z, t=0)=T_0$ y $W_g(x, y, z, t=0)=W_0$. Por otro lado, dado que la radiación solar incidente es independiente de la dirección longitudinal del silo bolsa (salvo en los extremos del silo generando efectos de borde que no se consideran en este trabajo), este problema se reduce a un análisis 2D.

La Figura 3 muestra, para una sección transversal del silo bolsa en el plano xy , perfiles típicos de temperatura (a), contenido de humedad (b) y producción de CO_2 (c). Los mismos corresponden a las peores condiciones de almacenamiento, es decir, grano húmedo y caliente a 16,0% bh y 40,0 °C, al mediodía del primer y décimo día de almacenamiento.

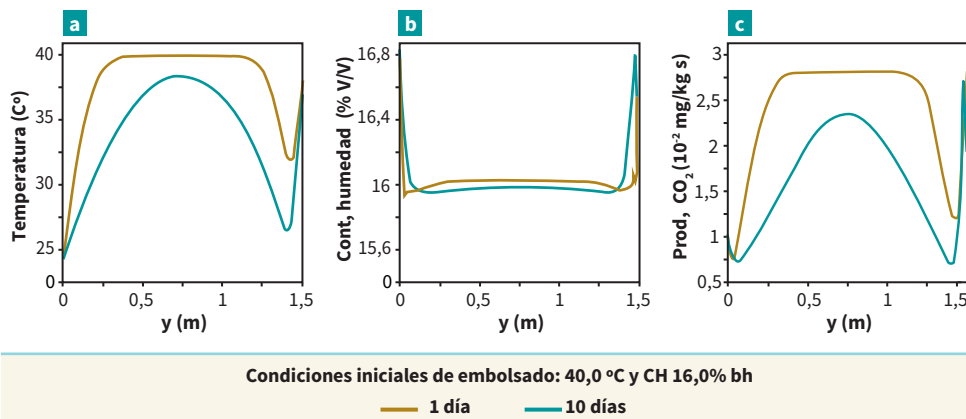
Las fluctuaciones de temperatura en respuesta a las condiciones climáticas se concentran en una capa de unos 30,0 cm debajo de la superficie (Figura 3 a). En el centro, a pesar de la energía liberada durante la respiración no se registra un aumento de la temperatura debido a que la razón (área de intercambio/ volumen del silo bolsa) resulta elevada (Gastón et al., 2009). La migración de la humedad hacia la base y superficie de la

bolsa, opuesta a los gradientes de temperatura, resulta del orden de 1,0% bh (Figura 3 b). La velocidad de producción de CO₂ sigue el comportamiento de la distribución de la temperatura (Figura 3 c).

La Figura 4 muestra las correspondientes distribuciones de O₂ y CO₂. A pesar que en la zona central la respiración es de dos a tres veces más intensa que en la periferia de la bolsa, los gradientes de concentración son del orden de 0,05%V/V/m, como consecuencia del transporte por difusión.

Para cada paso de tiempo, integrando la distribución local de O₂ y CO₂ en Ω se determinó la evolución de la concentración promedio. Los resultados para (40,0 °C - 12,0% bh) y (40,0 °C - 16,0% bh) se presenta en la Figura 5. La misma incluye las evoluciones predichas con el modelo global (Abalone et al., 2011 a, b) para las mismas condiciones. Esta comparación permite cuantificar el efecto de promediar los gradientes de temperatura y humedad en la evaluación del término fuente de consumo de O₂, que es fuertemente dependiente de estas variables. El modelo global emplea la temperatura promedio y el contenido inicial de humedad en la ecuación (5), mientras que el modelo 3D valores locales. Para grano seco (12,0% bh) las diferencias son despreciables mientras que para grano húmedo resultan menores a 1,0% V/V.

Figura 3. Perfil de temperatura(a), contenido de humedad (b) y velocidad de respiración (c) en dirección vertical para una sección transversal del silo bolsa.



De este conjunto de resultados pueden obtenerse varias conclusiones relacionadas a la implementación de un protocolo de monitoreo de las bolsas. Gradientes de concentración del orden de 0,05% V/V/m difícilmente sean medibles en las bolsas en el campo, por lo que a los fines prácticos, puede considerarse que la distribución es uniforme. Desde el punto de vista teórico, esta distribución uniforme es previsible dado que la razón de la resistencia interna/resistencia externa a la transferencia de gases ($B=Vh_i/AD^*_i$, $i=O_2, CO_2$) resulta del orden de 10^{-4} .

En concordancia con esta predicción teórica, en las experiencias realizadas a campo no se detectó una estratificación de las concentraciones en el eje vertical de los silo bolsa

Figura 4.

Perfil de concentración de CO_2 y O_2 en dirección vertical para una sección transversal del silo bolsa al cabo de un día (a) y 10 días (b) de almacenamiento.

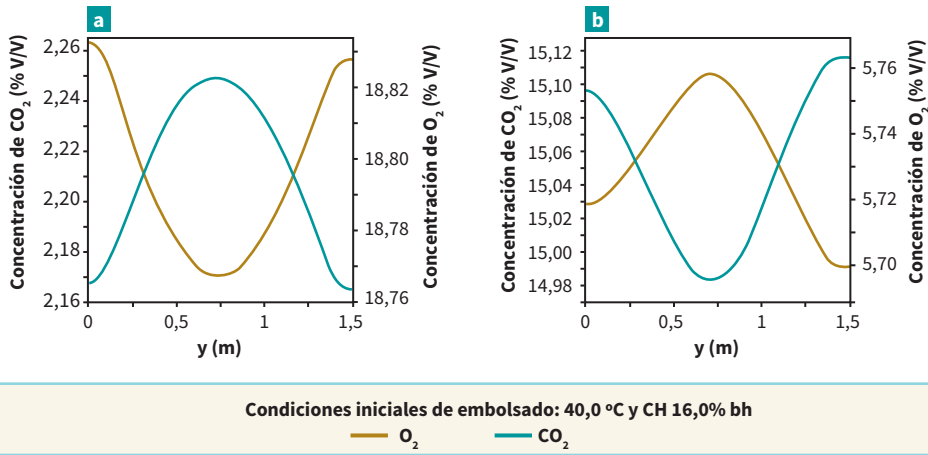
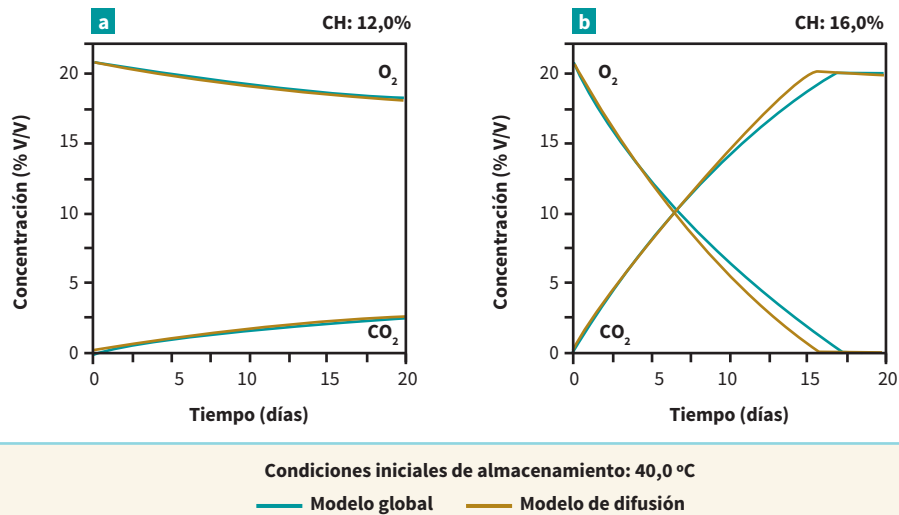


Figura 5.

Comparación de la evolución de la concentración media O_2 y CO_2 predicha con el modelo global y el modelo 3D.



(Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008). Este comportamiento juega a favor de la adopción de un protocolo de monitoreo de las bolsas, basado en el nivel de CO_2 . Para una dada sección transversal de la bolsa, el muestreo en uno o dos lugares debajo de la superficie (valores locales de la concentración) serían suficientes para reunir información sobre el estado de conservación del grano, ya que si bien la zona afectada (por ejemplo un foco con mayor generación de CO_2 en la base del silo) puede no ser la zona testeada, su efecto rápidamente se difunde hacia esta última.

Dado que la evolución de la concentración en cualquier punto de la bolsa (valor local) resulta prácticamente coincidente con la evolución promedio, puede concluirse que para distribuciones uniformes del contenido de humedad y la temperatura, el modelo global, más simple, puede emplearse para generar las curvas de referencia para las distintas condiciones de almacenamiento según la zona agrícola. Diferencias del orden de 1,0% V/V entre el modelo global y 3D son del mismo orden de magnitud que los errores experimentales involucrados en las mediciones de la concentración de los gases en las bolsas en el campo.

Evolución de la concentración de gases. Efecto de una distribución inicial no uniforme de contenido de humedad de los granos

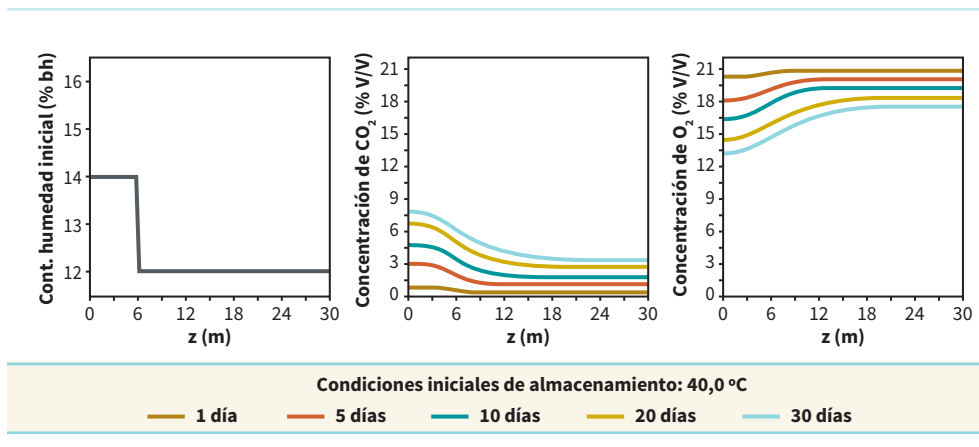
El llenado de un silo bolsa (200,0 toneladas) se realiza cargando grano proveniente de tolvas de aproximadamente 20,0 toneladas de capacidad. Por diversos factores, el contenido de humedad de los granos de una tolva a otra puede variar de 2,0% a 4,0% bh. Para simular una distribución inicial con estas características y analizar la evolución de la concentración en la dirección longitudinal del silo bolsa, se propuso una función tipo escalón $W_g(x, y, z, t=0)=f(z)$ (ecuación (16)), combinando valores correspondientes a grano húmedo y seco: 12,0 m del silo bolsa a 16,0% bh y el resto a 12,0% bh; 12,0 m a 14,0% bh y el resto a 12,0% bh.

Por simetría, la Figura 6, correspondiente a media bolsa, muestra la condición inicial de almacenado (a), la concentración de CO₂ (b) y la de O₂ (c) en la dirección longitudinal del silo bolsa, para la combinación 14,0% - 12,0% bh y la Figura 7 para 16,0% - 12,0% bh. En ambos casos, la temperatura inicial fue de 40,0 °C.

En ambos gráficos se observa una zona de “transición”, debido a la difusión, donde los valores de concentración son sustancialmente diferentes a los correspondientes a un embolsado uniforme fijados como referencia (ver Tabla 2). Para la condición 14,0% - 12,0% bh, la longitud es del orden de 6,0 m, mientras que para 16,0% - 12,0% bh del orden de 12,0 m.

Estos resultados muestran la importancia de llevar un registro de las humedades de embolsado a lo largo del silo bolsa, a fin de realizar una correcta interpretación de los valores medidos durante el monitoreo. En este caso, los valores más elevados de CO₂ en

Figura 6. Perfil de concentración de CO₂ y O₂ para la distribución inicial 14,0% - 12,0% bh.



la zona de transición no son el resultado de un proceso de deterioro, sino del transporte desde la zona húmeda a la seca. Por otro lado, si no existe un registro de humedades iniciales por tolva, realizando un monitoreo temprano (5 días después de embolsado) con un espaciamiento de unos 6,0 m entre puntos de muestro podría detectarse el llenado no uniforme. En la Tabla 2 se presentan los valores de referencia para 16,0%, 14,0% y 12,0% bh y los correspondientes a zonas extremas del silo bolsa. Al cabo de un mes de embolsado, los cambios en estas zonas son del orden del 1,0% V/V. Si sólo se testea el silo en el extremo seco a 12,0% bh, diferencias de esta magnitud son comparables a los errores en las mediciones a campo, por lo que la presencia de zonas húmedas factibles de deterioro, podrían no ser detectadas.

Figura 7. Perfil de concentración de CO₂ y O₂ para la distribución inicial 16,0%-20,0% bh.

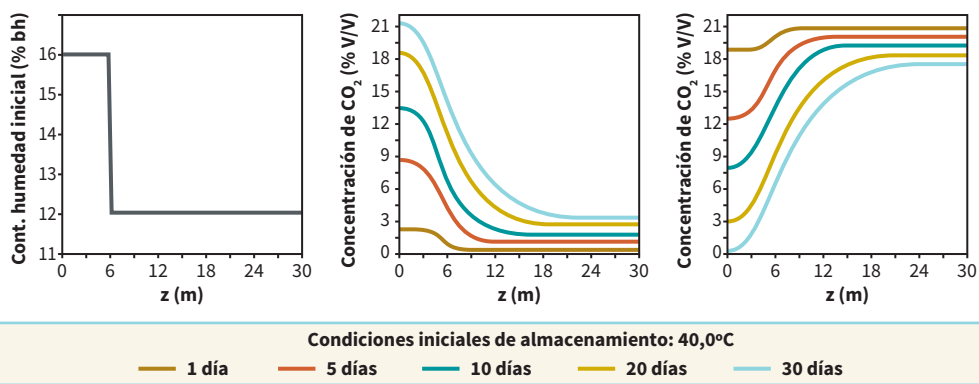


Tabla 2. Comparación del nivel de O₂ y CO₂ para una distribución de humedad uniforme y una tipo escalón.

CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL	O ₂ (% V/V) 10 DÍAS	O ₂ (% V/V) 30 DÍAS	CO ₂ (% V/V) 10 DÍAS	CO ₂ (% V/V) 30 DÍAS
16,0%	8,4	0,0	12,4	19,5
14,0%	16,7	13,8	4,2	6,8
12,0%	19,5	18,5	1,5	2,3
16,0% - 12,0%				
Zona a 16,0% entre 0 ≤ z ≤ 6,0m (z=3,0m)	9,0	1,6	12,1	19,5
Zona a 12,0% entre 15 ≤ z ≤ 30,0m	19,3	17,5	1,7	3,3
14,0% - 12,0%				
Zona a 14,0% entre 0 ≤ z ≤ 6,0m (z=3,0m)	16,7	13,5	4,4	7,4
Zona a 12,0% entre 15,0 ≤ z ≤ 30,0m	19,3	17,5	1,7	3,3

Evolución de la concentración de gases. Efecto de perforaciones de la cobertura plástica

El intercambio de gases intergranarios con el medio ambiente depende de la permeabilidad del silo bolsa. La misma es función del espesor y de la combinación de tipo de

polietileno fijada en el proceso de fabricación. Por otro lado, una inspección cuidadosa de los silos bolsas en el campo, revela la presencia de pequeñas perforaciones producidas por animales o rastrojo. Este daño puede cambiar significativamente la permeabilidad efectiva (cobertura plástica + perforaciones), modificando la evolución de la concentración de los gases así como generando zonas localizadas donde la combinación del oxígeno disponible para la respiración, temperatura y humedad relativa intergranaria sean propicias para el deterioro del grano.

Dado que la presencia de estas perforaciones es aleatoria, es difícil caracterizar la permeabilidad efectiva de las bolsas en el campo. A fin de estimar la magnitud de los cam-

Figura 8.

Comparación de la evolución de la concentración promedio de O_2 y CO_2 para un silo bolsa sin perforaciones y con una perforación de 3 mm, 5 mm y 10 mm de diámetro, 13,0% bh y 25,0 °C.

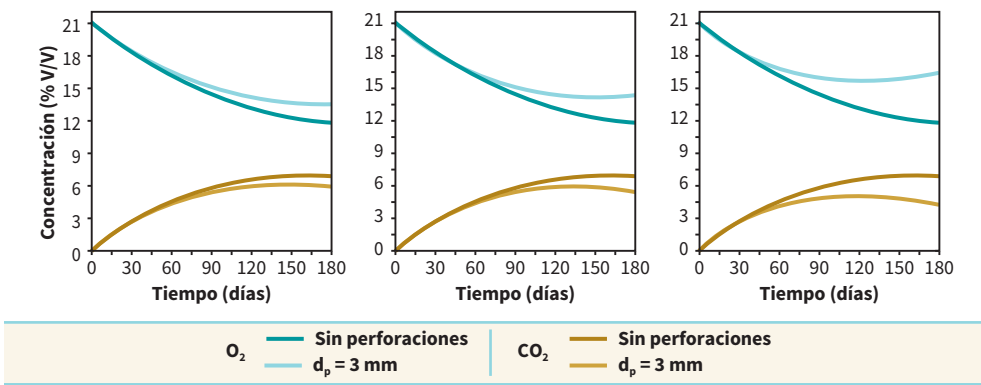
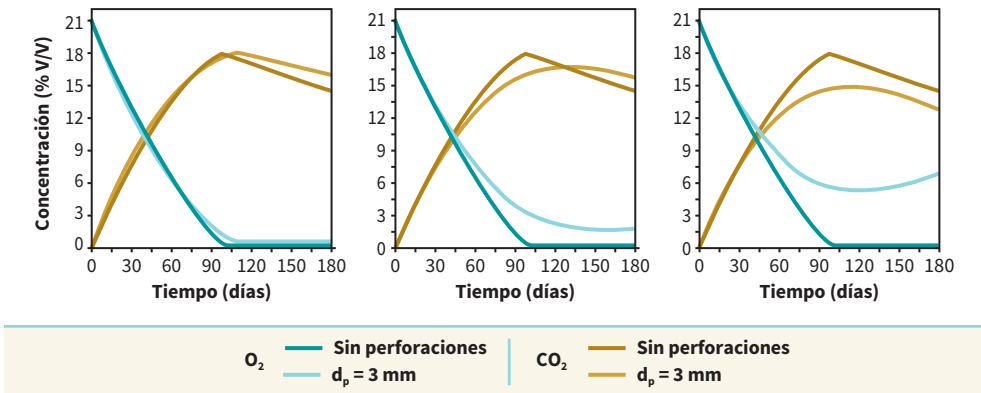


Figura 9.

Comparación de la evolución de la concentración promedio de O_2 y CO_2 para un silo bolsa sin perforaciones y con una perforación de 3 mm, 5 mm y 10 mm de diámetro, 15,0% bh y 25,0 °C.



bios de concentración que éstas pueden producir, se simuló la evolución de la concentración en un silo con perforaciones de distinto diámetro y se compararon los resultados con los de un silo bolsa sin perforaciones (caso base). Se consideraron perforaciones de 3, 5 y 10 mm de diámetro por metro de silo bolsa, semejantes a las producidas por el rastrojo en el campo. Se consideró trigo a 13,0% bh y a 15,0% bh, embolsado con una temperatura inicial de 25,0 °C.

La Figura 8 muestra los resultados para 13,0% bh. A mayor diámetro de la perforación, mayor la diferencia con respecto al caso base. La concentración de CO₂ disminuye 0,8%, 1,0% y 2,0% V/V, mientras que la del O₂ aumenta 1,5%, 2,0% y 4,5% V/V al cabo de 180 días

Figura 10.

Distribución de O₂ alrededor de una perforación de 10 mm de diámetro, en el plano yz, al cabo de 180 días para grano a 13,0% bh.

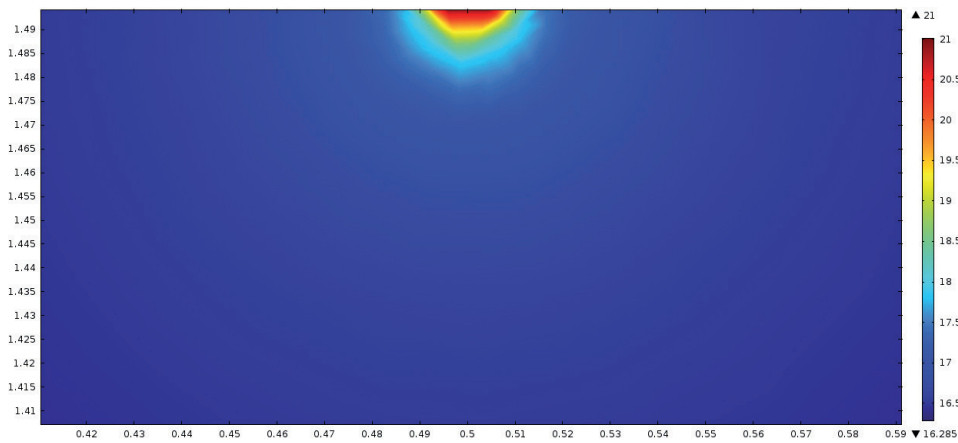
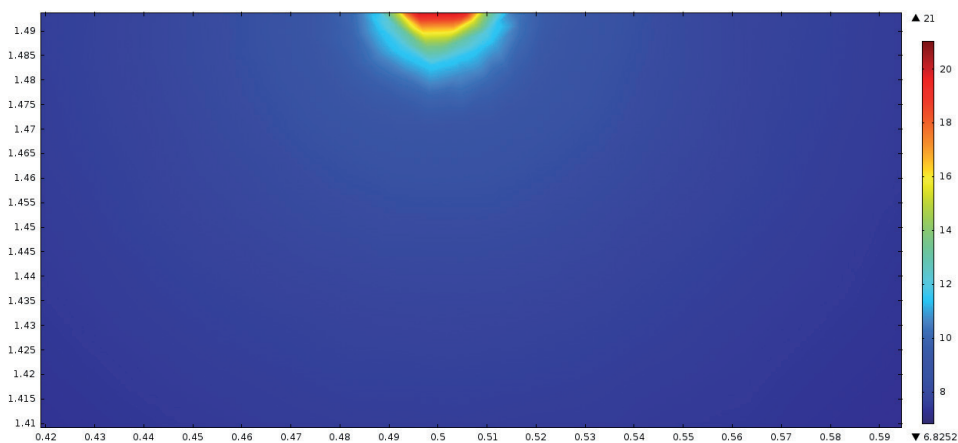


Figura 11.

Distribución de O₂ alrededor de una perforación de 10 mm de diámetro, en el plano yz, al cabo de 180 días para grano a 15,0% bh.



para una perforación por metro de silo de 3, 5, 10 mm de diámetro, respectivamente. La Figura 9 muestra los resultados para 15,0% bh con cambios muy significativos con respecto al caso base, con diferencias máximas de 2,0% V/V para el CO₂ y 6,0 % V/V para el O₂.

Tanto para grano seco como húmedo, con una perforación de 10 mm de diámetro por metro de silo bolsa, el nivel de O₂ comienza a aumentar durante la última etapa (120 - 180 días). Esto se debe a que a medida que avanza el invierno, al disminuir la temperatura del grano decrece la velocidad de respiración y el ingreso de O₂ resulta mayor que el consumo. En el silo húmedo sin perforaciones siempre el consumo resulta mayor que el ingreso de O₂, alcanzándose la condición de anaerobiosis favorable para la conservación a cabo de los 90 días. La disponibilidad de O₂ en una bolsa húmeda aumenta el riesgo de deterioro del grano porque la actividad biológica de la microflora podría reactivarse. Así mismo, al continuar respirando aumentará la pérdida de materia seca del grano, pudiendo superarse límites admisibles para el empleo del grano para semilla (Abalone et al., 2011 b). Para las perforaciones de 3 mm y 5 mm, la Figura 9 (a, b) muestra que los niveles de O₂ se mantienen por debajo del 1,5% V/V, cercano a la condición de anaerobiosis.

Para la perforación de 10,0 mm de diámetro, la Figura 10 y la Figura 11 muestran una zona de unos 10cm de radio donde el O₂ es superior a 17,0% y a 10,0% V/V, para grano a 13,0% bh y a 16,0% bh, respectivamente. Una eventual infiltración de agua aumentará el contenido de humedad y con esto la humedad relativa del aire intergranario, resultando este sector un foco de deterioro.

Conclusiones

Mediante la aplicación de un modelo 3D acoplado de transporte de energía y masa se analizó la evolución de la concentración de O₂ y CO₂ en un silo bolsa. Las principales conclusiones que se obtienen de este estudio en relación a la implementación de un protocolo de monitoreo de las bolsas basado en la comparación del nivel de CO₂ con valores de referencia son las siguientes:

1. Para condiciones de embolsado homogéneas en temperatura y humedad, la concentración de los gases en toda la bolsa es uniforme. En este caso, para las condiciones más adversas de embolsado (grano húmedo y caliente), las predicciones del modelo 3D difieren a lo sumo en 1,0% V/V respecto del modelo global. Para construir las curvas de referencias para un amplio rango de condiciones iniciales y zonas agroclimáticas puede emplearse el modelo global, más simple.
2. Es conveniente tener un registro del contenido de humedad de cada tolva o tanda de granos que se embolsa. Debido a la difusión en dirección longitudinal se producen zonas de transición en donde el nivel de concentración aumenta significativamente respecto al de referencia. Sin embargo, este aumento no es el resultado de un proceso de deterioro de la zona en cuestión.
3. De no contar con este registro, un testeo espaciado unos 6,0 m a lo largo de la bolsa dentro de los primeros días de embolsado permite obtener información respecto a la distribución de humedades iniciales a lo largo de la bolsa.
4. Una perforación de 10 mm de diámetro por metro de bolsa altera significativamente la evolución de la concentración de O₂ y CO₂. Para grano con humedades

superiores a 15,0% bh y a alta temperatura, los niveles de O₂ son superiores al 6,0% V/V y la actividad biológica de la microflora podría reactivarse.

Reconocimientos

Los autores agradecen a las siguientes Instituciones: ANPCYT/FONCYT (PICT 2008 0460), Universidad Nacional del Rosario (PID ING295) y al INTA - PRECOP Proyecto: Eficiencia en la Postcosecha, por el financiamiento del presente trabajo.

Referencias

- Abalone R.; Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2011 a. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part I: Model development and validation. *J. Stored Prod. Res.*, 47: 268 - 275. doi: 10.1016/j.jspr.2011.05.004
- Abalone R.; Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2011 b. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part II: Model sensitivity and effect of grain storage conditions. *J. Stored Prod. Res.*, 47: 268 - 275. doi: 10.1016/j.jspr.2011.05.003
- Abalone R. y Gastón A. 2011 c. Mathematical modelling of oxygen and carbon dioxide concentration profiles in the interstitial atmosphere of silo - bags, pp. 1 - 9. En: Proc. of XXXIV CIOSTA CIGR V Conference 2011. Efficient and safe production processes in sustainable agriculture and forestry.
- Abalone R.; Gastón A.; Cassinera A. y Lara M. 2006. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica Computacional*, 24: 233 - 247.
- Bartosik R.; Cardoso M.L. y Rodríguez J. 2008. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo - bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Fonseca S.; Oliveira F. y Brecha J. 2002. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *J. Food. Eng.*, 52: 99 - 119.
- Gastón A.; Abalone R.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2009. Mathematical modelling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo - bags). *Biosystems Eng.*, 104: 72 - 85.
- Geankoplis C. 1998. Transport processes and unit operations, 3^{er} Ed., CECSA, México.
- Ileleji K.; Maier D.; Blat C. y Woloshuk C. 2006. Detection of a developing hot spot in stored corn with a CO₂ sensor. *Applied Engineering in Agriculture*, 22: 275 - 289.

- Navarro S.; Donahaye, E y Fishman S. 1994. The future of hermetic storage of dry grains in tropical and subtropical climates, pp. 130 - 138. En: Proc. of the 6th Int. Working Conference on Stored - Product Protection.
- Osborn K.R. y Jenkins W.A. 1992. Plastic films. Technology and Packaging Applications. Thecnomic Publisihing Co, Lancaster, Penn.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Cardoso L. y Croce D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 589 - 592. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Shunmugam G.; Jayas D.; White N. y Muir W. 2005. Diffusion of carbon dioxide through grain bulks. *J. Stored Prod. Res.*, 41: 131 - 144.
- Song Y.; Vorsa N. y Yam K. 2002. Modeling respiration – transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry. *J. of Food Eng.*, 53: 103 - 109.
- White N.; Sinha R. y Muir, W. 1982. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Can. Agric. Eng.* 24: 35 - 42.

Concentración de gases en la atmósfera intersticial de un silo bolsa con trigo

Parte I: desarrollo y validación del modelo

Rita Abalone¹
Analia Gastón¹
Leandro Cardoso²
Ricardo Bartosik²
Juan Rodríguez²

Resumen

El silo bolsa es un sistema de almacenamiento hermético de grano seco ampliamente adoptado en Argentina con una capacidad de aproximadamente 200,0 toneladas. En este trabajo se empleó un modelo de transferencia de calor y masa que predice la temperatura y el contenido de humedad (CH) en función de las condiciones climáticas. En combinación con una ecuación diferencial global de capacidad concentrada para la transferencia de gases se pudo simular el intercambio gaseoso en los silos bolsas. La velocidad de producción de CO₂, dependiente de las variables: temperatura del grano, contenido de humedad y tiempo de almacenamiento, se evaluó mediante la correlación desarrollada por White et al. (1982) para trigo. El modelo se aplicó considerando las condiciones climáticas del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, durante un período de almacenamiento de 6 meses, a partir del verano (enero) hasta el invierno (julio). La concentración de gases en silos bolsas predicha por el modelo para el rango de 12,0% – 15,0% de CH fue comparada con los datos disponibles de una serie de experimentos de campo. Para el CO₂, el desvío estándar (SE) incrementó de 1,2 puntos % en el rango seco de CH (12,0% a 13,5%) hasta el 2,7 puntos % en el rango húmedo (14,0% – 15,0%). Para el O₂, el SE fue de 2,5 puntos % para el rango seco de CH y 1,9 puntos % para el rango húmedo de CH, respectivamente. Las tendencias generales de las evoluciones medidas de gases, mayormente, fueron compatibles con las simuladas.

¹FCEIA - Universidad Nacional de Rosario (Santa Fe), Argentina

²EEA INTA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

Notación

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5	.....	parametros de la ecuación de respiración, velocidad de producción de CO ₂ , adimensional, °C ⁻¹ , s ⁻¹ , s ⁻² , adimensional, respectivamente
A_s	.....	área de intercambio de gases del silo bolsa por metro de silo bolsa, (m ²)
x, y	.....	coordenadas cartesianas, m
c_b	.....	calor específico del lecho de granos (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)
d_m	.....	velocidad del material seca consumida en la respiración aeróbica, en mg [materia seca] kg ⁻¹ [materia seca] en 24 h
d_p	.....	diámetro de la perforación, m
D_v	.....	difusividad del vapor de agua en el aire, m ² s ⁻¹
D_{ef}	.....	difusividad efectiva del vapor de agua en el aire intergranario, s,
PMS	.....	pérdida local acumulada de materia seca al tiempo t, mg [materia seca] kg ⁻¹ [materia seca]
\overline{PMS}	.....	pérdida promedio acumulada de materia seca al tiempo t, mg [materia seca] kg ⁻¹ [materia seca]
k	.....	conductividad térmica, W m ⁻¹ K ⁻¹
K_{fi}	.....	permeabilidad efectiva del plástico, m ³ d ⁻¹ , $K_{fi} = \frac{A_s P_i P_{atm}}{L}$ i= O ₂ , CO ₂
L	.....	espesor de la capa de plástico, m
L_g	.....	calor latente de vaporización de la humedad en el grano, J kg ⁻¹ , $L_g = RT^2 \left(\frac{\partial \ln p_v}{\partial T} \right)_{w_g}$
M	.....	contenido de humedad del grano, % bh
M_{CO_2}	.....	peso molecular del dióxido de carbono, 44,0 gramos mol ⁻¹
n	.....	dirección normal
p_s	.....	presión de saturación del vapor de agua, Pa
p_v	.....	presión parcial del vapor de agua, Pa
P_{atm}	.....	presión atmosférica, 1 at. ó 101325 Pa
P_{O_2}	.....	permeabilidad del O ₂ a través de la capa plástica, m ³ md ⁻¹ m ⁻² at ⁻¹
P_{CO_2}	.....	permeabilidad del CO ₂ a través de la capa plástica, m ³ md ⁻¹ m ⁻² at ⁻¹
\overline{P}_i	.....	permeabilidad equivalente de la capa plástica, i= O ₂ , CO ₂ , m ³ md ⁻¹ m ⁻² at ⁻¹
q_H	.....	calor liberado en la respiración, 10,7 J mg ⁻¹ [CO ₂]
q_w	.....	vapor de agua producido en la respiración, 4,1 10 ⁻⁵ kg [H ₂ O] mg ⁻¹ [CO ₂]
r_{O_2}	.....	velocidad de consumo de O ₂ , m ³ s ⁻¹ kg ⁻¹ [materia seca]
r_{CO_2}	.....	velocidad de producción de CO ₂ , m ³ s ⁻¹ kg ⁻¹ [materia seca]
R	.....	constante universal de los gases, 8,3 J mol ⁻¹ K ⁻¹
R_v	.....	constante de gas del vapor de agua, 461,5 J kg ⁻¹ K ⁻¹
t	.....	tiempo, s
T	.....	temperatura, °C

T_k	temperatura absoluta, K
V	volumen del lecho grano, m ³
W	contenido de humedad, d.b
Y_{CO_2}	velocidad de producción de CO ₂ , mg [CO ₂] kg ⁻¹ [materia seca] en 24 h
Y_{O_2}	velocidad de consumo de O ₂ , mg [O ₂] kg ⁻¹ [materia seca] en 24 h
Y_{H_2O}	velocidad de producción del vapor de agua, mg [H ₂ O] kg ⁻¹ [materia seca] en 24 h
CO_2	concentración de CO ₂ , % V/V
O_2	concentración de O ₂ , % V/V

Símbolos griegos

β	cociente de permeabilidad
ε	porosidad
Γ	frontera del dominio
η	cambio en la presión parcial como consecuencia del cambio en el contenido de humedad a temperatura constante, Pa,
	$\eta = \frac{\partial p_v(W_g, T_c)}{\partial W_g} \Big|_T$
ρ	densidad, kg m ⁻³
ρ_{bs}	densidad de lecho seco, kg [materia seca] m ⁻³
ω	cambio en la presión parcial como consecuencia del cambio en la temperatura a contenido de humedad constante, Pa K ⁻¹ ,
	$\eta = \frac{\partial p_v(W_g, T_c)}{\partial T_g} \Big|_{W_g}$
τ	factor de tortuosidad
Ω	dominio

Subíndices

a	aire intersticial
b	lecho de grano
g	grano
0	valor inicial

Introducción

En 2010 más de 40,0 millones de toneladas de grano fueron almacenadas en sistemas herméticos (silo bolsas) en la Argentina. Esta técnica, utilizada originalmente para ensila-

je de granos, consiste en el almacenamiento de granos secos en bolsas de plástico herméticamente selladas. El proceso de la respiración de los agentes biológicos en el ecosistema del grano (trigo, insectos, ácaros y microorganismos) aumenta la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y reduce la de oxígeno (O_2). Esta atmósfera modificada inhibe la actividad biótica, promoviendo un medio ambiente adecuado para la conservación del grano.

La medición de la temperatura del grano es la principal herramienta utilizada por los productores y la industria de granos para monitorear condiciones adecuadas de almacenamiento en las estructuras convencionales (p. ej., silos). Desafortunadamente, esta tecnología no es útil para el seguimiento de las condiciones de almacenamiento en silo bolsas. En un silo convencional (silos metálicos cilíndricos o de hormigón), cualquier aumento de la temperatura detectada en el núcleo del granel por las termocuplas se asocia a un calentamiento local debido a la respiración y deterioro del ecosistema. En el silo bolsa, la razón entre el área de transferencia de energía /volumen de grano es mayor que en los silos convencionales ($1,4 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$ y $0,8 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$, respectivamente (Bartosik et al., 2008)). Por lo tanto, el cambio de temperatura en el núcleo de un silo bolsa, resulta del balance entre el calor liberado por la respiración y el calor transferido al medio ambiente, es altamente influenciado por las condiciones climáticas externas (Rodríguez et al., 2001; 2002). Además, Gastón et al. (2009) han demostrado mediante simulación numérica, que bajo ciertas condiciones climáticas, el calor liberado por la respiración no podría compensar las pérdidas de calor hacia el medio ambiente y la temperatura del silo bolsa disminuiría continuamente mientras se avanza hacia el invierno. Por lo tanto, el monitoreo de temperatura no es confiable para detectar actividad biológica en los silo bolsas.

Un seguimiento de las condiciones de almacenamiento de grano, mediante la extracción de muestras de grano de los silo bolsas con un calador, es un proceso bastante fácil de implementar. Sin embargo, cada perforación realizada en la cubierta de plástico perturba la hermeticidad del sistema, lo que limita el número de muestras que pueden ser recogidas de cada silo bolsa, y la frecuencia de muestreo. Además, este procedimiento de control es útil para determinar la calidad general del grano almacenado en el silo bolsa (es decir, contenido de proteína, calidad panadera, etc.), pero no es adecuado para la detección de problemas incipientes de deterioro (la mayor parte del proceso de deterioro se produce típicamente en la parte inferior del silo bolsa, donde el calador por lo general no puede recoger la muestra). Otra desventaja de esta metodología es que es muy laboriosa e insume mucho tiempo.

Recientemente, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA), Estación Experimental de Balcarce implementó un procedimiento de control de la actividad biológica y almacenamiento basado en la medición del CO_2 en el aire intersticial de los granos almacenados en silo bolsas (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008; Rodríguez et al., 2008). Sin embargo, para desarrollar una tecnología confiable para el monitoreo del almacenamiento de granos basado en la detección de CO_2 , se requiere una mejor comprensión de las concentraciones típicas de CO_2 para un rango de condiciones de almacenamiento en silo bolsas (es decir: la temperatura del grano, el contenido de humedad (CH), el tiempo de almacenamiento, etc.). Los modelos de simulación son muy útiles para analizar rápidamente numerosas situaciones y describir los límites críticos de diferentes factores, considerando la complejidad del ecosistema de granos que prevalece bajo condiciones de hermeticidad, como ya fue mencionado por Navarro et al. (1994).

Un modelo integral de transferencia de calor, humedad y gases para silo bolsas incluye la respiración de agentes biológicos que modifica la composición de los gases atmosféricos en el aire intersticial del silo bolsa. Todos los componentes químicos implicados en el proceso de respiración deben tenerse en cuenta: vapor de agua, CO_2 , O_2 y elementos no-reactivos del espacio intersticial (Thorpe, 2001). El planteamiento del problema se describe por los balances de cantidad de movimiento de masa y de energía para el aire intergranular y los productos de la respiración acoplado a los balances de masa y de energía en el grano.

La inclusión de propiedades dependientes de humedad y temperatura, así como de condiciones de contorno realistas en la definición del modelo, hace que las ecuaciones diferenciales parciales resultantes sean no lineales. Por lo tanto, la solución para estas ecuaciones debe ser realizada por métodos numéricos.

Se encontraron pocas referencias que aborden el modelado matemático de atmósferas modificadas en silo bolsas. Mediante simulación numérica, Bispo Dos Santos et al. (2007) estudiaron la infiltración de O_2 debido al daño de la superficie en un silo bolsa que almacenaba maíz húmedo. Lobo Paes et al. (2007) analizaron la posibilidad de acelerar la anaerobiosis mediante el uso de sumideros de O_2 ubicados en la parte superior e inferior de la bolsa. En ambos estudios se asume que la frontera es hermética excepto en la ubicación de la perforación superficial o en el sumidero, donde se aplicó una condición tipo Dirichlet. La velocidad de consumo de O_2 se modeló de acuerdo con Bern et al. (2002). Las correlaciones de la velocidad de producción de CO_2 disponible en la literatura para el trigo (White et al., 1982), maíz (Bern et al., 2002) y soja (Rukunudin et al., 2004), dependen de la temperatura, del CH y del tiempo de almacenamiento, pero no de las concentraciones de gases. Las ecuaciones que dependen también de la concentración de gases de la atmósfera intersticial todavía tienen que desarrollarse para explicar correctamente la respiración del grano bajo condiciones de almacenamiento en silo bolsas con oxígeno restringido. Este trabajo es parte de un estudio general que tiene como objetivo desarrollar un modelo integral para el sistema de almacenamiento en silo bolsas. En la primera etapa del estudio se desarrolló un modelo de transferencia de calor y masa (Gastón et al., 2007; 2009). Este modelo fue validado comparando los valores predichos y los valores medidos de temperaturas, de CH y las concentraciones de CO_2 y O_2 (Rodríguez et al., 2001) y luego se utilizó para analizar las condiciones de almacenamiento del trigo. Se asumió que el silo bolsa era impermeable a la transferencia de O_2 y CO_2 (condiciones de hermeticidad). La correlación desarrollada por White et al. (1982) para el trigo se aplicó para modelar la velocidad de producción de CO_2 debido a la respiración del grano y la microflora. Para el rango de CHs considerado en ese trabajo (12,5% a 16,4%), el cambio en la concentración de CO_2 durante el almacenamiento fue predicho satisfactoriamente.

Esta es la segunda etapa del estudio dirigida a:

1. Desarrollar un modelo matemático para predecir el cambio de las concentraciones de CO_2 y O_2 , teniendo en cuenta la respiración del grano y la permeabilidad de O_2 y CO_2 a través del silo bolsa.
2. Comparar los resultados del modelo de simulación con los nuevos datos experimentales de concentración de CO_2 y O_2 medidos en silo bolsas que almacenan trigo.

En la parte II de este trabajo, se estudia la sensibilidad de las predicciones a las variaciones de algunos parámetros relevantes, así como la evolución de la concentración de gas para diferentes condiciones de almacenamiento.

Materiales y métodos

Silo bolsas

Las dimensiones típicas de un silo bolsa son 60,0 m de largo, 2,7 m de diámetro, y 230 - 250 μm de espesor. Las bolsas están hechas de un plástico de 3 capas, negro en el lado interior y blanco en el lado exterior con estabilizadores de UV. Las capas del plástico son una mezcla de polietileno de alta densidad (HDPE) y de baja densidad (LDPE). En la bolsa se pueden almacenar aproximadamente 200,0 toneladas de granos (trigo, maíz y soja) y por lo general los productores almacenan su producción durante 6 a 8 meses. La Figura 1 muestra una imagen del sistema de almacenamiento en silo bolsa. Para una sección de 1,0 m de longitud del silo bolsa, el volumen de grano es $V = 4,5 \text{ m}^3$ y el área superior y lateral para la transferencia de energía y masa es $A_s = 5,5 \text{ m}^2$.



Figura 1.
Fotografía del sistema de almacenamiento en silo bolsas.

Modelo matemático

A fin de presentar los modelos matemáticos desarrollados hasta el momento, también se resumirán los balances de transferencia de calor y masa. Se tiene en cuenta la evolución de la temperatura, el CH y la pérdida de materia seca.

Balance de calor y contenido de humedad

Las siguientes hipótesis fueron consideradas para simplificar los balances de calor y de CH:

1. Se considera al lecho de grano como un continuo donde la fase grano y la fase aire intergranular están uniformemente distribuidos a través del medio poroso.
2. En un volumen de control, el grano y el aire intergranular están en equilibrio termodinámico local.
3. Se adoptó un modelo 2D con simetría plana. Como las condiciones ambientales y la radiación solar son uniformes a lo largo del eje longitudinal y la temperatura inicial y el CH se suponen constantes, la transferencia de calor y de masa en la dirección longitudinal se considera despreciable en comparación con la transferencia de calor y masa en la sección transversal del silo bolsa.

4. La mezcla de aire-vapor se comporta como un gas ideal.
5. No se considera el transporte por convección.
6. La contracción del lecho de grano es despreciable.

Planteando el balance de energía y humedad para las fases grano y aire en un volumen de control, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones acopladas:

$$c_b \rho_{bs} \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[k_b \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_b \frac{\partial T}{\partial y} \right] \right] + \rho_{bs} L_g \frac{\partial W_g}{\partial t} + \rho_{bs} q_H Y_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{1}$$

$$\rho_{bs} \frac{\partial W_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial x} + \omega \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{ef} \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial y} + \omega \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + \rho_{bs} q_w Y_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{2}$$

Una derivación detallada de este sistema se presenta en Abalone et al. (2006).

La respiración aeróbica del ecosistema de los granos consume O_2 y produce CO_2 , vapor de agua y calor. De esta forma, si se conoce la velocidad de CO_2 liberado, Y_{CO_2} en $mg [CO_2] kg^{-1}$ [materia seca] en 24 h, de acuerdo a la combustión completa de un hidrato de carbono típico, se pueden calcular el calor liberado, el vapor de agua producido, el O_2 consumido y la pérdida de materia seca. Las expresiones utilizadas para estos cálculos se muestran en la Tabla 1. Cuando el término fuente/sumidero de la ecuación (1) y de la ecuación (2) depende explícitamente de la temperatura local, el CH y el tiempo de almacenamiento, pero no de los valores de concentración locales de CO_2 y O_2 , es posible resolver el sistema de ecuaciones acopladas (1) y (2) para determinar la temperatura y el cambio de humedad del grano sin tener en cuenta el proceso de transporte de los gases intersticiales en el silo bolsa.

Tabla 2.

Productos del proceso de respiración (Oxidación de la glucosa).

CO_2 producido [mg CO_2 kg^{-1} [materia seca] en 24 h]	$Y_{CO_2} = f(T, t, M)$ función conocida
O_2 consumido [mg O_2 kg^{-1} [materia seca] en 24 h]	$Y_{O_2} = \frac{192}{264} Y_{CO_2}$
Energía liberada Y_{Resp} [J kg^{-1} [materia seca] en 24 h]	$Y_{Resp} = \frac{2835 kJ}{264 g} Y_{CO_2} = q_H Y_{CO_2}$
Vapor de agua producido Y_{H_2O} [mg $[H_2O]$ kg^{-1} [materia seca] en 24 h]	$Y_{H_2O} = \frac{108 g}{264 g} Y_{CO_2} = q_w Y_{CO_2}$
Pérdida de materia seca [mg de materia seca /kg materia seca en 24 hs]	$d_m = \frac{180}{264} Y_{CO_2}$

La Figura 2 muestra el dominio de cálculo y sus fronteras, la cual representa una sección transversal del silo bolsa. Para tener en cuenta la interacción entre el suelo y la capa

inferior del silo bolsa, se incorporó el subdominio Ω_2 en el modelo de transferencia de calor. La radiación solar, las pérdidas por convección y por radiación fueron consideradas en Γ_1 , mientras que en Γ_3 se impuso una condición de contorno tipo Dirichlet. Se asumió que el silo bolsa era impermeable a la transferencia de humedad.

INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR

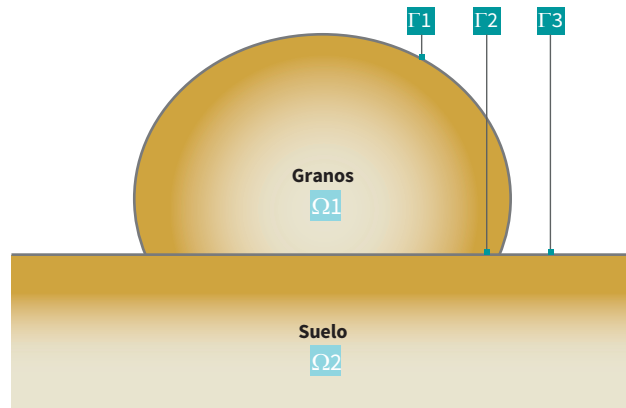


Figura 2.
Diagrama de dominio de cálculo y fronteras. Sección transversal de un silo bolsa.

Balance de masa de dióxido de carbono y oxígeno en el silo bolsa

La concentración de CO_2 y O_2 en el silo bolsa depende del balance entre la respiración (consumo de O_2 y generación de CO_2), la entrada externa de O_2 al sistema, y la pérdida de CO_2 al aire ambiente.

La transferencia de gases entre el interior y el exterior del silo bolsa depende de la diferencia de presión parcial del gas y la permeabilidad efectiva del silo bolsa a los gases (permeabilidad de la capa plástica + perforaciones). Existe una fuerte interacción entre los factores externos y los componentes interrelacionados del ecosistema de granos en el silo bolsa. El tipo y la condición del grano, el CH, la temperatura, el tiempo de almacenamiento y las concentraciones de O_2 y CO_2 afectan la tasa de respiración. Sin embargo, como se discutió en la presentación del modelo de transferencia de calor y masa, como no hay correlaciones disponibles para predecir la tasa de respiración de los granos almacenados en condiciones herméticas (ambientes libres de oxígeno), el efecto de la concentración de O_2 y CO_2 en la tasa de respiración no puede ser cuantificado.

Las pruebas experimentales no mostraron estratificación de gases en los silo bolsas testeados en el campo (Rodríguez et al., 2001; 2002; 2008; Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008; Santa Juliana y Casini, 2009). Por lo tanto, un modelo de capacidad concentrada (sin resistencia interna a la difusión de gases) fue adoptado para calcular el cambio de la concentración promedio de CO_2 y O_2 en el silo bolsa (Navarro et al., 1994).

Las siguientes hipótesis fueron consideradas para simplificar el modelo matemático:

1. CO_2 y O_2 están distribuidos uniformemente en la masa de grano
2. La contribución a la producción de CO_2 debido a la respiración de los insectos y la absorción de CO_2 del grano no están incluidos en el presente estudio.

3. La temperatura del grano está caracterizada por la temperatura promedio del silo bolsa. La temperatura promedio del grano cambia durante el almacenamiento de acuerdo a la variación estacional de las condiciones meteorológicas.
4. El CH promedio del grano permanece igual al CH inicial del grano del silo bolsa (la transferencia de vapor de agua a través de la capa de plástico es despreciable).
5. No existe volumen libre en la parte superior del silo bolsa, el volumen del silo bolsa está ocupado por la masa de grano.

Planteando el balance de masa de CO_2 y O_2 involucrado en la respiración del grano, en el volumen de control de 1,0 m de longitud del silo bolsa (Figura 3) se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones acopladas (Song et al., 2002):

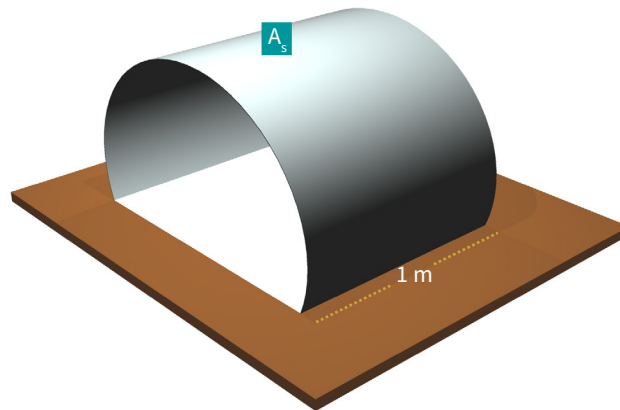
$$\frac{dO_2}{dt} = K_{jO_2} \frac{\{O_{2out} - O_2\}}{\varepsilon V} - \frac{\rho_{bs}}{\varepsilon} r_{O_2} \quad \text{in } \Omega_t \quad \mathbf{3}$$

$$\frac{dCO_2}{dt} = K_{jCO_2} \frac{\{CO_{2out} - CO_2\}}{\varepsilon V} + \frac{\rho_{bs}}{\varepsilon} r_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_t \quad \mathbf{4}$$

Los primeros términos en el lado derecho de la ecuación (3) y la ecuación (4) representan el intercambio de gases a través del silo bolsa. Durante la respiración aeróbica, la tasa de consumo de O_2 es igual a la de la producción de CO_2 .

Figura 3.

VOLUMEN DE CONTROL PARA EL INTERCAMBIO GASEOSO EN EL SILO BOLSA



Como la bolsa inicialmente contiene aire ($t = 0$) y está ubicada en el campo:

$$O_{2out} = O_2^0 = 0,21 \quad ; \quad CO_{2out} = CO_2^0 = 0,0003 \quad \mathbf{5}$$

Parámetros de entrada del modelo

Las expresiones para las condiciones de contorno asociadas a la ecuación (1) y a la ecuación (2), las funciones del modelo L_g , η , ω , así como los parámetros de entrada del modelo térmico y las propiedades del lecho de trigo se presentan en detalle en Gastón et al. (2009).

Modelo de respiración para el trigo

White et al. (1982) han llevado a cabo numerosos experimentos para determinar la velocidad de liberación de CO_2 de los cereales y han establecido modelos robustos para contabilizar la producción de CO_2 de los cereales y microflora, expresados por la siguiente ecuación genérica, donde Y_{CO_2} se expresa en mg/kg de materia seca en 24 h, θ es el tiempo de almacenamiento en días, T es la temperatura del grano en $^\circ\text{C}$ y M es el CH en %:

$$\log Y_{\text{CO}_2} = -4,054 + 0,0406 T - 0,0165 \theta + 0,0001 \theta^2 + 0,2389 M$$

6

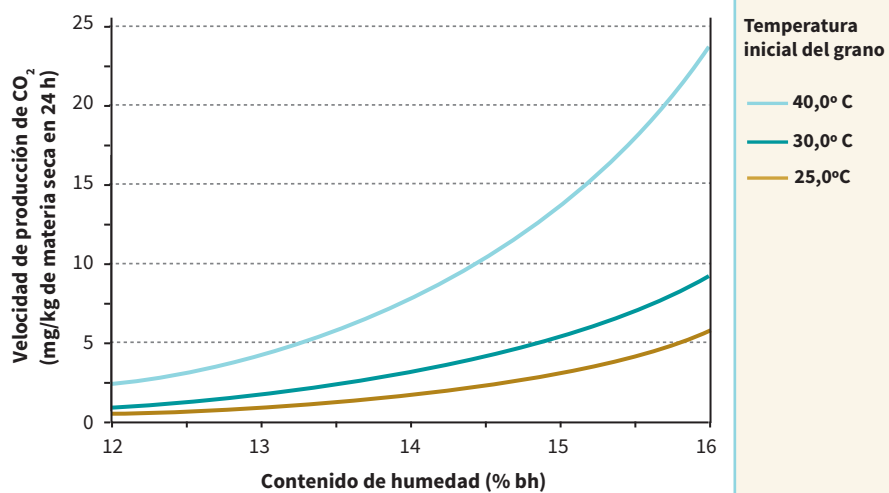
Al introducir en la ecuación (6) la temperatura promedio del silo bolsa predicha por el modelo de transferencia de calor y masa como función del tiempo de almacenamiento y el CH inicial de grano (M_0), la velocidad promedio de consumo de O_2 y producción de CO_2 se expresan mediante:

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{\bar{Y}_{\text{CO}_2}(t)}{1000 M_{\text{CO}_2}} \frac{R \bar{T}_k(t)}{P_{at}}; \quad r_{\text{O}_2} = r_{\text{CO}_2}$$

7

La Figura 4 muestra la dependencia de la velocidad de producción de CO_2 con el CH y la temperatura. Aproximadamente, la velocidad de producción de CO_2 se duplica cada

Figura 4. Ritmo de producción de CO_2 en 24 h en función de la temperatura y del contenido de humedad del grano.



5,0 °C o cada un 1,0% de incremento de CH. Los CHs iniciales por encima del 16,0% no se consideraron en este trabajo, ya que en este nivel de CH, la respiración anaeróbica se vuelve importante y no se encontró en la literatura una correlación para modelar esta contribución. Gastón et al. (2009) demostraron que el calor liberado por la respiración no tiene un efecto significativo en el cambio de temperatura durante el almacenamiento. La diferencia entre la temperatura del grano seco (12,0%) y el grano húmedo (16,0%) fue como máximo de 2,0 °C. Esto es consecuencia de la alta velocidad de intercambio de energía del grano almacenado en el silo bolsa con el medio ambiente.

Permeabilidad equivalente del silo bolsa

La permeabilidad a 25,0 °C del HDPE al O₂ es 6,5 10⁻⁸ m³md⁻¹m²at⁻¹ y del LDPE es 19,5 10⁻⁸ m³md⁻¹m²at⁻¹. La permeabilidad a 25,0 °C del HDPE al CO₂ es 19,0 10⁻⁸ m³md⁻¹m²at⁻¹ y del LDPE es 105,0 10⁻⁸ m³md⁻¹m²at⁻¹ (Osborn et al., 1992). Se aplicó un modelo de resistencias en serie para derivar una permeabilidad equivalente al O₂ y CO₂. Se supuso que la mitad del espesor de la capa de plástico era polietileno HDPE y la otra mitad polietileno LDPE:

$$\bar{P}_i = \frac{2P_{iHD} P_{iLD}}{P_{iHD} + P_{iLD}}; \quad i = O_2, CO_2$$

8

La permeabilidad equivalente de la capa plástica al O₂ fue 9,8 10⁻⁸ m³md⁻¹m²at⁻¹ y al CO₂ fue 3,2 10⁻⁷ m³md⁻¹m²at⁻¹. Para un espesor promedio de 240 μm, la permeabilidad estimada al O₂ fue 4,1 10⁻⁴ m³d⁻¹m²at⁻¹ y al CO₂ fue de 1,3 10⁻³ m³d⁻¹ m² at⁻¹, siendo el cociente de permeabilidad $\beta_f = \frac{\bar{P}_{CO_2}}{\bar{P}_{O_2}} \cong 3$

Pruebas experimentales de campo

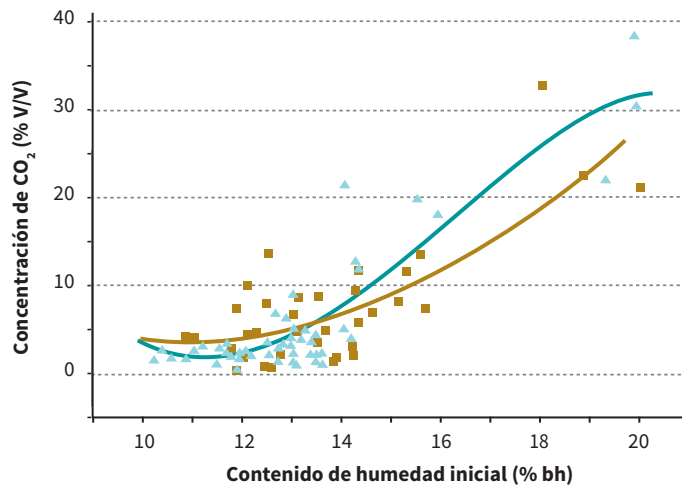
El INTA EEA Balcarce llevó a cabo una serie de experimentos de campo con el fin de identificar los principales factores que afectan las concentraciones de CO₂ y O₂ como indicadores de actividad biológica y condiciones de almacenamiento apropiadas para el trigo. Los experimentos consistieron en el control de la composición de gases del aire intersticial, la calidad comercial del grano, el CH y la temperatura del grano en el silo bolsa. Unos 50 silo bolsas fueron analizadas en acopios y establecimientos agropecuarios en la región del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, durante 3 temporadas de almacenamiento (desde enero de 2006 hasta mayo de 2008). La mayor parte del trigo se embolsó en diciembre - enero y se almacenó hasta junio o julio. Para cada silo bolsa 2 puntos de muestreo fueron establecidos. El procedimiento consistió primero en la medición de la concentración de gases (O₂ y CO₂) con un analizador de gases portátil (PBI DanSensor, CheckPoint, Dinamarca), perforando la cubierta de plástico con una aguja. La composición de gases fue analizada para 3 niveles en cada punto de muestreo, cerca de la parte superior de la bolsa, en el centro y cerca de la parte inferior. Se recolectó información adicional del silo bolsa, como las características de llenado y sellado del silo bolsa, el registro de apertura del silo bolsa, perforaciones producidas por animales salvajes o por mal sellado después del muestreo, preparación inadecuada de los suelos donde se colocó el silo bolsa (cuando los silo bolsas se ubicaron sobre residuos agrícolas a menudo

se produjeron perforaciones en la parte inferior), silo bolsas ubicados en las tierras bajas con riesgo de inundación, así como cualquier otra información pertinente. Una discusión detallada de los resultados de estas pruebas se presenta en Bartosik et al. (2008).

Definición de las condiciones iniciales de embolsado y de los datos climáticos para la simulación

Los datos mostrados en la Figura 5 corresponden a silo bolsas con un amplio rango de condiciones iniciales de almacenamiento (variedad de grano, calidad, etc.) y, en muchos casos, los valores medidos de las concentraciones de gases durante las estaciones cálidas y frías de almacenamiento no pertenecen al mismo conjunto de silo bolsas. Aunque la temperatura y el CH se midieron durante el almacenamiento, no se contó con los datos de la temperatura inicial de embolsado del grano. Por lo tanto, para cubrir las condiciones de almacenamiento más representativas de las condiciones de cosecha de trigo en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, las simulaciones se llevaron a cabo para el rango típico de temperatura (20,0 °C, 25,0 °C y 30,0 °C) y CH (12,0% - 16,0%). Datos horarios de la temperatura ambiente desde el verano (enero) al invierno (julio) y de la radiación solar promediados sobre más de diez años fueron utilizados como datos meteorológicos de entrada.

Figura 5. Concentración de CO₂ a diferentes CH del grano medidas en silo bolsas durante la temporada cálida de almacenamiento (enero - marzo) y la temporada fría de almacenamiento (mayo - julio).



— $Y_{\text{cálido}} = 216,562 - 46,586 X + 3,182x^2 - 0,065 X^3$; $R^2 = 0,624$

— $Y_{\text{frío}} = 32,013 - 5,529 X + 0,265 X^2$; $R^2 = 0,777$

▲ Medición durante la temporada cálida (enero-marzo)

■ Medición durante la temporada fría (mayo-julio)

Solución numérica

El modelo matemático fue implementado utilizando COMSOL Multiphysics 3.5 a y resueltos de manera secuencial. En el primer paso, el sistema de PDE, ecuaciones (1) y (2) y las condiciones iniciales y de frontera asociadas, se resuelve numéricamente por el método de elementos finitos. La Figura 2 muestra la discretización del silo bolsa y parte del dominio del suelo. Se generó una malla refinada en la frontera del dominio donde se espera que se produzcan los gradientes de temperatura y humedad más pronunciados. Se emplearon elementos cuadráticos Lagrangianos y una cuadratura numérica de orden cuarto. Para resolver el sistema PDE se seleccionó el método Solver UMFPACK (Método Multifrontal y Factorización LU para matrices dispersas no simétricas). La temperatura promedio del silo bolsa se calculó por integración de la distribución de temperatura sobre el dominio del silo bolsa mediante la expresión:

$$\bar{T}_c(t) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} T(x, y, t) d\Omega \quad 9$$

La pérdida local acumulada de materia seca (DML) en mg [materia seca] kg⁻¹ [materia seca] ocurrida al tiempo t fue calculada por integración en el tiempo:

$$DML(x, y, t) = \int_0^t d_m(x, y, t') dt' \quad 10$$

y la pérdida promedio acumulada de materia seca se calculó de la siguiente manera:

$$\overline{DML}(t) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} DML(x, y, t) d\Omega \quad 11$$

En el segundo paso, la ODE (Ec. (3) y (4)) fue resuelta evaluando la velocidad promedio de producción de CO₂ (Ec. (7)) de acuerdo a la evolución de la temperatura promedio dada por la Ec. (9).

Resultados y discusión

Concentraciones medidas de CO₂

La Figura 5 muestra la concentración de CO₂ en silo bolsas muestreados durante las estaciones cálidas y frías de almacenamiento. Estos datos corresponden a silo bolsas sin daños visibles en la capa de plástico, aunque pueden haber sido incluidos algunos silo bolsas con perforaciones en la parte inferior que no fueron detectados durante el muestreo. Bartosik et al. (2008) ajustaron una correlación entre la concentración medida de CO₂ en el silo bolsa y el CH del trigo almacenado con el fin de establecer un nivel de referencia de CO₂ esperado para bolsas con condiciones adecuadas de almacenamiento.

A bajo CH del grano casi no hubo diferencia en la concentración de CO₂ en la temporada cálida y fría, mientras que para un CH por encima del 14,0% (presumiblemente CH a partir del cual se activan los hongos) la diferencia en la concentración de CO₂ durante la temporada estival (enero - marzo) subió 7,0 puntos porcentuales más que durante la temporada invernal (mayo - julio). El factor principal que afectó la concentración de CO₂

fue el CH, lo que aumentó la concentración de CO₂ del 5,0% al 30,0% cuando el CH del trigo aumentó del 14,0% al 19,0%. Estos resultados experimentales a campo concuerdan con los datos publicados para el maíz en ensayos de laboratorio (Weinberg et al., 2008; Bispo Dos Santos et al., 2008), que informaron valores de la concentración de CO₂ por encima de 21,0% para CH superiores a 18,0%, como consecuencia de la contribución de la respiración anaeróbica.

Validación del modelo de concentración de CO₂ y O₂

Para validar el modelo, se simuló el cambio de la concentración de CO₂ y O₂ dentro del silo bolsa y los resultados numéricos se compararon con los datos experimentales.

El desvío estándar del ajuste (SE) y el error relativo promedio (MRD) fueron usados para determinar la exactitud del modelo. El modelo fue aplicado para cada uno de los CH iniciales asociados a las bolsas muestreadas. Las concentraciones de CO₂ y O₂ predichas en cada fecha de muestreo fueron comparadas con los correspondientes valores medidos.

Los valores de SE y MRD, para la temperatura inicial promedio de embolsado de 25,0 °C se resumen en al Tabla 2. Las concentraciones medidas de gases fueron agrupadas en cuatro rangos de CH inicial: 12,0% - 16,0%, 12,0% - 13,0%, 13,0% - 13,5% y 14,0% - 15,0%, y la exactitud del modelo fue determinada para cada rango de CH. El valor del SE para CO₂ fue más bajo que para O₂ (1,6 y 2,5, respectivamente) y se incrementó con el rango de CH.

Tabla 4.

Desvío estándar del ajuste (SE) estimado y error relativo promedio (MRD) entre CO_{2m}, O_{2m} medidos y CO₂, O₂ predichos; n_s tamaño de la muestra.

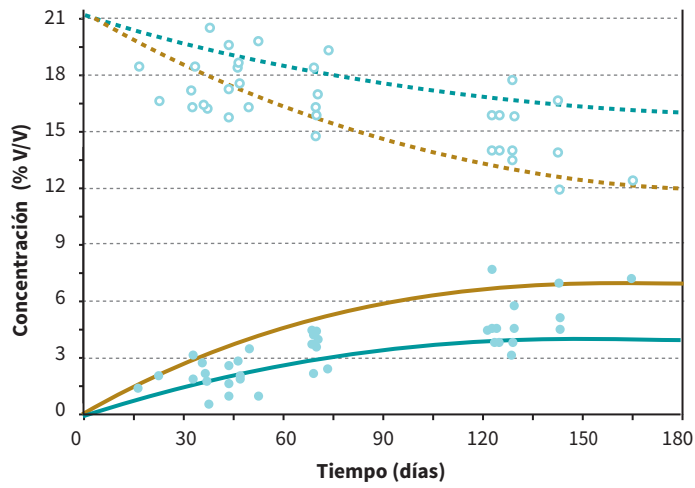
GAS	RANGO DE CONTENIDO DE HUMEDAD	N _s	SE ² , °C	MRD ¹
CO ₂	12,0% - 16,0%	60	1,6	0,4
	12,0% - 13,0%	35	1,1	0,4
	13,0% - 13,5%	13	1,3	0,3
	14,0% - 15,0%	12	2,7	0,2
O ₂	12,0% - 16,0%	65	2,4	0,3
	12,0% - 13,0%	38	2,3	0,1
	13,0% - 13,5%	16	2,9	0,2
	14,0% - 15,0%	11	1,9	0,7

$${}^1MRD = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \left(\frac{C_{im} - C_i}{C_m} \right) \quad {}^2SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{im} - C)^2}{n_s}} \quad i = CO_2, O_2$$

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran la evolución de la concentración de gases predicha solo para los valores extremos de cada rango de CH, así como los correspondientes datos medidos. Aunque los valores de MRD en la Tabla 2 muestran que la diferencia relativa entre los valores medidos y calculados fueron significativas (entre 0,1 y 0,7 puntos porcentua-

Figura 6.

Comparación entre las concentraciones de gases medidas y predichas.

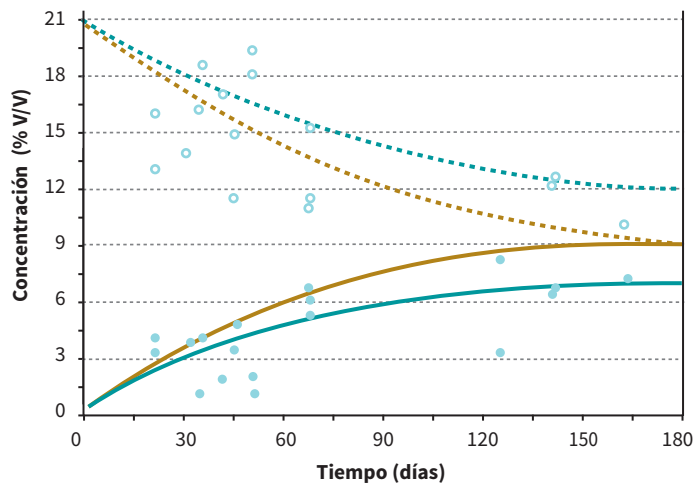


Rango de contenido de humedad: 12,0% - 13,0%
Temperatura inicial del grano: 25,0 °C

○ Valores de CO₂ — medidos, predichos 12,0%, — predichos 13,0%
● Valores de O₂ - - - medidos, predichos 12,0% - - - predichos 13,0%

Figura 7.

Comparación entre las concentraciones de gases medidas y predichas.

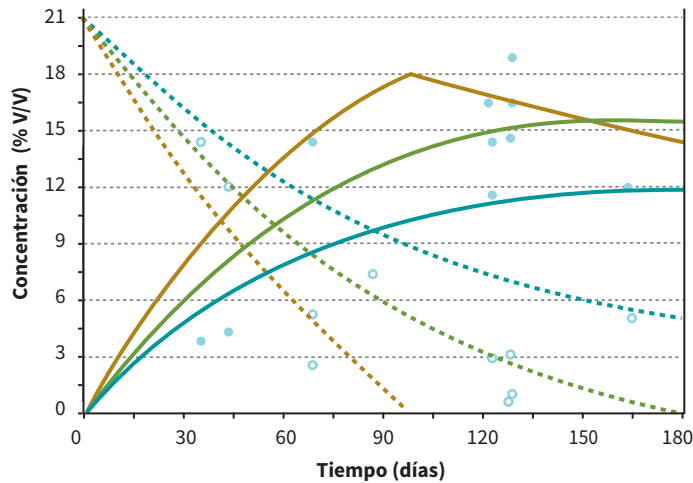


Rango de contenido de humedad: 12,0% - 13,0%
Temperatura inicial del grano: 25,0 °C

○ Valores de CO₂ — medidos, predichos 12,0%, — predichos 13,0%
● Valores de O₂ - - - medidos, predichos 12,0% - - - predichos 13,0%

les), las tendencias generales de las concentraciones medidas de O_2 y CO_2 están bien representadas por la banda definida por las curvas extremas.

Figura 8.
Comparación entre las concentraciones de gases medidas y predichas.



Rango de contenido de humedad: 12,0% - 13,0%
Temperatura inicial del grano: 25,0 °C

- Valores de CO_2
- Valores de O_2
- medidos, predichos 14,0%
- medidos, predichos 14,5%
- medidos, predichos 15,0%
- predichos 14,0%
- predichos 14,5%
- predichos 15,0%

Para el rango CH de 12,0% - 13,0%, el 45,0% de los valores medidos de O_2 y el 64,0% de los valores medidos de CO_2 durante las estaciones cálidas y frías se ubicaron dentro de la banda. En comparación, se obtuvo una mayor discrepancia para el rango de 13,0% - 13,5%, ya que el número de valores medidos ubicados dentro de la banda disminuyó (37,0% de los valores de O_2 y 47,0% de los valores medidos de CO_2). Para el rango más húmedo (14,0% - 15,0%) los valores medidos de O_2 se mantuvieron en niveles bajos, pero nunca llegaron a “cero”, mientras que el modelo predijo un consumo total de O_2 para el 15,0% de CH. Esto es una consecuencia de la utilización de una correlación (Ec. (7)) que no depende de la concentración de gases, por lo cual no puede tener en cuenta la disminución y la inhibición de la velocidad de respiración a baja concentración de O_2 o alta concentración de CO_2 . Sin embargo, el 90,0% de los valores medidos de O_2 y el 70,0% de los valores de CO_2 se ubicaron entre las bandas predichas por el modelo.

La discrepancia observada entre los valores medidos y los predichos es probable que ocurra cuando se comparan los resultados del modelo con los datos experimentales obtenidos a partir de sistemas biológicos en pruebas a escala comercial (es decir, silo bolsa de 200,0 toneladas) y pueden originarse por diversos factores. El CH inicial tiene un fuerte efecto sobre la evolución de la concentración de gas, ya que la velocidad de respiración depende exponencialmente del CH (Ec. (5)). El error experimental en la

determinación de CH fue de alrededor del 0,5%. Esta incertidumbre en el establecimiento de la condición inicial de CH podría resultar en un cambio de aproximadamente 2,0% en las concentraciones previstas, aumentando la diferencia entre los valores predichos y observados a altos valores de contenido de humedad. Además, la correlación de la tasa de respiración que utiliza el modelo fue derivada de una variedad de trigo específica (y diferente) de la empleada en los ensayos. Además, el daño estructural inadvertido o las pequeñas perforaciones del silo bolsa aumentaron la permeabilidad de los gases en un grado mayor que la considerada en el modelo, y puede dar como resultado valores medidos de concentraciones de CO₂ más bajas y de O₂ más altas. A pesar de todas las consideraciones que se deben tomar con respecto a la validación del modelo mencionadas anteriormente; se puede concluir que las tendencias generales de las concentraciones medidas de O₂ y CO₂ resultaron compatibles con las simuladas. Los valores MRD de 25,0% para el O₂ y 35,0% para el CO₂ del presente modelo son del mismo orden que los reportados por Rennie y Tavoularis (2009) y Jayas y Jeyamkodan (2002), quienes también señalaron que este tipo de errores no reducen la utilidad de los modelos matemáticos para el análisis de la respuesta del sistema a diferentes condiciones y para el desarrollo de reglas de operación para el manejo de granos. El desarrollo de una correlación de la respiración del grano que dependa de las concentraciones de CO₂ y de O₂, además de la temperatura y el CH, mejoraría sustancialmente las predicciones del modelo de concentraciones de gases, especialmente para los granos con CH inicial alto. Con estas nuevas correlaciones sería posible acoplar totalmente los balances de momento, calor y masa (contenido de humedad) con el proceso de transporte de CO₂ y O₂ a través del aire intersticial. Mediante el uso de este modelo de simulación mejorado, pueden analizarse numerosas situaciones así como efectos locales. Esta información es relevante para ayudar en el diseño de un protocolo de monitoreo de las concentraciones de O₂ y CO₂ como herramienta para predecir las condiciones de almacenamiento de los granos en silo bolsas.

Conclusiones

Se desarrolló una ecuación diferencial global de capacidad concentrada para la transferencia de gases para simular el intercambio gaseoso en un silo bolsa con trigo. La velocidad de producción de CO₂ se calculó con la correlación desarrollada por White et al. (1982), que representa la respiración aeróbica de los granos y la microflora y que depende de la temperatura de almacenamiento de grano, el CH y el tiempo de almacenamiento. La permeabilidad de la mezcla de HDPE y LDPE de la capa plástica del silo bolsa fue modelada como dos resistencias en serie. Las concentraciones de gas predichas bajo diferentes condiciones de almacenamiento para las condiciones climáticas de la región del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, se compararon con los datos experimentales medidos en silo bolsas en el campo. Aunque la información sobre la temperatura inicial de embolsado no estuvo disponible, el modelo fue capaz de reproducir las tendencias experimentales de comportamiento. Una mejor concordancia con los valores medidos de concentración de CO₂ se obtuvo en el rango de grano seco (12,0% - 13,5%), siendo SE de 1,2 puntos porcentuales para el CO₂ y de 2,5 puntos porcentuales para O₂. Para grano húmedo (14,0% - 15,0%) se predijo el consumo total de O₂ mientras que los valores medidos se mantuvieron en niveles bajos, pero nunca llegaron a “cero”.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer a las siguientes instituciones: ANPCYT/FONCYT (PICT 20080460), Universidad Nacional de Rosario (PIDING295) y al INTA, Proyecto: Eficiencia en la Poscosecha (AEAI 11-30023) por el apoyo a este trabajo.

Referencias

- Abalone R.; Gastón A.; Cassinera A. y Lara M. 2006. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica Computacional* 24: 233 - 247.
- Bartosik R.; Cardoso M.L. y Rodríguez J. 2008. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Bern C.; Steele J. y Morey R. 2002. Shelled corn CO₂ evolution and storage time for 0,5% dry matter loss. *Appl. Eng. Agric.*, 18(6): 703 - 706.
- Bispo Dos Santos S.; Martins M. y Faroni L. 2007. Computational study of oxygen infiltration due to damage in the silo bag surface. En: ASABE, 2007 ASABE Annual International Meeting. 2007, 17 - 20 de junio, Minneapolis, Minnesota, USA, Paper N° 076172.
- Bispo Dos Santos S.; Rodrigues de Brito V.; Martins M. y Faroni L. 2008. Dry matter loss of maize grains hermetically stored. En: Proc. Int. Conf. of Agric. Eng. CIGR 2008, 31 de agosto - 4 de septiembre, Foz de Iguazú, Brasil.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Gastón A.; Abalone R.; Cassinera A. y Lara M. 2007. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos-bolsa. *Mecánica Computacional*, 26: 3577 - 3561.
- Gastón A.; Abalone R.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2009. Mathematical modeling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo bags). *Biosystems Eng.*, 104: 72 - 85.
- Jayas, D.S.; Jeyamkodan S.; 2002. Modified atmosphere storage of grains, meats, fruits and vegetables. *Biosystems Eng.*, 82: 235 - 251.
- Lobo Paes J.; Martins M. y Faroni L. 2007. Computational study of anaerobiosis acceleration in hermetic storage of maize using oxygen depletion. ASABE Annual Int. Meeting. Paper N°. 076173.
- Navarro S.; Donahaye E. y Fishman S. 1994. The future of hermetic storage of dry grains in tropical and subtropical climates, pp. 130 - 138. En: Proc. of the 6th Int. Work-

- ing Conference on Stored-Product Protection, 17 - 23 de abril, Canberra, Australia.
- Osborn K. y Jenkins W. 1992. Plastic Films. Technology and Packaging Applications. Thecnomic Publising Co, Lancaster, Penn.
 - Rennie T.J. y Tavoularis S. 2009. Perforation - mediated modified atmosphere packaging. Part II. Implementation and numerical solution of a mathematical model. *Postharvest Biol. Technol.*, 51: 10 - 20.
 - Rodríguez J.; Bartosik R.; Malinarich H.; Exilart J. y Nolasco M. 2001. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: sistema silobag. Informe Final de Girasol. EEA INTA Balcarce. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/silobag.htm>. Accedido en julio del 2010.
 - Rodríguez J.; Bartosik R.; Malinarich H. y Maier D. 2002. Silo bag: evaluation of a new technique for temporary storage of wheat in the field, pp. 1018 - 1023. En: Proc. of the 8th Int. Working Conference on Stored Products Protection, 22 - 26 de julio, York, Inglaterra.
 - Rodríguez J.; Bartosik R.; Cardoso L. y Croce D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 589 - 592. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
 - Rukunudin I.; Bern C.; Misra M. y Bailey T. 2004. Carbon dioxide evolution from fresh and preserved soybeans. *Trans. ASAE*, 47: 827 - 833.
 - Santa Juliana D. y Casini C. 2009. Estudio de la variabilidad de la concentración de CO₂ y O₂ en granos de maíz (*Zea mays*) almacenados en bolsas plásticas, pp. 2289 - 2299. En: UNR (Ed.), Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR, CD - ROM.
 - Song Y.; Vorsa N. y Yam K. 2002. Modeling respiration - transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry. *J. Food Eng.*, 53: 103 - 109.
 - Thorpe G. 2001. Physical basis of aeration. En: Navarro S. y Noyes R. (Eds.), *The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*. CRC Press, Boca Raton, USA.
 - Weinberg Z.; Yan Y.; Chen Y.; Finkelman S.; Ashbell G. y Navarro S. 2008. The effect of moisture level on high moisture maize (*Zea mays* L.) under hermetic storage conditions - in vitro studies. *J. Stored Prod. Res.*, 44: 136 - 144.
 - White N.; Sinha R. y Muir W. 1982. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Can. Agric. Eng.*, 24: 35 - 42.

Concentración de gases en la atmósfera intersticial de un silo bolsa con trigo

Parte II: análisis de sensibilidad y efecto de las condiciones de almacenamiento de los granos

Rita Abalone¹
Analía Gastón¹
Leandro Cardoso²
Ricardo Bartosik²
Juan Rodríguez²

Resumen

Un modelo global de capacidad concentrada se aplicó para simular la evolución de la concentración de gases en trigo almacenado en un silo bolsa. Se analizó la sensibilidad de la solución al modelo de velocidad de respiración y a la permeabilidad (grado de hermeticidad a los gases del silo bolsa).

Los resultados mostraron que la concentración de gases es más sensible a cambios en la velocidad de respiración que a la permeabilidad del plástico. Cambios considerables se producen en la concentración de gas en un silo bolsa dañado. La definición de una permeabilidad efectiva para dar cuenta de la transferencia de gases a través de las perforaciones y la capa de plástico permitió el análisis del efecto de diferentes configuraciones de perforaciones (número y tamaño de las perforaciones) en la evolución de la concentración de gases. Se investigó la influencia de las condiciones de almacenamiento de los granos en la evolución de la concentración de los gases. El modelo se aplicó para temperaturas inicial de grano de 20,0 °C, 25,0 °C, 30,0 °C y 40,0 °C y CH en el rango (12,0% - 16,0%) y condiciones climáticas de la región del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Cuando se almacenó grano seco (12,0% - 13,0%), el nivel de O₂ se mantuvo por encima del 12,0% y el nivel de CO₂ por debajo de 7,0%. Para grano húmedo (15,0% - 16,0%), el nivel de CO₂ se ubicó en el rango de 14,0% - 16,0% después de 6 meses de almacenamiento. Las simulaciones mostraron que para granos húmedos las condiciones anaeróbicas se pueden alcanzar dentro de las 2 semanas a 3 meses de almacenamiento, dependiendo de la temperatura inicial del grano. La estima-

¹FCEIA - Universidad Nacional de Rosario (Santa Fe), Argentina.

²EEA INTA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

ción promedio de la pérdida de materia seca (PMS) para todas las condiciones de almacenamiento se mantuvo siempre por debajo de 0,04%, el límite crítico para el almacenamiento seguro de trigo que se utilizará para semillas.

Notación

a_1, a_2	..... constantes
A_s	.....área de transferencia de gases del silo bolsa, m ²
A_p	.....área de la perforación, m ²
d_p	.....diámetro de la perforación, m
PMS	.....pérdida local acumulada de materia seca al tiempo t, mg [material seca] kg ⁻¹ [material seca]
\overline{PMS}	.....pérdida promedio acumulada de materia seca al tiempo t, mg [material seca] kg ⁻¹ [material seca]
f	.....factor de corrección, m
K_{fr}	.....permeabilidad efectiva del plástico, i= O ₂ , CO ₂ , m ³ d ⁻¹
K_p	.....permeabilidad efectiva de la perforación, m ³ d ⁻¹
K_{Tr}	.....permeabilidad efectiva total del silo bolsa, i= O ₂ , CO ₂ , m ³ d ⁻¹
L	.....espesor de la capa plástica, m
M_{CO_2}	.....peso molecular del dióxido de carbono, 44,0 gramos mol ⁻¹
N_p	.....número de perforaciones
P_{atm}	.....presión atmosférica, 1 at ó 101325 Pa
\overline{P}	.....permeabilidad equivalente del plástico, i= O ₂ , CO ₂ , m ³ md ⁻¹ m ⁻² at ⁻¹
V	.....volumen del lecho de granos, m ³

Símbolos griegos

βcociente de permeabilidad
---------	--------------------------------

Introducción

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA), Estación Experimental Balcarce (EEA) implementó una tecnología novedosa para monitorear el almacenamiento de granos en silo bolsas basada en la detección de CO₂ (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008; Rodríguez et al., 2008). El procedimiento consiste en comparar la concentración medida de CO₂ con valores referenciales que representan adecuadas condiciones de almacenamiento. Los experimentos de campo demostraron que este valor referencial depende del contenido de humedad (CH) del grano, de la temperatura y de la permeabilidad a los gases del silo bolsa. Además, se observó que este valor de referencia puede cambiar en función a la estación. Llevar a cabo ensayos experimentales de campo que cubran un amplio rango de posibles condiciones de almacenamiento pueden llevar

mucho tiempo y ser muy costosos, por lo cual un modelo matemático validado es una valiosa alternativa para realizar este análisis.

En la parte I de este estudio (Abalone et al., 2011) se presentó y validó un modelo para simular la evolución de la concentración de gases en un silo bolsa comparando datos predichos y medidos de O_2 y CO_2 en trigo almacenado en silos bolsas ubicados en el campo. La tasa de respiración del grano y la permeabilidad del silo bolsa fueron los parámetros relevantes del modelo.

La velocidad de respiración depende de diversos factores biológicos. La variabilidad de estos factores dificulta el desarrollo de modelos precisos de respiración y por lo tanto la predicción de la concentración de gases mediante la modelización matemática (Rennie y Tavoularis, 2009).

La permeabilidad del silo bolsa depende del espesor del plástico y de la composición del material, ambos fijados por el proceso de fabricación. Durante las operaciones de llenado del silo bolsa en el campo, el espesor del plástico es afectado por la cantidad de grano que se introduce en la bolsa. A pesar de que existe un procedimiento práctico para controlar el estiramiento de la bolsa, muchos silos bolsas son sobrellenados con el objetivo de maximizar la capacidad de almacenamiento. Además, un examen cuidadoso de un silo bolsa suele revelar un número de pequeñas perforaciones en el plástico producidas por animales salvajes, residuos de cosechas, etc. Como consecuencia, es muy probable que distintos silos bolsas en el campo tengan diferentes niveles de permeabilidad a los gases.

El daño en el plástico puede modificar significativamente la permeabilidad efectiva del silo bolsa. Este efecto puede ser analizado definiendo una permeabilidad efectiva global que considere la contribución de las perforaciones y de la capa plástica. Varios modelos han sido aplicados para predecir el transporte de gases a través de perforaciones en el diseño y optimización del envasado en atmósfera modificada.

Se han desarrollado ecuaciones empíricas para la permeabilidad efectiva de macroperforaciones en películas plásticas gruesas (Emond et al., 1991; Silva et al., 1999; Fonseca et al., 2000) o macroperforaciones en películas plásticas delgadas (Techavises y Hikida, 2008; González - Buesa et al., 2008), mientras que otras ecuaciones se fundamentan teóricamente (Renault et al., 1994; Hirata et al., 1996). Otros autores modificaron la ley de Fick considerando una trayectoria total efectiva de difusión que incluye un factor de corrección para tener en cuenta la resistencia al flujo de gas en los extremos a ambos lados de la perforación (Fishman et al., 1996; Lange et al., 2000; Paul y Clarke, 2002). Ghosh y Anantheswaran (2001) compararon los datos experimentales de microperforaciones con los valores predichos por aplicación de los modelos disponibles. Llegaron a la conclusión de que la mejor concordancia se logró aplicando el modelo de Fishman. La correlación de González - Buesa et al. (2008) concuerda bien con el modelo de Fishman y se puede aplicar a una amplia gama de condiciones (micro y macro perforaciones, y películas plásticas finas y gruesas). En contraste con lo que sucede en el diseño de envasado en atmósfera modificada, el número y tamaño de las perforaciones en los silos bolsas no puede ser controlado. Sin embargo, utilizando el modelo desarrollado en la parte I, los niveles de concentraciones de gas se pueden calcular para diferentes configuraciones de perforaciones. Esta información puede dar el orden de magnitud del cambio en la concentración de gas con respecto a los niveles de referencia y contribuir a identificar silos bolsas dañados.

Los objetivos de esta segunda parte del estudio fueron:

1. Analizar la sensibilidad de la concentración de gases estimada con el modelo desarrollado en la parte I a las variaciones en la velocidad de respiración y la permeabilidad del plástico.
2. Analizar el efecto del daño estructural del silo bolsa en la concentración estimada de gases intersticial, considerando un plástico con perforaciones.
3. Aplicar el modelo numérico para estudiar el efecto de la temperatura inicial del grano y el contenido de humedad en la evolución de la concentración de gases.

Materiales y métodos

Definición del caso base para el análisis de sensibilidad

Se modeló una sección de un metro de longitud de un silo bolsa con un espesor promedio de 240 μm con trigo almacenado como se muestra en la Figura 1. El área de transferencia de gases resultó $A_s = 5,5 \text{ m}^2$, el volumen $V = 4,5 \text{ m}^3$ y la porosidad del trigo ε se fijó en 0,4. Suponiendo que la mitad del espesor de la capa de plástico era de polietileno de HDPE y la otra mitad de polietileno de LDPE, la permeabilidad equivalente estimada para O_2 fue $9,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{md}^{-1} \text{m}^2 \text{at}^{-1}$ y para CO_2 fue $3,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{md}^{-1} \text{m}^2 \text{at}^{-1}$, siendo el cociente de permeabilidad: $\beta_r = \bar{P}_{\text{CO}_2} / \bar{P}_{\text{O}_2} \cong 3$.

La temperatura de embolsado se fijó en 25,0 $^\circ\text{C}$ tanto para grano seco (13,0%) como para grano húmedo (15,0%). La evolución de la temperatura promedio del silo bolsa desde el verano (enero) al invierno (julio) para condiciones climáticas de la región del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina, fue utilizada como dato de entrada en la correlación de White et al. (1982) para calcular la velocidad de producción de CO_2 .

Permeabilidad efectiva del silo bolsa incluyendo las perforaciones

La permeabilidad efectiva total del silo bolsa, considerando la contribución de las perforaciones y la capa plástica puede ser expresada por:

$$K_{Ti} = K_{fi} + K_{pi} = \frac{A_s \bar{P}_i P_{atm}}{L} + K_{pi} \quad 1$$

donde K_{fi} y K_{pi} en $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ ($i = \text{O}_2, \text{CO}_2$) son la permeabilidad efectiva del plástico y de las perforaciones, \bar{P}_{O_2} y \bar{P}_{CO_2} en $\text{m}^3 \text{md}^{-1} \text{m}^2 \text{at}^{-1}$, son la permeabilidad equivalente del plástico al O_2 y CO_2 , respectivamente; P_{atm} en Pa, es la presión atmosférica; L en m, es el espesor del plástico, A_s en m^2 , es el área de transferencia del silo bolsa.

De la revisión bibliográfica, los modelos publicados se basan en modificaciones de la ley de Fick o en correlaciones de datos experimentales.

La ley de Fick modificada se aplica para modelar la transferencia de gas a través de las perforaciones:

$$K_{pi} = \frac{N_p A_p D_{mi}}{(L + f)} \quad 2$$

donde N_p es el número de perforaciones en una sección de 1,0 m de largo de un silo bolsa, A_p en m^2 es el área de la perforación, D_{mi} es el coeficiente de difusión binaria del componente i en la mezcla de gases, L en m, es el espesor del plástico y f es el factor de corrección. Este factor de corrección incluido para tener en cuenta la resistencia a la difusión de gases, ha sido modelado como una fracción del diámetro de la perforación d_p . En particular, Fishman et al. (1996) asumieron $f=1/2 d_p$. Paul y Clarke (2002) dieron una derivación teórica para $f=7/6 d_p$.

Recientemente, González et al. (2008; 2009) derivaron la siguiente correlación:

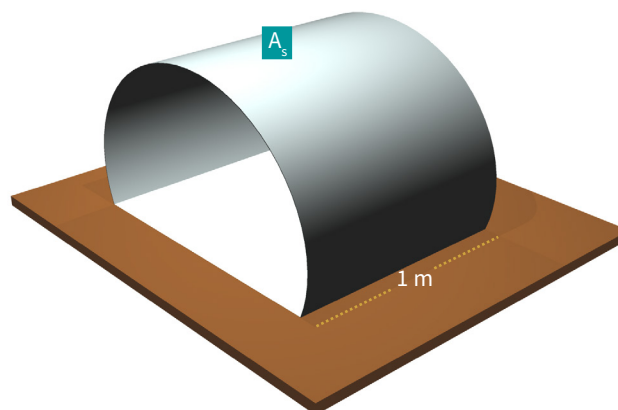
$$K_{pi} = a_{1i} A_p^{a_{2i}} \quad i = O_2, CO_2$$

3

donde A_p es el área de una perforación, y a_1 and a_2 son constantes para cada gas i . Estos autores informaron que estas correlaciones pueden ser usadas para un amplio rango de condiciones (diámetro de las perforaciones entre 40 μm y 10 mm, espesor del plástico entre 30 μm y 1,5 mm).

Figura 1.

VOLUMEN DE CONTROL PARA EL INTERCAMBIO GASEOSO EN EL SILO BOLSA



Resultados y discusión

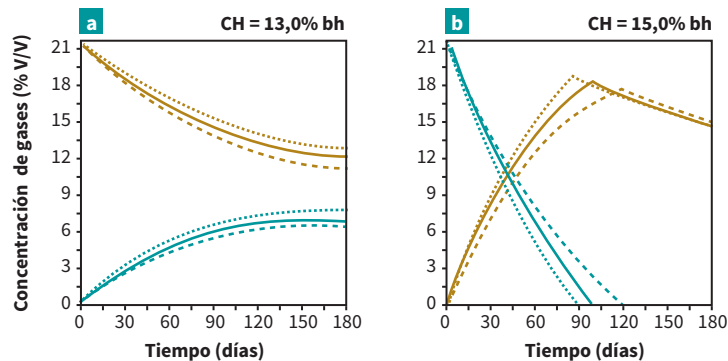
Efecto de la velocidad de respiración en las concentraciones de O_2 y CO_2

La sensibilidad de los valores predichos de la concentración de gases a la velocidad de respiración fue testeada mediante el modelo variando en $\pm 10,0\%$ la tasa de respiración predicha con la correlación de White et al. (1982). Los resultados de la simulación para grano seco (13,0%), muestran que los cambios del 10,0% en la velocidad de respiración producen un cambio de la concentración de gases de aproximadamente $\pm 1,0$ punto % luego de 180 días de almacenamiento (Figura 2 a). Para grano húmedo (15,0%) las diferencias en la concentración de gases fueron de alrededor de $\pm 2,0$ puntos % luego de 100 días de almacenamiento, mientras que durante las últimas etapas de almacenamiento las curvas de CO_2 y O_2 se aproximaron entre sí (Figura 2 b).

Se puede concluir que la sensibilidad del modelo a una ecuación de velocidad de respiración dada es evidente. A pesar de que muchos factores biológicos pueden afectar las velocidades de respiración, se debe realizar un esfuerzo mayor para desarrollar ecuaciones precisas de respiración que mejoren las predicciones del modelo.

Figura 2.

Sensibilidad a la velocidad de respiración de la concentración predicha de gases.



Temperatura inicial del grano: 25,0 °C

— caso base — caso base
- - - +20,0% - - - +10,0%
- - - -20,0% - - - -10,0%

Efecto de la permeabilidad del plástico en las concentraciones de O₂ y CO₂

La sensibilidad del modelo a la permeabilidad equivalente del plástico fue estudiada realizando la simulación con una variación del 20,0% de este parámetro. Esta variación puede considerar los cambios en el espesor del plástico como resultado del estiramiento producido durante el llenado del silo bolsa, o en la proporción en la cual las diferentes capas de plástico son combinadas (LDP o HDP) debido a inconsistencias en la fabricación.

Los resultados, mostrados en la Figura 3 (a, b), indican que la sensibilidad del modelo a la permeabilidad del plástico es mayor para grano húmedo que para grano seco. De todas maneras, las diferencias en las concentraciones de gases con respecto al caso base fueron de menos del 1,0 punto % para CO₂ y de menos de 0,3 puntos % para O₂.

Estas diferencias pueden ser del mismo orden de magnitud que los errores experimentales involucrados en la medición de la composición de gases en silos a gran escala situados en el campo, sugiriendo que la sensibilidad del modelo a variaciones en la permeabilidad efectiva es más bien baja.

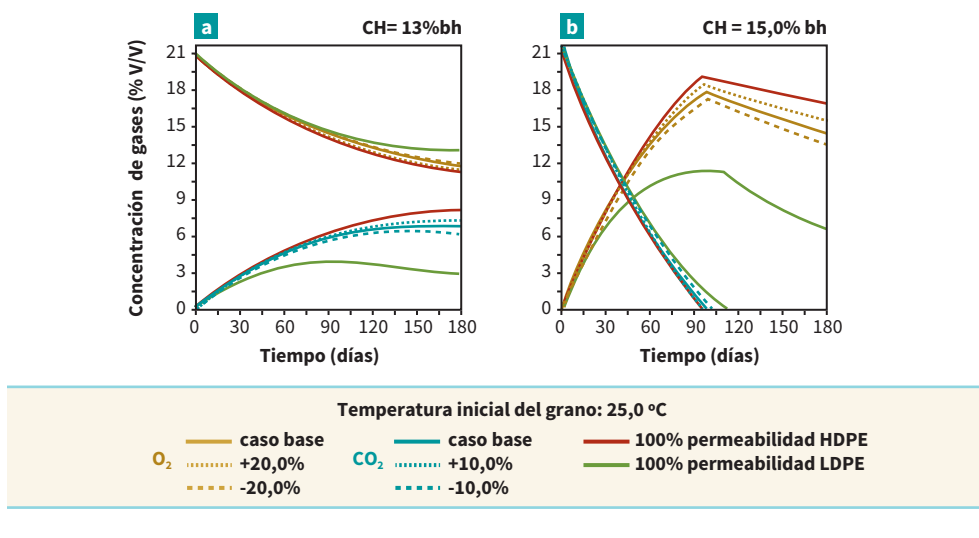
Por otro lado, dado que la capa plástica del silo bolsa es una combinación de plásticos con valores de permeabilidad muy diferentes, para la comparación, el valor más alto (100,0% LDPE) y el más bajo (100,0% HDPE) de la capa plástica fueron también estudiados (Figura 3 a, b). El primer caso representa un incremento en la permeabilidad del

100,0% en O₂ y un incremento del 200,0% en CO₂, y el segundo caso corresponde a una disminución del 50,0% y 70,0%, respectivamente.

Estos valores límites produjeron una diferencia de aproximadamente 5,0 puntos % para CO₂ y 3,0 puntos % para O₂ al finalizar el periodo de almacenamiento. En la parte I de este estudio, se obtuvo una buena concordancia entre los valores predichos y los medidos asumiendo una permeabilidad equivalente (50,0% LDPE; 50,0% HDPE) para el silo bolsa (SE de 1,6 puntos % para CO₂ y de 2,5 puntos % para O₂).

Sin embargo, para trigo seco, los valores de concentraciones de CO₂ por debajo del 2,0 puntos % fueron medidos durante la estación cálida. Aún con un incremento del 100,0% en la permeabilidad del plástico (100,0% LDPE), el modelo falló en predecir dichos niveles bajos de CO₂, como se puede observar en la Figura 3 a. Una mayor permeabilidad sería necesaria para reproducir este comportamiento, lo que sugiere que para esos casos el efecto de las perforaciones de los silo bolsa debe ser incluido.

Figura 3. Sensibilidad a la permeabilidad efectiva de la concentración predicha de gases.



Efecto del daño estructural del silo bolsa en las concentraciones de CO₂ y O₂

La Tabla 1 compara valores estimados de la permeabilidad efectiva de perforaciones (K_p) para diferentes tamaños de las mismas. Las ecuaciones de Fishman (1996) y Paul y Clarke (2002) fueron aplicadas asumiendo una difusividad másica promedio de $Dim = 0,2 \cdot 10^{-4} m^2 s^{-1}$ para CO₂ y O₂. En general, las perforaciones permiten ingreso no selectivo de gases y los valores reportados para el cociente de permeabilidades β por diferentes autores son cercanos a 1. Las velocidades de transmisión de CO₂ y O₂ calculadas con las ecuaciones empíricas de González - Buesa et al. (2009) fueron promediadas para comparar este valor con aquellos obtenidos con las correlaciones de Fishman y Paul y Clarke.

Los valores predichos con el modelo de González fueron en promedio un 15,0% más altos que aquellos obtenidos con el modelo de Fishman y un 60,0% más altos que aque-

llos con el modelo de Paul y Clarke. Techavises y Hikida (2008) también informaron que la permeabilidad efectiva predicha con el modelo de Clarke y Paul fue en promedio 2 veces más pequeña cuando se compara con datos disponibles de micro y macro perforaciones.

Como el espesor promedio del plástico (240 mm) y los posibles diámetros de las perforaciones en los silo bolsas ubicados en los campos están dentro del rango considerado por el modelo de González, esta correlación fue elegida para estimar la permeabilidad efectiva de un silo bolsa dañando.

Tabla 1.

Comparación de los valores estimados de permeabilidad efectiva de perforaciones (K_p) de diferentes tamaños usando las correlaciones de Paul y Clarke (M1), Fishman (M2) y González (M3).

d_p	$A_{p\ total}$	M1	M2	M3
		K_p	K_p	K_p
10^{-3} m	10^{-6} m ²	10^{-8} m ³ s ⁻¹	10^{-8} m ³ s ⁻¹	10^{-8} m ³ s ⁻¹
1,0	0,8	1,0	1,9	2,4
3,0	7,1	3,4	7,3	8,3
5,0	19,6	5,8	12,9	14,8
10,0	78,5	11,9	27,0	32,9

Tabla 2.

Permeabilidad efectiva estimada de perforación (K_p) y permeabilidad efectiva total ($K_T = K_p + K_{ff}$) usando la correlación de González para diferentes configuraciones.

GONZÁLEZ - BUESA et al. (2008)								
N_p 10^{-3} m	d_p 10^{-3} m	$A_{p\ total}$ 10^{-6} m ²	K_p 10^{-8} m ³ s ⁻¹	K_{TCO_2}		K_{TO_2}		β
				10^{-8} m ³ s ⁻¹	% ^a	10^{-8} m ³ s ⁻¹	% ^a	
0	0	0,0	0,0	8,6	0,0	2,6	0,0	3,3
1	1,0	0,8	2,4	10,9	27,0	4,9	90,0	2,2
5	1,0	3,9	11,7	20,3	137,0	14,4	451,0	1,4
9	1,0	7,1	21,1	29,7	246,0	23,7	811,0	1,3
10	1,0	7,9	23,5	32,1	273,0	26,1	902,0	1,2
1	3,0	7,1	8,3	16,9	96,0	10,9	318,0	1,6
5	3,0	35,3	41,4	49,9	481,0	44,0	1588,0	1,1
1	5,0	19,6	14,8	23,5	173,0	17,5	570,0	1,0
5	5,0	98,2	74,3	82,9	864,0	76,9	2851,0	1,1
1	10,0	78,5	32,9	41,5	382,0	35,5	1262,0	1,2
2	10,0	157,1	65,7	74,3	765,0	68,3	2524,0	1,1

$$K_p = \frac{K_{pO_2} + K_{pCO_2}}{2} \quad \text{con } K_{pi} = a_{ii} A_p^{a_{2i}} \quad i = O_2; CO_2$$

Los valores en negrita resaltan los valores correspondientes al caso base y aquellos correspondientes a una perforación.

^a cambio porcentual con respecto al caso base (sin perforaciones).

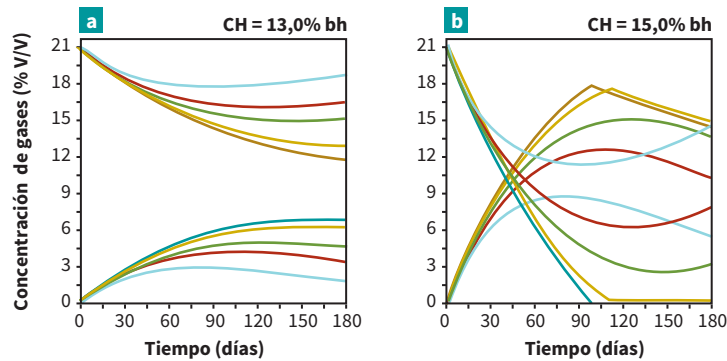
La Tabla 2 presenta valores estimados de permeabilidad efectiva de perforaciones (K_p) para diferentes configuraciones (número y tamaño de las perforaciones) como también la permeabilidad efectiva total ($K_p + K_f$). Notar que $N_p = 0$ implica $K_{Ti} = K_f$. La Tabla 2 también presenta el cambio porcentual con respecto al caso base (sin perforaciones K_f). La presencia de perforaciones reduce el cociente β de transporte de gas, por lo tanto los cambios en la concentración de O_2 serán más pronunciados que aquellos cambios en CO_2 con respecto al caso base.

La permeabilidad efectiva de un número mayor de pequeñas perforaciones (p. ej., $N_p = 9$ y $d_p = 1,0 \cdot 10^{-3}$ m, $A_{p\text{total}} = 7,1 \cdot 10^{-6}$ m²) es mayor que aquella con una perforación con casi la misma área de transferencia (p. ej., $N_p = 1$ y $d_p = 3 \cdot 10^{-3}$ m, $A_p = 7,1 \cdot 10^{-6}$ m²), dado que la permeabilidad es directamente proporcional al área de transferencia total, pero inversamente proporcional a la trayectoria total efectiva de difusión de una perforación.

La Figura 4 (a, b) grafica el cambio predicho de la concentración de gases en un silo bolsa para grano seco (13,0%) y húmedo (15,0%), respectivamente. Una perforación de 1 mm, 3 mm, 5 mm o 10 mm de diámetro fue considerada para una sección de 1 m de largo de un silo bolsa ($A_s = 5,5$ m²). Se puede observar que la diferencia en las concentraciones de CO_2 y O_2 con el caso base se incrementa con el diámetro de la perforación. La diferencia de la concentración de CO_2 entre el caso base y la línea que corresponde a una perforación de 10 mm de diámetro fue tan alta como 5,0 y 7,0 puntos % para un silo bolsa con 13,0% y 15,0%, respectivamente. Más aún, la diferencia para la concentración de O_2 fue mayor (6,0 y 9,0 puntos % para silo bolsas con 13,0% y 15,0%, respectivamente).

Figura 4.

Evolución predicha de las concentraciones de O_2 y CO_2 considerando una perforación de diferentes diámetros por metro de silo bolsa. Permeabilidad efectiva estimada de una perforación aplicando el modelo de González.



Temperatura inicial del grano: 25,0 °C

— O_2 caso base — 1 mm — 5 mm
— CO_2 caso base — 3 mm — 10 mm

Las Figuras 5 y 6 comparan los cambios predichos de la concentración de gases para diferentes números de perforaciones (1 - 5) y diferentes tamaños (3 mm, 5 mm y 10 mm de diámetro), que representan las típicas perforaciones producidas por residuos de cosecha

Figura 5.

Evolución predicha de las concentraciones de O_2 y CO_2 para diferentes tamaños y números de perforaciones por metro de silo bolsa. Permeabilidad efectiva de perforación estimada aplicando el modelo de González.

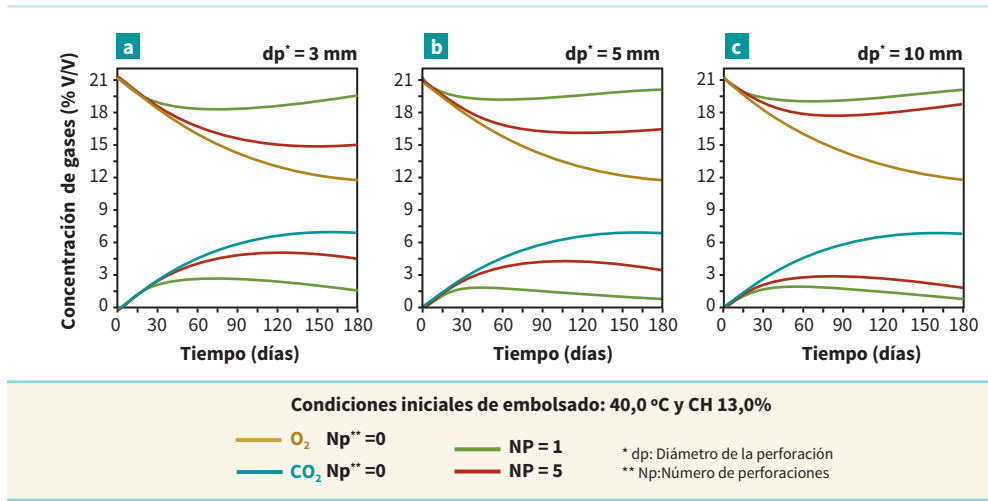
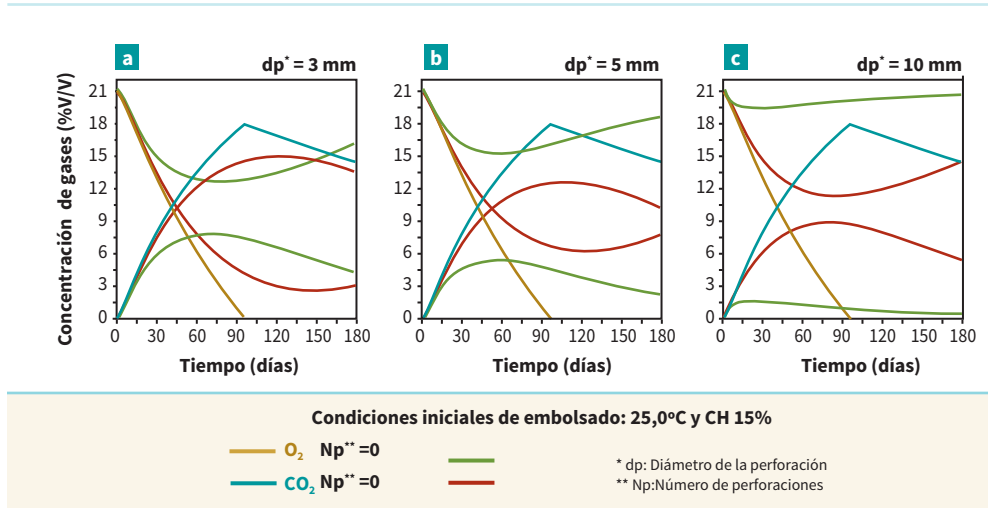


Figura 6.

Evolución predicha de las concentraciones de O_2 y CO_2 para diferentes tamaños y números de perforaciones por metro de silo bolsa. Permeabilidad efectiva de perforación estimada aplicando el modelo de González.



en los silos en el campo. Estos resultados muestran cambios significativos en la evolución de la concentración de gases con respecto al caso base. Para las perforaciones con diámetros más grandes, el nivel de O_2 comienza a incrementarse durante el último periodo de almacenamiento (120 - 180 días). A medida que llega el invierno, la velocidad de respiración se lentifica porque disminuye la temperatura del grano. Por lo tanto, la velocidad

de consumo de O_2 es menor que la velocidad de ingreso de O_2 . Este comportamiento no se observó para grano húmedo en silo bolsa sin perforaciones (caso base, línea negra) porque la velocidad de consumo de O_2 fue mayor que la velocidad de ingreso de O_2 .

Se ha mencionado anteriormente que la concentración de gases podría ser utilizada como una herramienta de monitoreo para detectar problemas de almacenamiento en el silo bolsa. Si el valor medido de CO_2 es mayor que el valor de referencia, podría indicar excesiva actividad biológica, probablemente causada por el agua de lluvia que entra al silo bolsa a través de las perforaciones lo que causa que el grano se descomponga. Por otro lado, si el valor medido es menor que el valor de referencia (caso base sin perforaciones), podría implicar que el CO_2 producido está saliendo a través de las perforaciones del silo bolsa.

El valor de referencia es válido para un rango de CH y temperatura del grano, ya que ambos factores afectan la velocidad de respiración como se ha mostrado en la parte I de este estudio. Sin embargo, la permeabilidad del silo bolsa, como fue mencionado anteriormente, también tiene un efecto importante en la concentración medida de CO_2 . Es bastante difícil estimar la hermeticidad de un silo bolsa dado. Entre los dos factores que afectan la permeabilidad, espesor/composición del plástico y perforaciones, parece que el efecto del espesor/composición sería menos variable (y también puede ser estimado) que el efecto causado por las perforaciones. Con la finalidad de considerar el efecto de las perforaciones, una solución podría ser llevar a cabo una prueba de hermeticidad del silo bolsa (Darby y Caddick, 2007). Esta prueba de hermeticidad podría proveer información adicional sobre las velocidades de salida de CO_2 e ingreso de O_2 , mejorando la predicción del modelo respecto de la concentración de gases dentro del silo bolsa.

Desafortunadamente ese tipo de información (rango típico de hermeticidad de un silo bolsa en el campo) no está disponible.

Efecto de la temperatura y contenido de humedad iniciales del grano en las concentraciones de O_2 y CO_2

La Figura 7 muestra el cambio en el promedio de la temperatura de un silo bolsa desde el verano al invierno cuando las temperaturas iniciales de almacenamiento fueron 20,0 °C, 25,0 °C, 30,0 °C y 40,0 °C, para el caso base ($K_T = K_{fp}$, silo bolsa sin perforaciones).

El cambio en las concentraciones de O_2 y CO_2 para grano seco (12,0% - 13,0%) está representado en la Figura 8 (a, b). Para 20,0 °C - 30,0 °C, el nivel de CO_2 se incrementó a 4,0% y 7,0%, mientras que el nivel de O_2 disminuyó a 16,0% y 12,0%, respectivamente. Las diferencias en los niveles de concentración entre el verano (40 días) y el invierno (180 días) permanecieron dentro de los 3,0 puntos %. A 14,0% Figura 8 (c) la actividad de los hongos se vuelve importante incrementando la concentración de CO_2 a 12,0% y reduciendo la concentración de O_2 a 5,0%. Se encontraron diferencias de hasta 7,0 puntos % entre verano (40 días) e invierno (180 días).

La Figura 8 (c) también ilustra que para una temperatura inicial de almacenamiento alta (40,0 °C), el O_2 disminuye a menos del 1,0% después de 120 días.

Las Figuras 9 (a, b) muestran la evolución de CO_2 y O_2 para grano húmedo (15,0% - 16,0%). Para todas las temperaturas iniciales, el O_2 es consumido completamente y a partir de entonces permaneció a nivel 0 porque todo el O_2 ingresante a través del plástico fue consumido por la respiración. El CO_2 se incrementó hasta 17,0% - 20,0% y luego comenzó

Figura 7.

Cambio de la temperatura promedio de un silo bolsa desde el verano al invierno para diferentes temperaturas iniciales de almacenamiento del grano.

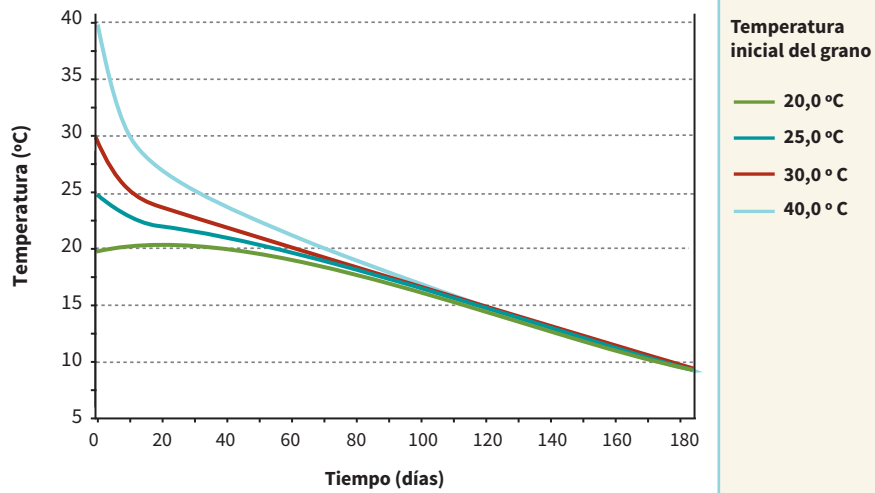
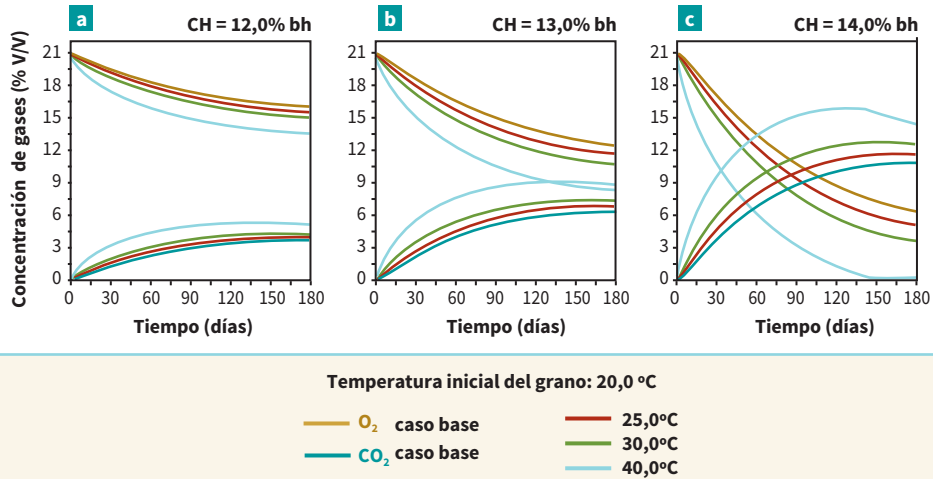


Figura 8.

Evolución predicha de las concentraciones de O₂ y CO₂ desde el verano al invierno para diferentes temperaturas iniciales de almacenamiento del grano.



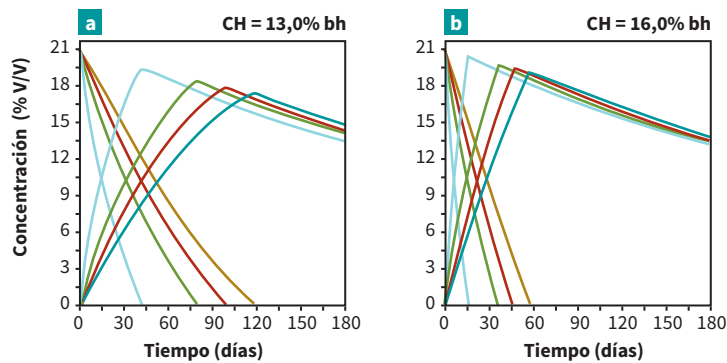
a disminuir como resultado de las pérdidas a través del plástico dado que la permeabilidad al CO₂ es aproximadamente 3 veces más grande que al O₂ ($\beta = 3$).

Como se esperaba, las figuras muestran que el CH del grano tiene un efecto más fuerte en el cambio de la concentración de gas que la temperatura inicial. También revelan la importancia de medir la temperatura de embolsado si la concentración de CO₂ será

usada como un indicador de las condiciones de almacenamiento. Teniendo en cuenta condiciones de almacenamiento estándar tales como temperatura inicial del grano de 20,0 °C - 30,0 °C y contenido de humedad del grano de 13,0%, el nivel de referencia de CO₂ esperado es aproximadamente de 5,0% después de 80 días (Figura 8 b), en consecuencia, concentraciones de aproximadamente 10,0% sería una alerta de actividad biológica en exceso (p. ej., a causa del agua de lluvia que entra en el silo bolsa). Sin embargo, si el grano fue embolsado a una temperatura alta (p. ej., 40,0 °C) la concentración de CO₂ esperada sería cercana al 10,0%, a pesar de que no se observó excesiva actividad biológica. En consecuencia, los valores referenciales de CO₂ que indican adecuadas condiciones de almacenamiento dependerán en gran medida del CH pero también en la temperatura de embolsado del grano, lo que está relacionado con las condiciones climáticas durante la cosecha. Además, el efecto de la temperatura de embolsado es más notorio a medida que se incrementa el CH.

Figura 9.

Evolución predicha de las concentraciones de O₂ y CO₂ desde el verano hasta el invierno para diferentes temperaturas iniciales de almacenamiento del grano.



Temperatura inicial del grano: 20,0 °C

— O₂ caso base — 25,0°C
— CO₂ caso base — 30,0°C
— 40,0°C

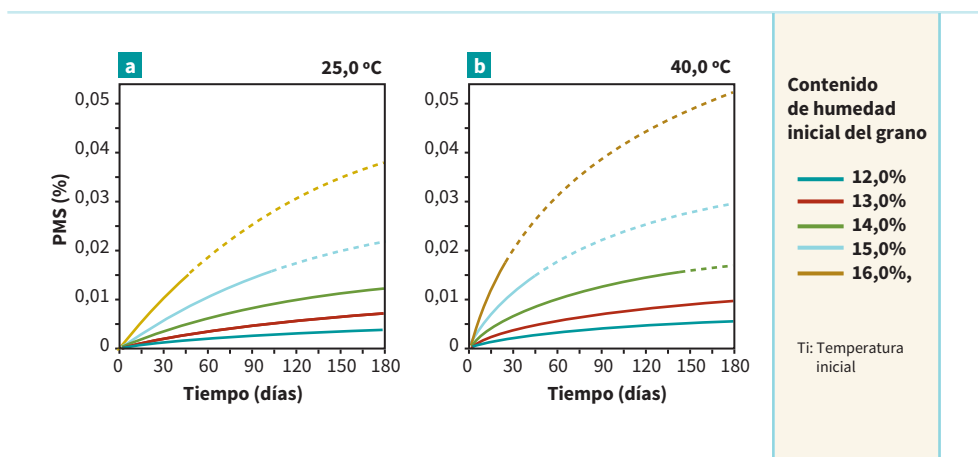
Estimación de pérdida de materia seca

Para estimar el efecto de diferentes condiciones de almacenamiento en la calidad del grano, se calculó la pérdida de materia seca (PMS) para un CH de 12,0% - 16,0%, 25,0 °C y 40,0 °C de temperatura inicial de embolsado, caso base. White et al. (1982) consideró que un 0,1% PMS es inaceptable para el trigo, y si el trigo almacenado es para ser usado como semilla, el límite aproximado para una almacenamiento seguro es 0,04% de PMS.

La evolución del promedio de PMS (%) para 25,0 °C se muestra en la Figura 10 a. Para trigo a 12,0%, 13,0% y 14,0%, como consecuencia de un CH inicial bajo y una temperatura

descendente a través del tiempo, el promedio de PMS fue de 0,004%, 0,007% y 0,01% luego de 180 días, respectivamente. Para el trigo a 15,0% y 16,0%, el promedio de PMS fue de aproximadamente 0,02% luego de 98 y 48 días, respectivamente. De aquí en adelante, el aumento de la PMS sería probablemente muy pequeño debido a la inhibición de la respiración, ya que el nivel de O_2 predicho por el modelo permanece muy bajo. Dado que este efecto no puede, todavía, ser tenido en cuenta, se continuó el cálculo permitiendo que la respiración aeróbica continúe con la misma velocidad para computar la PMS ilustrada por la línea punteada. Las líneas punteadas darían una estimación del valor del promedio de PMS producido cuando el silo bolsa no es hermético a los gases y el O_2 está disponible sin restricciones para la respiración.

Figura 10.
Evolución de la PMS promedio porcentual (%).



A 40,0 °C de temperatura inicial (Figura 10 b), para trigo a 12,0%, 13,0%, 14,0%, 15,0% y 16,0%, la PMS se incrementó a 0,006%, 0,01%, 0,02%, 0,01% y 0,01% luego de 180, 180, 150, 35, 13 días, respectivamente. La PMS se muestra con las líneas punteadas. Para trigo a 16,0% y 40,0 °C de temperatura inicial, que representa la peor condición de almacenamiento, el promedio de PMS fue de alrededor del 0,05%, excediendo los límites de seguridad para trigo usado para semilla, pero no fue lo suficientemente alto como para alcanzar el límite que indicaría pérdida en la calidad comercial del grano.

Conclusiones

Se aplicó un modelo global de capacidad concentrada para la transferencia de gases para simular el intercambio de gases en silo bolsas. La sensibilidad del modelo a variaciones de una dada velocidad de respiración fue más significativa que aquellas obtenidas para la permeabilidad del plástico. Se realizaron simulaciones para explorar el efecto del daño estructural del silo bolsa. Se mostró que aún una pequeña perforación puede cambiar significativamente la evolución de la composición de los gases. En los silo bolsas ubicados en el campo, las diferencias en la permeabilidad efectiva podrían ser del mismo

orden de magnitud o aún más elevadas que las consideradas en este estudio de sensibilidad. Dado que las perforaciones en el silo bolsa ubicado en el campo pueden sustancialmente variar de bolsa a bolsa, se requiere implementar una prueba de hermeticidad con el fin de estudiar el rango típico de las condiciones de hermeticidad en esos silos bolsas. Esta información podría ayudar para una mejor caracterización de las tasas de intercambio de gases y mejorar el modelo de predicción.

Se analizó el efecto de la temperatura inicial de embolsado y del contenido de humedad. Cuando se almacena grano seco (12,0% - 13,0%), el nivel de O₂ permanece sobre el 12,0% y el nivel de CO₂ permanece por debajo del 7,0%. Para grano húmedo (15,0% - 16,0%), el nivel de CO₂ estuvo en el rango del 14,0% - 16,0% luego de 6 meses de almacenamiento. La simulación mostró que para grano húmedo las condiciones anaeróbicas se pueden alcanzar en un periodo de 2 semanas a 3 meses de almacenamiento, dependiendo de la temperatura inicial del grano. La PMS promedio estimada para todas las condiciones de almacenamiento siempre permaneció por debajo del 0,04%, el límite crítico para almacenamiento seguro de trigo usado para semilla.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer a las siguientes instituciones:

ANPCYT/FONCYT (PICT 2008 0460), Universidad Nacional de Rosario (PID ING295) y al INTA Proyecto: Eficiencia en la Poscosecha (AEAI 11 - 30023) por el apoyo a este trabajo.

Referencias

- Abalone R.; Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2011 a. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo-bag. Part I: Model development and validation. *J. Stored Prod. Res.*, 47: 268 - 275. doi: 10.1016/j.jspr.2011.05.004
- Bartosik R.; Cardoso M.L. y Rodríguez J. 2008. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: *Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products*, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: *Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products*, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Darby J. y Caddick L. 2007. Review of the harvest bag technology under Australian conditions. CSIRO Entomology Technical report N° 105.
- Emond J.; Castaigne F.; Toupin C. y Desilets D. 1991. Mathematical modelling of gas exchange in modified atmosphere packaging. *Trans. ASAE*, 34: 239 - 254.

- Fishman S.; Rodov V. y Ben - Yehosua S. 1996. Mathematical model for perforation effect on oxygen and water vapour dynamics in modified atmosphere packages. *J. Food Sci.*, 61 (5): 956 - 961.
- Fonseca S.; Oliveira F.; Lino I. y Brecht J. 2000. Modelling O₂ and CO₂ exchange for development of perforation - mediated modified atmosphere packaging. *J. Food Eng.*, 43: 9 - 15.
- Ghosh V. y Anantheswaran R. 2001. Oxygen transmission rate through microperforated films: measurements and model comparison. *J. Food Process Eng.*, 24: 113 - 133.
- González - Buesa J.; Ferrer A.; Oria R. y Salvador M. 2008. Determination of O₂ and CO₂ transmission rates through microperforated films for modified atmosphere packaging of fresh fruits and vegetables. *J. Food Eng.*, 86: 194 - 201.
- González - Buesa J.; Ferrer A.; Oria R. y Salvador M. 2009. A mathematical model for packaging with microperforated films of fresh - cut fruits and vegetables. *J. Food Eng.*, 95: 158 - 165.
- Hirata T.; Makino Y.; Ishikawa Y.; Katsuura S. y Hasegawa Y. 1996. A theoretical model for designing modified atmosphere packaging with perforation. *Trans. ASAE*, 39: 1499 - 1504.
- Lange J.; Büsing B.; Hertlein J. y Hediger S. 2000. Water vapour transport through large defects in flexible packaging: modeling gravimetric measurement and magnetic resonance imaging. *Pack. Technol. Sci.*, 13: 139 - 147.
- Paul D. y Clarke R. 2002. Modeling of modified atmosphere packaging based on designs with a membrane and perforations. *J. Membr. Sci.*, 208: 269 - 283.
- Rennie T. y Tavoularis S. 2009. Perforation - mediated modified atmosphere packaging. Part II. Implementation and numerical solution of a mathematical model. *Postharvest Biol. Technol.*, 51: 10 - 20.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Cardoso L. y Croce D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 589 - 592. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Renault P.; Souty M. y Chambroy Y. 1994. Gas exchange in modified atmosphere packaging. 1: a new theoretical approach for micro - perforated packs. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 29: 365 - 378.
- Silva F.; Chau K.; Brecht J. y Sargent S. 1999. Tubes for modified atmosphere packaging of fresh fruits and vegetables: effective permeability measurements. *Appl. Eng. Agric.*, 15: 313 - 318.
- Techavises N. y Hikida Y. 2008. Development of a mathematical model for simulating gas and water vapor exchanges in modified atmosphere packaging with macroscopic perforations. *J. Food Eng.*, 85: 94 - 104.
- White N.; Sinha R. y Muir W. 1982. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Can. Agric. Eng.*, 24: 35 - 42.

Modelado matemático de perfiles de concentración de oxígeno y dióxido de carbono en la atmósfera intersticial del silo bolsa

Rita Abalone¹
Analia Gastón¹

Resumen

En este trabajo, se compara la concentración de oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera intersticial de un silo bolsa predicha por un modelo de difusión con los valores obtenidos con un modelo global de capacidad concentrada. El primer modelo usa valores locales de temperatura y contenido de humedad del grano (CH) para evaluar la velocidad de respiración del grano mientras que el segundo modelo considera el promedio de los valores de esas magnitudes. Las comparaciones fueron realizadas para trigo almacenado a una temperatura inicial de 20,0 °C, 25,0 °C, 30,0 °C y 40,0 °C, y CH en el rango (12,0% - 16,0%), bajo condiciones climáticas del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Para un CH inicial uniforme, la diferencia entre la concentración promedio de CO₂ y O₂ predicha fue de menos del 1,0 punto %. Además, el modelo de difusión fue aplicado para analizar efectos locales en el silo bolsa: la evolución de la concentración de gases cuando hay un foco de grano más húmedo (16,0%) que el resto (13,0%) en la parte inferior del silo bolsa; la penetración de O₂ a través de una pequeña abertura ubicada en la parte superior del silo bolsa inicialmente en anaerobiosis.

Palabras clave: silo bolsa, almacenamiento hermético, atmósfera modificada, trigo, modelado.

Introducción

En 2010 más de 40,0 millones de toneladas de granos fueron almacenadas en sistemas herméticos (silo bolsas) en Argentina. Esta técnica, originalmente usada para granos ensilados, consiste en almacenar grano seco en bolsas de plástico selladas herméticamente. El proceso de respiración de los agentes biológicos en el ecosistema del grano

¹FCEIA - Universidad Nacional de Rosario (Santa Fe), Argentina.

(grano, insectos, ácaros y microorganismos) aumenta la concentración de dióxido de carbono (CO_2) y reduce la de oxígeno (O_2) promoviendo un ambiente propicio para la conservación de granos. La concentración de gases depende del balance entre la respiración del ecosistema, la entrada de O_2 del exterior al sistema, y la pérdida de CO_2 al aire ambiente. La transferencia de gases depende de la diferencia de presión parcial de gas y de la permeabilidad efectiva del plástico (perforaciones y permeabilidad natural del plástico a los gases).

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Balcarce (EEA) implementó una novedosa tecnología para monitorear el almacenamiento de granos en silo bolsas basada en la detección de CO_2 (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008). El procedimiento consiste en comparar la concentración de CO_2 medida en algunos puntos del silo bolsa (valor local de concentración) con un valor referencial que representa condiciones adecuadas de almacenamiento. Sin embargo, un mejor conocimiento de los perfiles de concentraciones CO_2 característicos para un rango de condiciones de almacenamiento en silo bolsas (p. ej., temperatura del grano, contenido de humedad (CH), tiempo de almacenamiento, etc.) es necesario para definir las posiciones del muestreo y la frecuencia del monitoreo. Esta información es relevante para desarrollar una tecnología confiable para controlar el almacenamiento de granos basada en la detección de CO_2 .

Los modelos de simulación son muy útiles para analizar rápidamente numerosas situaciones y pueden describir el efecto de diferentes factores que afectan al grano almacenado bajo condiciones de hermeticidad, especialmente en este caso donde existe una fuerte interacción entre los factores externos y los componentes interrelacionados del ecosistema del grano en el silo bolsa. Recientemente, los autores han desarrollado un modelo global de capacidad concentrada para calcular el cambio en las concentraciones promedio de O_2 y CO_2 en un silo bolsa de trigo, considerando simultáneamente el consumo de O_2 , la generación de CO_2 y la permeabilidad a la transferencia de gases del silo bolsa. Este modelo funciona en combinación con un modelo 2D de transferencia de masa y calor que predice la temperatura de almacenamiento del grano y el CH como funciones de las condiciones climáticas. Ambos modelos fueron validados por comparación de los valores predichos de temperatura, CH del grano, concentraciones promedio de O_2 y CO_2 con valores medidos en pruebas de campo (Gastón et al., 2009; Abalone et al., 2009; 2010 a; 2010 b).

En el presente trabajo, la difusión de gases fue incorporada en el modelo con la finalidad de predecir la distribución de gases en el silo bolsa y cuantificar el efecto de promediar las variaciones locales de la temperatura y la migración de humedad en la predicción de las concentraciones promedio de gases. El modelo también fue aplicado para estudiar efectos locales como la distribución no uniforme de CH inicial y también el daño en la capa plástica (perforaciones) en la evolución de la concentración de gas.

Materiales y métodos

Silo bolsas

Los silo bolsas tienen 60,0 m de largo, 2,7 m de diámetro y 230 - 250 micrones de espesor. Las bolsas están hechas de 3 capas de plástico, el interior es negro y el exterior blanco

con estabilizadores de UV. Las capas de plástico son una mezcla de polietileno de alta densidad (HDPE) y baja densidad (LDPE).

Pueden almacenar aproximadamente 200,0 toneladas de granos (trigo, maíz y soja) y usualmente los productores almacenan su producción durante 6 a 8 meses.

Modelado matemático

Indicando los balances de masa (humedad, CO₂ y O₂) y energía para las fases grano y aire en un volumen de control, se obtiene el siguiente sistema acoplado:

$$c_b \rho_{bs} \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[k_b \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_b \frac{\partial T}{\partial y} \right] \right] + \rho_{bs} L_g \frac{\partial W_g}{\partial t} + \rho_{bs} q_H Y_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{1}$$

$$\rho_{bs} \frac{\partial W_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_w \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial x} + \omega \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_w \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial y} + \omega \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + \rho_{bs} q_w Y_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{2}$$

$$\varepsilon \frac{\partial CO_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{CO_2}^* \left(\frac{\partial CO_2}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{CO_2}^* \left(\frac{\partial CO_2}{\partial y} \right) \right] + \rho_{bs} r_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{3}$$

$$\varepsilon \frac{\partial O_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{O_2}^* \left(\frac{\partial O_2}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{O_2}^* \left(\frac{\partial O_2}{\partial y} \right) \right] + \rho_{bs} r_{O_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{4}$$

donde T en K es la temperatura, W_g en base seca (bs) es el contenido de humedad, O_2 y CO_2 (% V/V) son las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono, ε la porosidad, ρ_{bs} en kg m⁻³ es la densidad de la masa seca, c_b en J kg⁻¹ K⁻¹ es el calor específico del lecho de granos, k_b en W m⁻¹ K⁻¹ es la conductividad térmica del lecho de granos, D_w es la difusividad efectiva para vapor de agua, L_g en J kg⁻¹ es el calor latente de vaporización de la humedad en el grano, η en Pa es el cambio en la presión parcial respecto del cambio en el CH a temperatura constante, ω en Pa K⁻¹ es el cambio en la presión parcial respecto del cambio en la temperatura a CH constante, D_i^* en m²s⁻¹ (con $i = CO_2$ y O_2) es la difusividad efectiva a través del aire intergranular del CO_2 y O_2 calculados de acuerdo a Geankoplis (1998).

En las Ec. (1) a (4), los últimos términos representan el calor, el vapor de agua, el CO₂ liberados y el O₂ consumido, respectivamente, debido a la respiración del ecosistema del grano. La respiración es modelada por la combustión completa de un carbohidrato típico. Y_{CO_2} es la velocidad de producción de CO₂, en mg [CO₂] kg⁻¹ [materia seca] s⁻¹, q_H es 10,7 J mg⁻¹ [CO₂], q_w es 4,1 10⁻⁵ kg [H₂O] mg⁻¹ [CO₂]. La velocidad de producción de CO₂, r_{CO_2} en m³s⁻¹ kg⁻¹ [material seca] es dada por:

$$r_{CO_2} = \frac{Y_{CO_2}}{1000 M_{CO_2}} \frac{RT}{P_{at}}; \quad r_{O_2} = r_{CO_2} \quad \mathbf{5}$$

La Figura 1 muestra una fotografía de silo bolsa en el campo y el dominio de cálculo, el cual representa una sección transversal del silo bolsa. Las condiciones de contorno tienen en cuenta la interacción entre el suelo y la capa inferior del silo bolsa, la radiación solar incidente, pérdidas por convección y por radiación. Se asumió que el silo bolsa era impermeable a la transferencia de humedad. Las expresiones correspondientes a las con-

diciones iniciales y de contorno asociadas a las Ec. (1) y (2), las funciones D_w , η , w , L_g , los parámetros de entrada del modelo térmico así como las propiedades del lecho de granos de trigo se detallan en Gastón et al. (2009).

Las condiciones de contorno asociadas a las Ec. (3) y (4) consideran la transferencia de gases a través de la capa plástica.

$$-D_{CO_2}^* \frac{\partial CO_2}{\partial n} = \frac{P_{CO_2} P_{atm}}{L} (CO_2 - CO_{2out}) = h_{CO_2} (CO_2 - CO_{2out}) \quad \text{on } \Gamma_1 \quad \mathbf{6}$$

$$-D_{O_2}^* \frac{\partial O_2}{\partial n} = \frac{P_{O_2} P_{atm}}{L} (O_2 - O_{2out}) = h_{O_2} (O_2 - O_{2out}) \quad \text{on } \Gamma_1 \quad \mathbf{7}$$

donde P_{atm} en Pa, es presión atmosférica; L en m, es el espesor del plástico, P_{O_2} y P_{CO_2} en $m^3ms^{-1}m^{-2}at^{-1}$, son la permeabilidad equivalente del plástico al O_2 y CO_2 , respectivamente, ambos calculados usando un modelo de resistencia en series para considerar que el silo bolsa es una mezcla de polietileno HDPE y LDPE (Abalone et al., 2009; 2010 a).

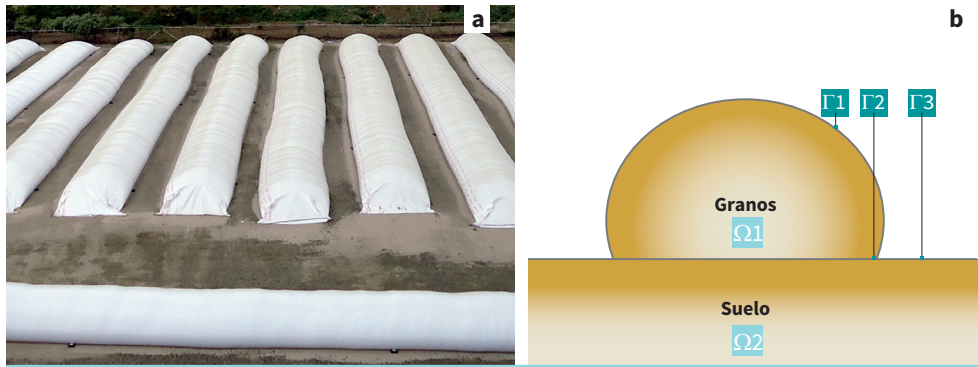


Figura 1.

a. Fotografía del sistema de almacenamiento de silo bolsa. **b.** Diagrama esquemático del dominio de cálculo y de las fronteras. Sección transversal del silo bolsa.

Modelo global de capacidad concentrada

En el modelo global de capacidad concentrada, las Ec. (1) y (2) se mantienen para obtener la evolución de la temperatura promedio del silo bolsa mientras que las Ec. (3) y (4) están integradas sobre el volumen total resultando en:

$$\frac{d\bar{O}_2}{dt} = K_{O_2} \frac{(O_{2out} - \bar{O}_2)}{\varepsilon V} - \frac{\rho_{bs}}{\varepsilon} \bar{r}_{O_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{8}$$

$$\frac{d\bar{CO}_2}{dt} = K_{CO_2} \frac{(CO_{2out} - \bar{CO}_2)}{\varepsilon V} + \frac{\rho_{bs}}{\varepsilon} \bar{r}_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{9}$$

Los términos sumideros/fuentes son evaluados a la temperatura y CH promedio del grano. La primera cambia de acuerdo con la variación estacional de las condiciones climáticas mientras que la última se mantiene igual al valor inicial dado que el silo bolsa es considerado impermeable al vapor de agua.

Solución numérica

Los modelos matemáticos fueron implementados usando *COMSOL Multiphysics 3.5a* y resueltas numéricamente por el Método de Elementos Finitos. Se emplearon elementos cuadráticos Lagrangianos y cuadratura numérica de cuarto orden. Se seleccionó el método UMPACK (Método Multifrontal y Factorización LU para matrices dispersas no simétricas) para resolver el sistema PDE.

Resultados y discusión

Los modelos fueron aplicados para analizar el almacenamiento de trigo en silo bolsas de Enero a Junio (seis meses). Se consideraron las condiciones climáticas del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Las temperaturas iniciales del grano fueron 20,0 °C, 25,0 °C, 30,0 °C y 40,0 °C. El CH inicial del grano varió de 12,0% a 16,0%.

La dependencia de la velocidad de producción de CO₂ fue evaluada usando la correlación desarrollada por White et al. (1982) que considera la temperatura del grano, el CH y el tiempo de almacenamiento:

$$\log Y_{CO_2} = -4.054 + 0.0406 T - 0.0165 \theta + 0.0001 \theta^2 + 0.2389 M$$

10

La permeabilidad equivalente del plástico al O₂ se fijó igual a 9,8 10⁻⁸ m³md⁻¹m²at⁻¹ y al CO₂ igual a 3,2 10⁻⁷ m³md⁻¹m²at⁻¹. El espesor promedio del plástico *L* es 240 μm. Para un metro de largo de silo bolsa, el área de transferencia resulta igual a *A*= 5,5 m² y el volumen a *V*= 4,5 m³. Los valores reportados para la difusividad efectiva del CO₂ a través de trigo varía desde 3,7 10⁻⁶ m²s⁻¹ (Ileleji et al., 2006) a 7,6 10⁻⁶ m²s⁻¹ (Shunmugan et al., 2005). En este trabajo se tomó *D**_{CO₂} igual a 4,0 10⁻⁶ m²s⁻¹ y *D**_{O₂} a 5,2 10⁻⁶ m²s⁻¹. La porosidad del trigo ε se fijó igual a 0,4 y la tortuosidad τ igual a 1,5.

Resultados predichos con el modelo de difusión

Los resultados correspondientes a la peor condición inicial de 40,0 °C y 16,0% (grano con alta temperatura y húmedo) fueron seleccionados para ilustrar las predicciones del modelo. En este caso, como se mostrará más adelante, el O₂ es consumido durante las primeras 2 semanas de almacenamiento.

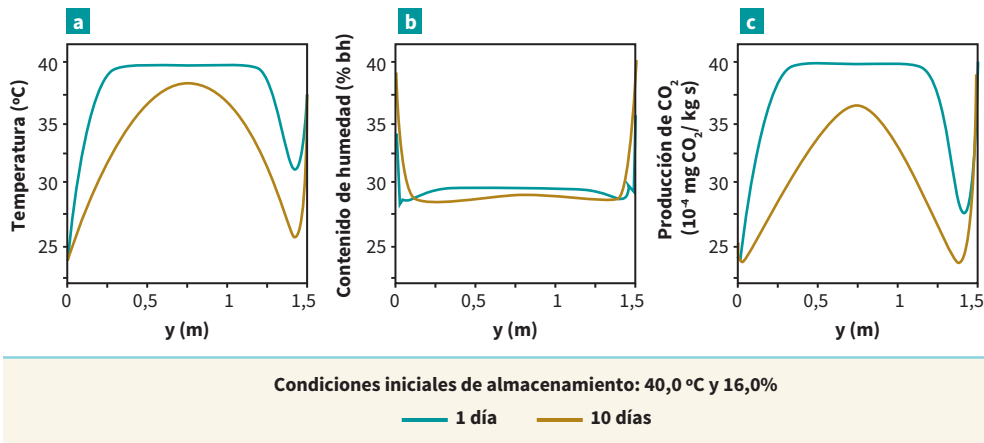
La Figura 2 muestra perfiles característicos de temperatura (a), CH (b) y producción de CO₂ (c), a lo largo de una línea vertical ubicada en el centro de una sección transversal del silo bolsa. La abscisa *y* representa la distancia desde la parte inferior del silo bolsa. Los gráficos corresponden al mediodía del primer y décimo día de almacenamiento. La oscilación de la temperatura dentro de los primeros 30,0 cm debajo de la superficie (Figura 2 a) refleja el efecto de las condiciones ambientales así como el de los datos climáticos por hora. Nótese que en el centro, a pesar de la energía liberada por la respiración, no se produce un aumento de la temperatura debido a la alta relación entre el área de transferencia de energía y el volumen de granos para el silo bolsa (Gastón et al., 2009).

La migración de humedad se produce en la dirección opuesta a los gradientes de temperatura produciendo una redistribución de aproximadamente 1,0 punto %, localizada dentro de los 10,0 cm en la parte superior e inferior del silo bolsa (Figura 2 b).

La velocidad de producción de CO_2 que se muestra en la Figura 2 (c) sigue la tendencia de la temperatura. En el centro, la tasa de producción disminuye, prevaleciendo el efecto de la disminución de la temperatura sobre un leve incremento del CH (ver Ec. 10). En la capa superior, el comportamiento es mucho más complejo como resultado de fluctuaciones locales de temperatura y contenido de humedad.

Figura 2.

Perfiles de temperatura (a), contenido de humedad (b) y velocidad de respiración (c) a lo largo de la sección media vertical del silo bolsa.



La Figura 3 ilustra los perfiles de concentración de gases. A pesar de que en el centro, la respiración es aproximadamente 2 o 3 veces mayor que en la parte inferior o en la superficie (Figura 2 c), el gradiente de la concentración es menor como consecuencia de que la alta difusión de gases en silo bolsa aplanan los perfiles de O_2 y CO_2 . Diferencias en el orden del 0,05 puntos % difícilmente podrían ser detectadas en pruebas a larga escala en el campo. Estos resultados numéricos están en concordancia con los datos experimentales que mostraron que ninguna estratificación a lo largo de la dirección vertical fue medida durante el muestreo de la concentración de gases en silo bolsa (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008).

Este comportamiento puede ser explicado analizando el Número de Biot másico $Bi = Vhi/AD_i^*$ ($i = \text{CO}_2, \text{O}_2$), la razón entre la resistencia interna y la externa a la transferencia de gas. Los valores calculados de Bi para CO_2 y O_2 resultaron ambos en el orden de 10^{-4} . Un valor menor a 0,1 indica que la distribución de la concentración de gas dentro del silo bolsa será casi uniforme. Esto significa que el muestreo de gas en 1 o 2 lugares sería suficiente para obtener información confiable de las condiciones de almacenamiento de granos, al menos en la sección transversal del silo bolsa.

Comparación de la concentración de gases predicha usando el modelo de difusión y el modelo global de capacidad concentrada

Para cada paso de tiempo, las concentraciones locales de O_2 y CO_2 determinadas por las Ec. (3) y (4) fueron promediadas sobre el dominio para obtener valores promedios de concentración.

Figura 3.

Perfiles de concentración de O_2 y CO_2 a lo largo de la sección media vertical del silo bolsa para el primer (a) y décimo día de almacenamiento (b).

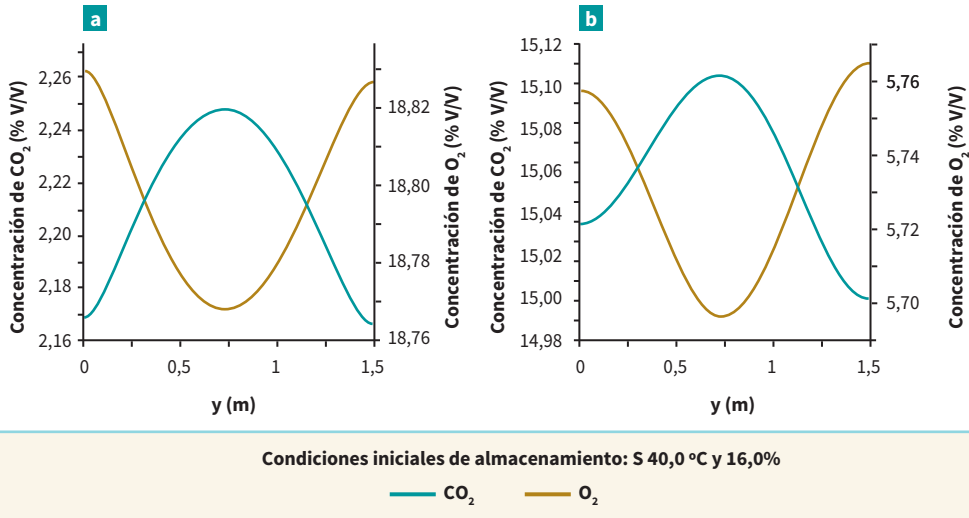
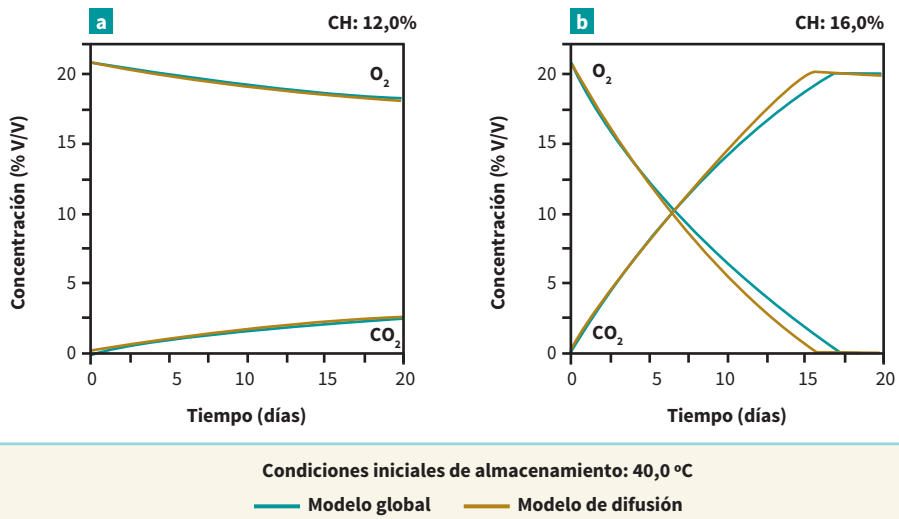


Figura 4.

Comparación entre la evolución de la concentración promedio de O_2 y CO_2 usando el modelo de difusión y el modelo global.



Por cada par de condición inicial en el rango (20,0 °C - 40,0 °C, 12,0% - 16,0%), la evolución temporal de la concentración de gases promedio fue comparada con el valor correspondiente calculado aplicando el modelo global. Esta comparación cuantifica el efecto de promediar las variaciones de la temperatura local y migración de la humedad evaluando la producción de CO₂ (Ec. 10) usando valores promedio de temperatura y el contenido de humedad inicial.

La Figura 4 ilustra la comparación para (40,0 °C; 12,0%) y (40,0 °C; 16,0%), el peor rango de condiciones de almacenamiento. Para trigo seco y con alta temperatura, las diferencias son insignificantes. Para trigo húmedo, la predicción de la disminución de O₂ del modelo global resulta levemente mayor al principio mientras que un poco menor al final, siendo la diferencia menor a 1,0 punto %. Para la acumulación de CO₂ se obtuvo una tendencia opuesta.

La evolución de los valores de concentración en diferentes lugares de la bolsa (no se muestran en la Figura 4) es casi igual a la evolución del promedio. Se mencionó que durante el muestreo de gases en el campo se obtiene información local de la concentración. Por consiguiente, se puede concluir que el modelo global es adecuado para analizar el cambio en la concentración de gases en el silo bolsa cuando se asume que la distribución del contenido de humedad inicial es uniforme. Una diferencia de menos de 1,0 punto % como la que se obtiene entre los 2 modelos, está en el orden de magnitud de los errores experimentales involucrados en la medición de la composición de gases en pruebas a gran escala en el campo.

Efectos de una distribución no uniforme de CH

Una inspección minuciosa de cualquier silo bolsa en el campo comúnmente revela un número de pequeñas perforaciones en el plástico, producidas por animales salvajes, residuos de la cosecha, etc. Las filtraciones de agua a través de las perforaciones en la parte inferior del silo bolsa pueden crear sectores con grano húmedo. Por esto, es útil estudiar la evolución de la concentración de gas en esas condiciones usando simulación numérica.

Una condición común de embolsado de trigo en el sudeste de la provincia de Buenos Aires es de 25,0 °C y 13,0%. Esta condición fue establecida como caso base. Para simular un sector húmedo en la bolsa, el modelo de difusión fue aplicado usando una capa de 15,0 cm de espesor a 16,0% en la parte inferior y el resto a 13,0%. Esta capa representa el 10,0% del grano almacenado por unidad de longitud del silo bolsa. La Figura 5 muestra temperatura (a), contenido de humedad (b) y perfiles de producción de CO₂ (c) cada 40 días de almacenamiento. Nuevamente, a pesar de que exista un sector con trigo húmedo, la temperatura no se incrementa en la parte inferior de la bolsa. La humedad lentamente migra hacia el centro. Una comparación entre de la Figura 5 (c) y Figura 2 (c) muestra que la tasa de producción de CO₂ para el caso base (CH 25,0 °C; 13,0%) es significativamente menor que para (CH 40,0 °C; 16,0%). A CH 16,0%, la tasa de producción a 25,0 °C es 5 veces menor que a 40,0 °C.

La Figura 6 ilustra perfiles planos de concentración de gas, como resultado de la rápida difusión a través de la masa de granos, a pesar del consumo O₂ y producción de CO₂ localizados.

Figura 5.

Perfiles de temperatura (a), CH (b) y velocidad de respiración (c) a lo largo de la sección media vertical del silo bolsa.

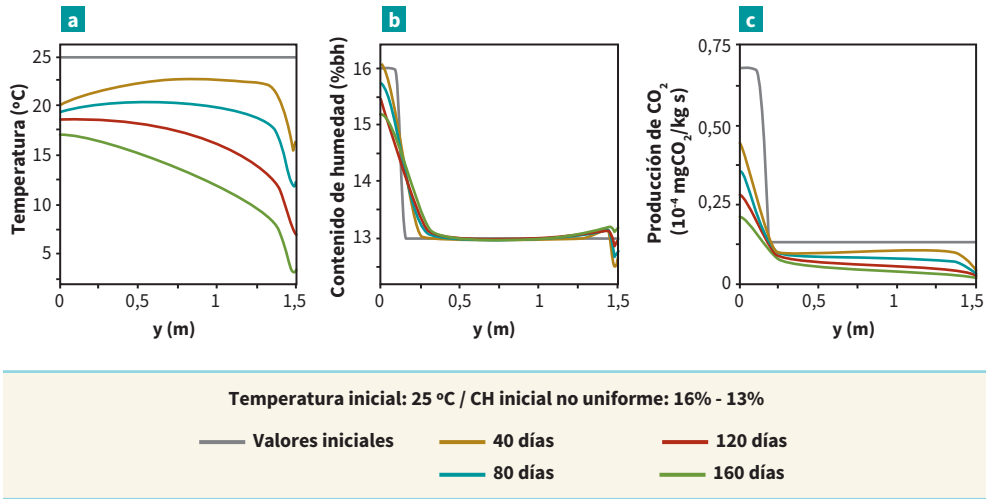
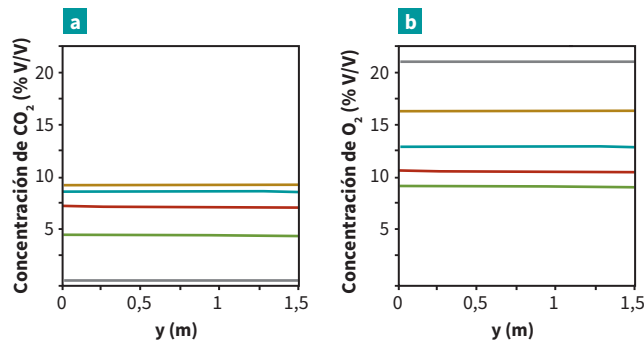


Figura 6.

Perfiles de concentración de CO₂ y O₂ luego de 40, 80, 120 y 160 días de almacenamiento.

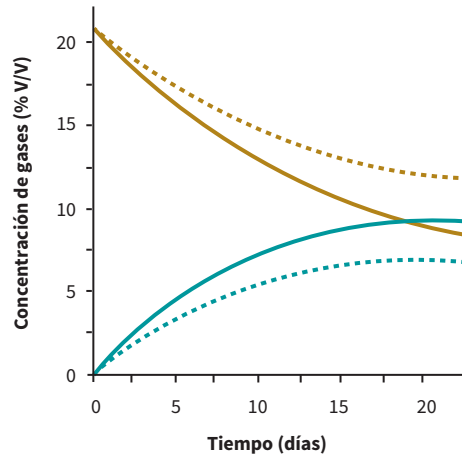


La Figura 7 compara la evolución de las concentraciones promedio de gases para el caso base (25,0 °C y 13,0%) con el caso de distribución de CH no uniforme. La primera curva es considerada un valor de referencia que representa condiciones adecuadas de almacenamiento. Durante el primer mes de almacenamiento, la diferencia entre curvas

es por debajo del 1,0%, pero luego se incrementa a 3 o 4 puntos. Esto sugiere que si el silo bolsa es monitoreado durante el primer mes, el sector húmedo probablemente no sería detectado porque los valores medidos y referenciales son similares, aún dentro de los errores experimentales. Pero luego de 2 meses, un valor medido de CO_2 3 o 4 puntos por encima del valor referencial es una clara advertencia de una posible descomposición del grano en el silo bolsa.

Figura 7.

Perfiles de concentración de O_2 y CO_2 a lo largo de la sección media vertical del silo bolsa.



O_2 13,0% bh | CO_2 13,0% bh
 CH inicial no uniforme | CH inicial no uniforme

Efecto del daño estructural del silo bolsa

Como fue mencionado anteriormente, el silo bolsa se puede dañar en el campo y una pequeña perforación en el plástico modifica las concentraciones de O_2 y CO_2 significativamente (Abalone et al., 2010 b). El caso seleccionado para el análisis es trigo almacenado a $40,0\text{ }^\circ\text{C}$ y $16,0\%$, una vez que las condiciones anaeróbicas son alcanzadas ($0,0\%$ de O_2 y $21,0\%$ de CO_2) (ver Figura 4 b). Un estudio computacional fue llevado a cabo para estudiar los cambios en la concentración de gas debido al intercambio de O_2 y CO_2 a través de una perforación de $1,0\text{ cm}$ de diámetro localizada en la parte superior de un silo bolsa.

La distribución de las concentraciones de O_2 y CO_2 después de 2 y 10 días de almacenamiento se presentan en las Figura 8 y Figura 9, respectivamente. La Figura 8 (a) muestra una zona de penetración de aproximadamente $70,0\text{ cm}$ de radio, donde el O_2 está por encima de $9,0\%$ V/V luego de 2 días. Luego de 10 días, el O_2 está por encima del $9,0\%$ en toda la bolsa. Esta condición incrementa el riesgo de descomposición del grano porque con tal concentración de O_2 la actividad biológica se puede reactivar.

Los resultados obtenidos para trigo en este trabajo son contrastantemente diferentes a aquellos obtenidos para maíz almacenado en condiciones similares ($35,0\text{ }^\circ\text{C}$ y $16,0\%$)

por Bispo dos Santos et al. (2007), donde la penetración de O_2 es muy baja. Los valores de la tasa de respiración para maíz reportados en ese estudio fueron muy altos y no son consistentes con aquellos obtenidos aplicando la correlación de Bern et al. (2002) citado por los autores.

Figura 8.

Distribución de la concentración (% V/V) de O_2 (a) y CO_2 (b) luego de 2 días de almacenamiento.

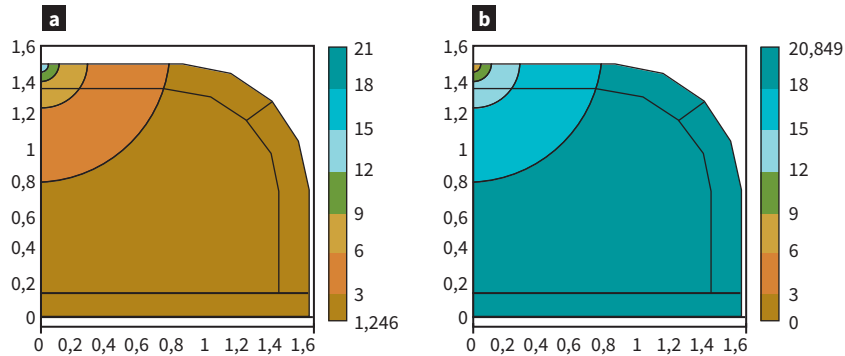
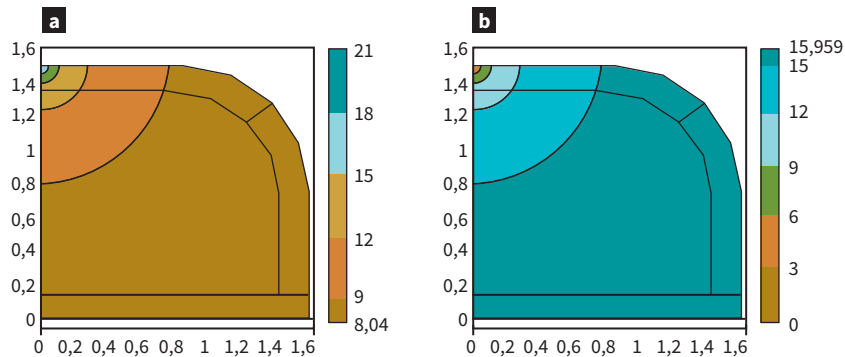


Figura 9.

Distribución de la concentración de O_2 (a) y CO_2 (b) (% V/V) luego de 10 días de almacenamiento.



Conclusiones

Se desarrolló un modelo de difusión para determinar las concentraciones de O_2 y CO_2 en la atmósfera intersticial del silo bolsa. Los resultados fueron comparados con aquellos obtenidos usando un modelo global de capacidad concentrada para cuantificar el efecto de promediar las variaciones locales de temperatura y contenido de humedad cuando se evalúa la velocidad de producción de CO_2 . Las diferencias entre las predicciones de las concentraciones promedio de gases fueron menores a 1,0 punto %. Se puede concluir

que el un modelo global de capacidad concentrada es adecuado para generar curvas de concentración de gas para diferentes condiciones de almacenamiento de granos. Esta información puede luego usarse como valores de referencia para controlar las condiciones adecuadas de almacenamiento monitoreando el nivel de CO₂ en los silo bolsas.

Los efectos locales como la presencia de zonas húmedas en la parte inferior o una perforación en la parte superior de la bolsa fueron analizados aplicando el modelo de difusión. Un sector húmedo a 16,0% afectando el 10,0% del grano inicialmente cargado a 13,0% incrementa 2 a 3 puntos los niveles de CO₂ con respecto a la curva de referencia. La penetración de O₂ a través de una abertura de 1cm de diámetro es significativa.

Un silo bolsa a 40,0 °C y 16,0%, inicialmente en anaerobiosis, puede alcanzar niveles de O₂ del 10,0% V/V en 10 días, con el riesgo potencial de deterioro del grano por presencia de actividad biológica. Los estudios futuros contemplan la extensión del modelo de difusión 2D a un modelo 3D, con el objetivo de completar el análisis de efectos locales a lo largo de la dirección longitudinal del silo bolsa.

Referencias

- Abalone R.; Gastón A; Bartosik R. y Rodríguez J. 2009. Mathematical modelling of oxygen and carbon dioxide composition in the interstitial atmosphere of silobags. En: CIGR Proceeding website - <http://journals.sfu.ca/cigrp/>. Proceedings of the International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. Conference Technology and Management to Increase the Efficiency in Sustainable Agricultural Systems, 1 - 4 de septiembre, Rosario, Argentina.
- Abalone R.; Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2011 a. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part I: Model development and validation. *J. Stored Prod. Res.*, 47 (4): 268 - 275. doi: 10.1016/j.jspr.2011.05.004
- Abalone R.; Gastón A.; Cardoso L.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2011 b. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part II: model sensitivity and effect of grain storage conditions?. *Journal of Stored Products Research*, 47(4): 268 - 275.
- Bartosik R.; Cardoso M.L. y Rodríguez J. 2008. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Bern C.; Steele J. y Morey R. 2002. Shelled corn CO₂ evolution and storage time for 0,5% dry matter loss. *Appl. Eng. Agric.*, 18 (6): 703 - 706.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.

- Bispo Dos Santos S.; Martins M. y Faroni L. 2007. Computational study of oxygen infiltration due to damage in the silo bag surface. En: 2007 ASABE Annual International Meeting, 17 - 20 de junio, Minneapolis, Minnesota, EE.UU, Paper N° 076172.
- Gastón A.; Abalone R.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2009. Mathematical modeling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo bags). *Biosystems Eng.*, 104: 72 - 85.
- Geankoplis C. 1998. Transport processes and unit operations, 3th Edition, CECSA, México, 460 p.
- Iileji K.; Maier D.; Blat C. y Woloshuk C. 2006. Detection of a developing hot spot in stored corn with a CO₂ sensor. *Applied Engineering in Agriculture*, 22: 275 - 289.
- Shunmugam G.; Jayas D.; White N. y Muir W. 2005. Diffusion of carbon dioxide through grain bulks. *J. Stored Prod. Res.*, 41: 131 - 144.
- White N.; Sinha R. y Muir W. 1982. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Can. Agric. Eng.*, 24: 35 - 42.

Análisis de las condiciones de almacenamiento de un silo bolsa con trigo para diferentes condiciones climáticas mediante simulación computacional

Allien Arias Barreto¹

Rita Abalone¹

Analía Gastón^{1, 2}

Ricardo Bartosik³

Resumen

Se usó un modelo matemático validado para determinar el cambio en la concentración de CO₂ en un silo bolsa con trigo almacenado desde el verano al invierno en 3 zonas productivas típicas de Argentina: una en la región norte con clima subtropical (Sáenz Peña, provincia del Chaco), otra en la región centro con clima intermedio (Pergamino, provincia de Buenos Aires) y la tercera en la región sur con clima templado (Balcarce, provincia Buenos Aires). El contenido de humedad inicial para el grano se fijó en 12,0%, 14,0% y 16,0% y las temperaturas de embolsado en 25,0 °C y 40,0 °C. Para condiciones estándar (12,0% - 25,0 °C) el nivel de CO₂ se incrementó a 4,0% V/V y el de O₂ disminuyó a 15,5% V/V en Balcarce, mientras que el nivel de CO₂ se incrementó a 6,0% V/V y el de O₂ disminuyó a 13,9% V/V en Sáenz Peña. Para grano húmedo (16,0%; 25,0 °C y 40,0 °C), el nivel de O₂ decayó a menos del 1,0% en las 3 localidades. La evolución de la temperatura promedio en combinación con los niveles de CO₂ y O₂ alcanzados en los silo bolsas demuestra que, para las condiciones climáticas del centro y el sur de Argentina, podría limitarse la actividad de los insectos en los silo bolsas. Se estimó la pérdida de materia seca para todas las condiciones de almacenamiento y se la comparó con los valores límites para el almacenamiento de granos y semillas; determinándose que no se excedió el límite para reducir la calidad comercial del grano, aunque la calidad para semilla podría verse afectada cuando se almacena húmedo durante el verano.

Palabras clave: almacenamiento de granos, almacenamiento hermético, trigo, silo bolsas, composición atmosférica, modelado

¹Fac. de Cs. Exactas Ingeniería y Agrimensura UNR. IFIR (CONICET/UN), Rosario (Santa Fe), Argentina.

²FCEIA - Universidad Nacional de Rosario (Santa Fe), Argentina.

³INTA EEA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

Notación

c_b	calor específico del lecho de granos, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
CO_2	concentración de CO_2 , % V/V
D_w	difusividad efectiva del vapor de agua en el aire intergranario, s, $D_w = \frac{D_v \varepsilon}{R_v \tau T}$
D'_i	difusividad efectiva del gas en el aire intergranario, m^2s^{-1} , $i = CO_2, O_2$
D_{soil}	difusividad térmica del suelo en el aire intergranario, m^2s^{-1}
d_m	velocidad promedio de materia seca consumida en la respiración aeróbica, mg [materia seca] kg^{-1} [materia seca] en 24 h
DML	pérdida local acumulada de materia seca al tiempo t, mg [materia seca] kg^{-1} [materia seca]
\overline{DML}	pérdida promedio acumulada de materia seca al tiempo t, mg [materia seca] kg^{-1} [materia seca]
D_v	difusividad del vapor de agua en el aire, m^2s^{-1}
G	radiación solar incidente sobre la superficie del silo bolsa, $W\ m^{-2}$
h_c	coeficiente de transferencia de calor por convección, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$
k_b	conductividad térmica del granel, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
K_{fi}	permeabilidad efectiva del plástico, m^3d^{-1}
L	espesor de la capa de plástico, m
L_g	calor latente de vaporización de la humedad en el grano, $J\ kg^{-1}$, $L_g = RT^2 \left(\frac{\partial \ln P_v}{\partial T} \right)_{P_g}$
M	contenido de humedad del grano, % bh
M_{CO_2}	peso molecular del CO_2 , 44 gramos mol^{-1}
n	dirección normal
O_2	concentración de O_2 , % V/V
P_{atm}	presión atmosférica, 1 at. o 101325 Pa
P_{O_2}	permeabilidad del O_2 a través de la capa plástica, $m^3md^{-1}m^{-2}at^{-1}$
P_{CO_2}	permeabilidad del CO_2 a través de la capa plástica, $m^3md^{-1}m^{-2}at^{-1}$
p_v	presión parcial del vapor de agua, Pa
q_H	calor liberado en la respiración, $10,7\ J\ mg^{-1}\ [CO_2]$
q_w	vapor de agua producido en la respiración, $4,1\ 10^{-5}\ kg\ [H_2O]\ mg^{-1}\ [CO_2]$
R	constante universal de los gases, $8,3\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$
r_{CO_2}	velocidad de producción de CO_2 , $m^3s^{-1}\ kg^{-1}$ [materia seca]
r_{O_2}	velocidad de consumo de O_2 , $m^3s^{-1}\ kg^{-1}$ [materia seca]
R_v	constante de gas del vapor de agua, $461,5\ J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
t	tiempo, s
T	temperatura absoluta, K

T_c	temperatura, °C
T_i	parámetros de la temperatura de suelo diaria o anual, °C, $i = 1, 2$
\bar{T}	temperatura promedio, K
W_g	contenido de humedad del grano, d.b
x, y	coordenadas cartesianas, m
Y_{CO_2}	velocidad de producción de CO_2 , mg $[CO_2]$ kg^{-1} [materia seca] en 24 h

Símbolos griegos

β	cociente de permeabilidad
ε	porosidad
Γ	frontera del dominio
ω	cambio en la presión parcial como consecuencia del cambio en la temperatura a contenido de humedad constante, Pa K^{-1} , $\omega = \left. \frac{\partial p_v(W_g, T_c)}{\partial T} \right|_{W_g}$
η	cambio en la presión parcial como consecuencia del cambio en el contenido de humedad a temperatura constante, Pa, $\eta = \left. \frac{\partial p_v(W_g, T_c)}{\partial W_g} \right|_T$
Ω	dominio
α	absortividad de la superficie del silo bolsa
φ	ángulo de defasaje diario o anual
σ	constante de Stefan - Boltzmann, $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
τ	factor de tortuosidad
ξ	emisividad
ψ	frecuencia angular diaria o anual, s^{-1}
ρ_{bs}	densidad de lecho seco, kg [materia seca] m^{-3}
θ	tiempo de almacenamiento, días

Subíndices

<i>amb</i>	ambiente
<i>sky</i>	cielo
<i>soil</i>	suelo

Introducción

Más de 40,0 millones de toneladas de granos (más del 40,0% del total de la producción del país) se almacenaron en sistemas herméticos (silo bolsas) en Argentina. Debido a la experiencia exitosa de esta tecnología durante los últimos 15 años en Argentina, el sistema silo bolsa está siendo adoptado en más de 40 países, desde países con clima tropical (p. ej. Sudán) hasta aquellos con clima frío (p. ej. Rusia).

Esta técnica, originalmente usada para el ensilaje de granos, consiste en almacenar grano seco en bolsas de plástico herméticamente cerradas. El proceso de respiración de los agentes biológicos en el ecosistema del grano (grano, insectos, ácaros y microorganismos) consume oxígeno (O_2). Bajo condiciones adecuadas de hermeticidad, la concentración de gases resultante promueve un ambiente propicio para la conservación de granos.

La concentración de gas depende del balance entre la respiración del ecosistema, la entrada de O_2 al sistema desde el exterior, y la pérdida de CO_2 al aire ambiente. La transferencia de gases depende de la diferencia de presión parcial del gas y de la permeabilidad efectiva del plástico (aberturas y permeabilidad natural del plástico a gases). El tipo y condición del grano, el contenido de humedad (CH), la temperatura, el tiempo de almacenamiento y las concentraciones de O_2 y CO_2 afectan la velocidad de respiración del grano.

El potencial del uso del almacenamiento hermético fue discutido por Navarro et al. (1994), quienes condujeron una investigación exhaustiva relacionada con el almacenamiento de trigo, maíz y arroz en climas tropicales (Donahaye et al., 2001; Donahaye et al., 1991; Navarro et al., 1996; 1997; 1998 a; 1998 b).

Los silo bolsas fueron adaptados localmente para almacenar grano seco en Argentina hace más de 15 años. Desde entonces, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) ha conducido, en forma sostenida, investigaciones en las Estaciones Experimentales de Balcarce y Manfredi, abordando diferentes aspectos del almacenamiento hermético en silo bolsas. Se llevaron a cabo un conjunto de ensayos a campo para analizar el efecto del CH y el tiempo de almacenamiento en la calidad de trigo, maíz, girasol y soja (Rodríguez et al., 2001; 2002; 2004) y cebada (Bartosik et al., 2012; Ochandio et al., 2009; 2010) almacenados en silo bolsas. Santa Juliana y Cassini (2009) estudiaron la evolución de la concentración de CO_2 y O_2 en granos maíz (*Zea mays L.*) almacenados en silo bolsas, mientras que Cardoso et al. (2009), el cambio en la concentración de fosfina durante la fumigación de un silo bolsa. Cardoso et al. (2012) realizaron un ensayo de caída de presión para determinar el nivel de hermeticidad inicial de silo bolsas y su evolución después de 4 meses de almacenamiento en el campo. Recientemente, Bartosik (2012) presentó un resumen de todas las investigaciones desarrolladas hasta el momento en Argentina.

También se pueden encontrar algunos trabajos relacionados con silo bolsas en otros países. Darby y Caddick (2007) publicaron un análisis exhaustivo y las evaluaciones a campo de la aplicación de la tecnología del silo bolsa bajo las condiciones de almacenamiento de Australia. Bispo Dos Santos et al. (2008) analizaron la pérdida de materia seca (PMS) en granos de maíz almacenados herméticamente. Ridley et al. (2011) investigaron el potencial de fumigación con fosfina para desinfección de los granos almacenados en silo bolsas. Idler et al. (2012) analizaron el efecto del almacenamiento a corto plazo en la calidad de trigo guardado en grandes bolsas de polietileno en comparación con el almacenamiento tradicional de granos.

A escala de laboratorio, Weinberg et al. (2008) estudió el efecto del nivel de humedad en granos de maíz con alto contenido de humedad (*Zea mays L.*) bajo condiciones de almacenamiento hermético, mientras que Ochandio et al. (2012) analizaron la evolución de la concentración de CO_2 de soja (*Glycine max*) almacenada herméticamente en pequeñas jarras de vidrio.

El INTA, Estación Experimental (EEA) Balcarce implementó una novedosa tecnología para monitorear el almacenamiento de granos en silo bolsas basada en la detección de CO_2 (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2008). El procedimiento consiste en comparar la concentración de CO_2 medida en algunos puntos del silo bolsa (valor local de concentración) con un valor referencial que representa condiciones adecuadas de almacenamiento. Adicionalmente, fue observado que este valor de referencia puede cambiar de acuerdo a la estación y condición climática de una zona agrícola particular (la temperatura ambiente afecta la velocidad de respiración), por lo que los niveles de referencia deberían establecerse para cada región. Sin embargo, llevar adelante estudios experimentales de campo para cubrir un amplio rango de posibles condiciones de almacenamiento es muy costoso y lleva mucho tiempo, por lo cual emplear un modelo matemático de simulación validado es una alternativa adecuada para llevar a cabo este tipo de análisis.

Se han desarrollado modelos para sistemas de almacenamiento convencional, los cuales se han aplicado para analizar el almacenamiento de diferentes granos, como trigo (Jia et al., 2000 a; 2000 b; Jiang et al., 2005; Khankari et al., 1994; 1995 a; 1995 b; Singh et al., 1993); sorgo (Carrera - Rodríguez et al., 2011; Jiménez - Islas et al., 2004); arroz (Iguaz et al., 2004 a; 2004 b) y maíz (Andrade et al., 2002; Montross et al., 2002 a; 2002 b) entre otros.

Respecto a la modelización matemática, muy pocas referencias relacionadas con el silo bolsa se han encontrado a nivel internacional. Mediante simulación numérica, Bispo Dos Santos et al. (2007) estudiaron la filtración de O_2 en un silo bolsa con maíz húmedo dañado superficialmente y Lobo Paes et al. (2007) analizaron la posibilidad de acelerar la anaerobiosis mediante el uso de dispositivos que consumen O_2 .

Teniendo en cuenta la importancia económica que la producción de granos tiene para Argentina y las ventajas de contar con un modelo de simulación validado para sistemas de almacenamiento hermético, se desarrolló un modelo integral para el almacenamiento de granos en silo bolsas basado en el trabajo de Thorpe (2002). Con este propósito, primero se desarrolló un modelo de transferencia de energía y masa para predecir el cambio de la distribución de la temperatura y el contenido de humedad del grano debido a las variaciones climáticas estacionales, teniendo en cuenta el calor y el vapor de agua producidos en función del CO_2 liberado durante la respiración. Se asumió que el silo bolsa era hermético a la transferencia de gases y los cambios en la concentración de CO_2 se estimaron a partir de la integración temporal de la velocidad de CO_2 liberado. Este modelo se validó por comparación de valores predichos y medidos de temperatura, CH y concentración promedio de CO_2 y O_2 . El error estándar (SE) en la temperatura resultó 1,9 °C en la base del silo bolsa, 1,4 °C en el centro y 1,2 °C en la capa superior. Como las mediciones de CH fueron escasas en comparación con las de temperatura, la validación global del modelo se basó fundamentalmente en los datos de temperatura, ya que el modelo de transferencia de calor está fuertemente acoplado al de transferencia de masa a través de los términos fuente de las ecuaciones y las propiedades térmicas de los granos dependientes del CH.

Nuevos datos de concentración de gases correspondientes a una 50 silo bolsas monitoreadas en plantas de acopio y establecimientos agropecuarios del sureste de la provincia de Buenos Aires (Bartosik et al., 2008 a) mostraron la necesidad de mejorar la predicción de la concentración de los gases. Por lo tanto, para calcular el cambio de la concentración promedio de O_2 y CO_2 , los balances de masa incorporando simultáneamente el consumo de O_2 , la generación de CO_2 y la permeabilidad de los gases a través de capa

plástica se acoplaron a los balances de transferencia de calor y masa desarrollados previamente. Basados en la evidencia experimental de que no se detectó una estratificación de los gases en los silos bolsa, el modelo asumió una concentración uniforme dentro de la bolsa, lo que resulta un modelo de parámetros concentrados. La velocidad de consumo/producción de O_2/CO_2 se evaluaron empleando el valor medio de la temperatura promedio y CH del grano. La temperatura media del grano cambia de acuerdo a las variaciones estacionales de las condiciones climáticas, mientras que el CH medio permanece constante ya que se considera que el silo bolsa es impermeable al vapor de agua.

La validación del modelo mejorado (Modelo 1) se realizó mediante la comparación de los valores predichos de la concentración media de O_2 y CO_2 con el nuevo grupo de datos (Abalone et al., 2011 a). La tendencia general de las concentraciones medidas resultó comparable con las simuladas. En el rango seco de CH (12,0% - 13,5%) SE para CO_2 fue 1,2 puntos % V/V mientras que en el rango húmedo de CH (14,0% - 15,0%) aumentó a 2,7 puntos % V/V. Para O_2 , SE fue 2,5 puntos % V/V para el rango seco y 1,9 puntos % V/V para el rango húmedo de CH, respectivamente.

Se estudió la sensibilidad del Modelo 1 a la permeabilidad de la bolsa y a la velocidad de respiración así como el efecto de las condiciones de almacenamiento del grano en la concentración de gas en un silo bolsa con trigo (Abalone et al., 2011 b). Los resultados mostraron que la concentración de gas es más sensible a los cambios en la velocidad de respiración que a los cambios de la permeabilidad de la capa plástica. En el caso de un silo bolsa dañado se producen cambios considerables en la concentración de gas. La definición de una permeabilidad efectiva que considera la transferencia de los gases a través de perforaciones de la bolsa y de la capa plástica permitió examinar el efecto de diferentes configuraciones de perforaciones (número y diámetro de la perforación) en la concentración de gas.

Para abordar el transporte de masa dentro del silo bolsa, se incorporó la difusión de gases en los balances de CO_2 y O_2 para predecir la temperatura y el CH del grano así como la distribución de gases y el gradiente de concentraciones en el silo bolsa con un nuevo conjunto de ecuaciones (Modelo 2). Se comparó la concentración media de gas predicha con el Modelo 1 y el Modelo 2 para el rango de condiciones iniciales (20 °C - 40 °C, 12,0% - 16,0%). La comparación para la peor condición de embolsado mostró que para trigo seco y caliente (40,0 °C - 12,0%), las diferencias resultaron despreciables, mientras que para trigo húmedo (40,0 °C - 16,0%) menores que 1,0% V/V (Abalone y Gastón, 2011; Arias Barreto et al., 2011). La validación del Modelo 2 empleando los datos antes mencionados resultaron en un SE del mismo orden de magnitud que el obtenido con el Modelo 1.

Si bien promediar los gradientes locales de temperatura y CH tiene un efecto muy bajo en la predicción del promedio de la concentración de gas, la inclusión del transporte por difusión en el Modelo 2 permitió analizar efectos localizados en el silo bolsa, los cuales no pueden encararse con el Modelo 1, como es el caso de una distribución no uniforme de contenido de humedad, discutido en Abalone y Gastón (2011) y Arias Barreto et al. (2011).

Debido a que la razón área de transferencia/volumen de grano de un silo bolsa es muy alta, el monitoreo de la temperatura no es confiable para detectar la actividad biológica (Gastón et al., 2009) por lo que resulta más adecuado determinar las condiciones de almacenamiento de los granos mediante la detección de CO_2 (Bartosik et al., 2008 b; Cardoso et al., 2008; Illeleji et al., 2006). Abalone et al. (2011 b) mostraron, mediante simu-

lación numérica, que los niveles de referencia indicadores de las condiciones adecuadas de almacenamiento resultan fuertemente dependientes del CH y temperatura inicial del grano, variable que a su vez cambia durante el almacenamiento de acuerdo a las condiciones climáticas de cada zona agrícola en particular.

En el presente trabajo, el Modelo 2 fue usado para analizar las condiciones de almacenamiento de un silo bolsa con trigo en 3 áreas productivas de Argentina: una en la región norte con clima subtropical (Saenz Peña, provincia de Chaco, (26,87 °S, 60,45 °O)), otra en la región centro con clima intermedio (Pergamino, provincia de Buenos Aires, (33,93°S, 60,55 °O)) y por último, en la región sur con clima templado (Balcarce, provincia de Buenos Aires, (37,75 °S, 58,30 °O)). Se simuló la evolución de la temperatura, CH y pérdida de materia seca (PMS) así como la concentración de O₂ y CO₂ durante 6 meses, de verano a invierno. Se investigó el efecto inicial del CH y temperatura de embolsado. Se determinó la concentración media de CO₂ y O₂ para a las 3 localidades, se estimó la PMS media para todas las condiciones de almacenamiento y se la comparó con los límites para el almacenamiento seguro de semillas.

Materiales y métodos

Silo bolsas

Los silo bolsas son de 60,0 m de largo, 2,7 m de diámetro y 230 - 250 µm de espesor. Las bolsas están hechas de 3 capas de plástico, el interior es negro y el exterior blanco con estabilizadores de UV. Las capas de plástico son una mezcla de polietileno de alta densidad (HDPE) y de baja densidad (LDPE).

Pueden almacenar aproximadamente 200,0 toneladas de granos (trigo, maíz y soja) y usualmente los productores almacenan su producción durante 6 a 8 meses.

Modelo matemático

Planteando los balances de energía y masa para las fases grano y aire en un volumen de control, se derivada un sistema acoplado en términos de la temperatura T , el contenido de humedad del grano W y las concentraciones de O₂ y CO₂:

$$c_b \rho_{bs} \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[k_b \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_b \frac{\partial T}{\partial y} \right] \right] + \rho_{bs} L_g \frac{\partial W_g}{\partial t} + \rho_{bs} q_H Y_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{1}$$

$$\rho_{bs} \frac{\partial W_g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_w \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial x} + \omega \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_w \left(\eta \frac{\partial W_g}{\partial y} + \omega \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] + \rho_{bs} q_w Y_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{2}$$

$$\varepsilon \frac{\partial CO_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{CO_2}^* \left(\frac{\partial CO_2}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{CO_2}^* \left(\frac{\partial CO_2}{\partial y} \right) \right] + \rho_{bs} r_{CO_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{3}$$

$$\varepsilon \frac{\partial O_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{O_2}^* \left(\frac{\partial O_2}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{O_2}^* \left(\frac{\partial O_2}{\partial y} \right) \right] + \rho_{bs} r_{O_2} \quad \text{in } \Omega_1 \quad \mathbf{4}$$

donde T en K es la temperatura, W_g en bs es el CH_4 , O_2 y CO_2 (% V/V) son las concentraciones de O_2 y CO_2 , ε la porosidad, ρ_{bs} en $kg\ m^{-3}$ es la densidad seca del lecho de granos, c_b en $Jkg^{-1}K^{-1}$ su calor específico, k_b en $W\ m^{-1}K^{-1}$ es su conductividad térmica, D_w es un parámetro relacionado con la difusividad efectiva del vapor de agua, L_g en $J\ kg^{-1}$ es el calor de sorción de la humedad en el grano, η en Pa es el cambio en la presión parcial debido a un cambio en el CH_4 a temperatura constante, ω en $Pa\ K^{-1}$ es el cambio en la presión parcial debido a un cambio en la temperatura a CH_4 constante, D_i^* en m^2s^{-1} (con $i = CO_2$ y O_2) es la difusividad efectiva a través del aire intergranario del CO_2 y O_2 , calculada de acuerdo con Geankoplis (1998) y Thorpe (1981).

El último término en las ecuaciones (Ecs.). (1) a (4), representa la energía, el vapor de agua, el CO_2 liberado y el O_2 consumido, respectivamente, debido a la respiración del ecosistema. La respiración se modela como la combustión completa de un carbohidrato típico. Y_{CO_2} es la velocidad de producción de CO_2 , en $mg\ [CO_2]\ kg^{-1}[materia\ seca]s^{-1}$, q_H es $10,7\ Jmg^{-1}[CO_2]$, q_w es $4,1\ 10^{-5}\ kg[H_2O]\ mg^{-1}\ [CO_2]$. La velocidad de producción de CO_2 r_{CO_2} en $m^3s^{-1}kg^{-1}[materia\ seca]$ se expresa mediante:

$$r_{CO_2} = \frac{Y_{CO_2}}{1000} \frac{RT}{M_{CO_2} P_{at}}; \quad r_{O_2} = r_{CO_2} \quad \mathbf{5}$$

Las condiciones de contorno asociadas a las Ecs. (1) a (4) se expresan del siguiente modo:

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_{amb}) - \alpha G + \xi \sigma (T^4 - T_{sky}^4) \quad \text{on } \Gamma_1 \quad \mathbf{6}$$

$$\sigma T_{sky}^4 = \xi_{sky} \sigma T_{amb}^4 \quad \mathbf{7}$$

$$T = T_{soil}(y, t) = T_1(y) + T_2 \exp\left(-y \sqrt{\frac{2\Psi}{D_{soil}}}\right) \left[\cos\left(\Psi t - y \sqrt{\frac{2\Psi}{D_{soil}}} - \phi\right) \right] \quad \text{on } \Gamma_3 \quad \mathbf{8}$$

$$\frac{\partial p_v}{\partial n} = 0 \Rightarrow \eta D_w \frac{\partial W_g}{\partial n} = -\omega D_w \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{on } \Gamma_1 + \Gamma_2 \quad \mathbf{9}$$

$$-D_{CO_2}^* \frac{\partial CO_2}{\partial n} = \frac{P_{CO_2} P_{atm}}{L} (CO_2 - CO_{2out}) \quad \text{on } \Gamma_1 \quad \mathbf{10}$$

$$-D_{O_2}^* \frac{\partial O_2}{\partial n} = \frac{P_{O_2} P_{atm}}{L} (O_2 - O_{2out}) \quad \text{on } \Gamma_1 \quad \mathbf{11}$$

Las condiciones de contorno consideran la radiación solar y la convección al medio ambiente (Ec. (6)) así como la interacción entre el suelo y la base del silo bolsa (Ec. (8)). Se asumió que el silo bolsa es impermeable a la transferencia de humedad (Ec. (9)). La transferencia de los gases a través de la cobertura plástica se modeló definiendo una permeabilidad equivalente de la capa plástica al O_2 y CO_2 (Ec. (10) y Ec. (11)).

De acuerdo a la ecuación estequiométrica de la respiración (combustión completa de un carbohidrato típico), la velocidad de materia seca consumida por respiración aeróbica d_m en $mg\ [materia\ seca]\ kg^{-1}\ [materia\ seca]$ en 24 h se calcula mediante:

$$d_m(x, y, t) = \frac{180\ g}{264\ g} Y_{CO_2}(x, y, t) \quad \mathbf{12}$$

La pérdida local de materia seca en mg [materia seca] kg⁻¹ [materia seca] acumulada hasta el tiempo t se calculó por integración en el tiempo:

$$PMS(x, y, t) = \int_0^t d_m(x, y, t') dt' \quad 13$$

mientras que los valores medios de la pérdida de materia seca acumulada y de la temperatura se calculan mediante:

$$\overline{PMS}(t) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} PMS(x, y, t) d\Omega \quad 14$$

$$\overline{T}(t) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} T(x, y, t) d\Omega \quad 15$$

Parámetros de entrada del modelo matemático

La velocidad de producción Y_{CO_2} de CO₂ para trigo se evaluó mediante la correlación desarrollada por White et al. (1982):

$$\log Y_{CO_2} = -4.054 + 0.0406 T_c - 0.0165 \theta + 0.0001 \theta^2 + 0.2389 M \quad 16$$

donde Y_{CO_2} se expresa en mg/kg de materia seca en 24 h, θ es el tiempo de almacenamiento en días, T_c es la temperatura del grano en °C y M el CH en %.

Es importante destacar que en Argentina, así como en la mayoría de los países productores de granos, los granos raramente vienen infestados desde el campo, por lo cual la posibilidad de embolsar grano infestado es bastante baja. Sumado a esto, la típica operación de embolsado es muy simple (cosechadora - carro tolva - embolsadora) en comparación con el envío de los granos a los acopios que involucra un mayor número de etapas hasta que se almacenan en el silo, que resulta en una mayor posibilidad de infestación con insectos. Otro aspecto clave es que el silo bolsa no se reutiliza, cada vez que se embolsa grano se emplea una bolsa nueva, libre de insectos. Además, la capa plástica actúa como una barrera física, por lo cual no debería ocurrir una infestación posterior durante el periodo de almacenamiento. Como resultado, los informes sobre silo bolsas infectados con insectos son muy escasos. Massigoge et al. (2010) reportaron que en un estudio realizado sobre 56 silo bolsas con cebada monitoreados durante 6 meses (desde el comienzo del verano hasta el invierno), se detectaron insectos en solo 6 silo bolsas. Se notó, además, que los insectos fueron detectados solamente durante el verano. Al extenderse el tiempo de almacenamiento hacia el otoño e invierno, la temperatura del grano dentro de la bolsa sigue el cambio de la temperatura ambiente promedio y disminuye a 8,0 °C - 15,0 °C (Bartosik et al., 2008 a; Gastón et al., 2009), por debajo del límite para la actividad de los insectos (13,0 °C - 17,0 °C) (Banks y Fields, 1995; Field y Muir, 1996). Esto implica que, en la zona donde se llevó a cabo el mencionado estudio, la probabilidad de que el grano proviniera del campo con insectos al momento de ser embolsado es muy baja, y de ocurrir esto, el desarrollo posterior de los insectos durante el almacenamiento no sería significativo debido a las bajas temperaturas registradas durante la estación fría.

Basados en todas las consideración de los párrafos previos, no se incluye en el modelo la contribución de los insectos en la producción de CO₂.

La curva de sorpción se modeló con la ecuación de Henderson Modificada (Brooker et al., 1992) derivándose a partir de ella, las correspondientes expresiones para los parámetros L_g , η , and ω .

La permeabilidad equivalente del silo bolsa a la transferencia de O_2 y CO_2 se estimó mediante un modelo de resistencia en series. Asumiendo que mitad del espesor es HDPE y la otra LDPE, la permeabilidad al O_2 resultó $1,1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ m s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Pa}^{-1}$ y al CO_2 $3,7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ m s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Pa}^{-1}$, siendo el cociente de permeabilidad, $\beta = P_{CO_2} / P_{O_2} \cong 3$.

Una descripción detallada del modelo se presenta en publicaciones previas (Abalone et al., 2011 a, b; Abalone et al., 2006; Gastón et al., 2009).

Solución numérica

El modelo matemático fue implementado utilizando COMSOL Multiphysics 4.2a y resueltos numéricamente mediante el Método de Elementos Finitos. La Figura 1 muestra la discretización del silo bolsa. Se generó una malla refinada en la frontera del dominio donde se espera que se produzcan los gradientes de temperatura y humedad más pronunciados. Se emplearon elementos cuadráticos Lagrangianos y una cuadratura numérica de orden cuarto. Para resolver el sistema PDE se seleccionó el método Solver UMFPAK (Método Multifrontal y Factorización LU para matrices dispersas no simétricas).

INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR

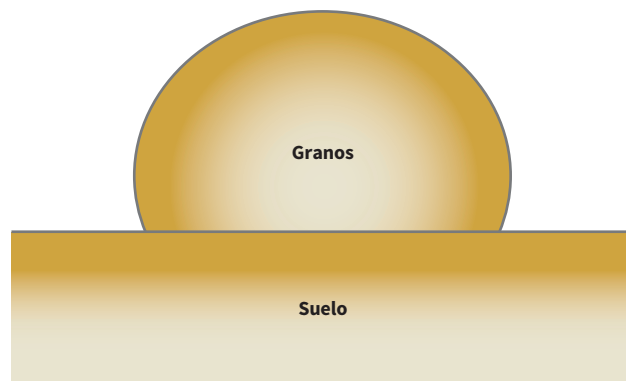


Figura 1.
Sección transversal de un silo bolsa y discretización de dominio.

Resultados y discusión

Definición de las condiciones iniciales de embolsado y de los datos climáticos para la simulación

El modelo fue aplicado para analizar el almacenamiento de trigo en un silo bolsa desde enero a junio (6 meses). Se fijó el CH inicial del grano en 12,0%, 14,0% y 16,0% y las temperaturas iniciales de embolsado en 25,0 °C y 40,0 °C. Los datos climáticos correspondientes a los años 1997 a 2004 fueron considerados para Balcarce (37,84 °S; 58,26 °O), en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires; a los años 2001 a 2006 para Pergamino (33,85

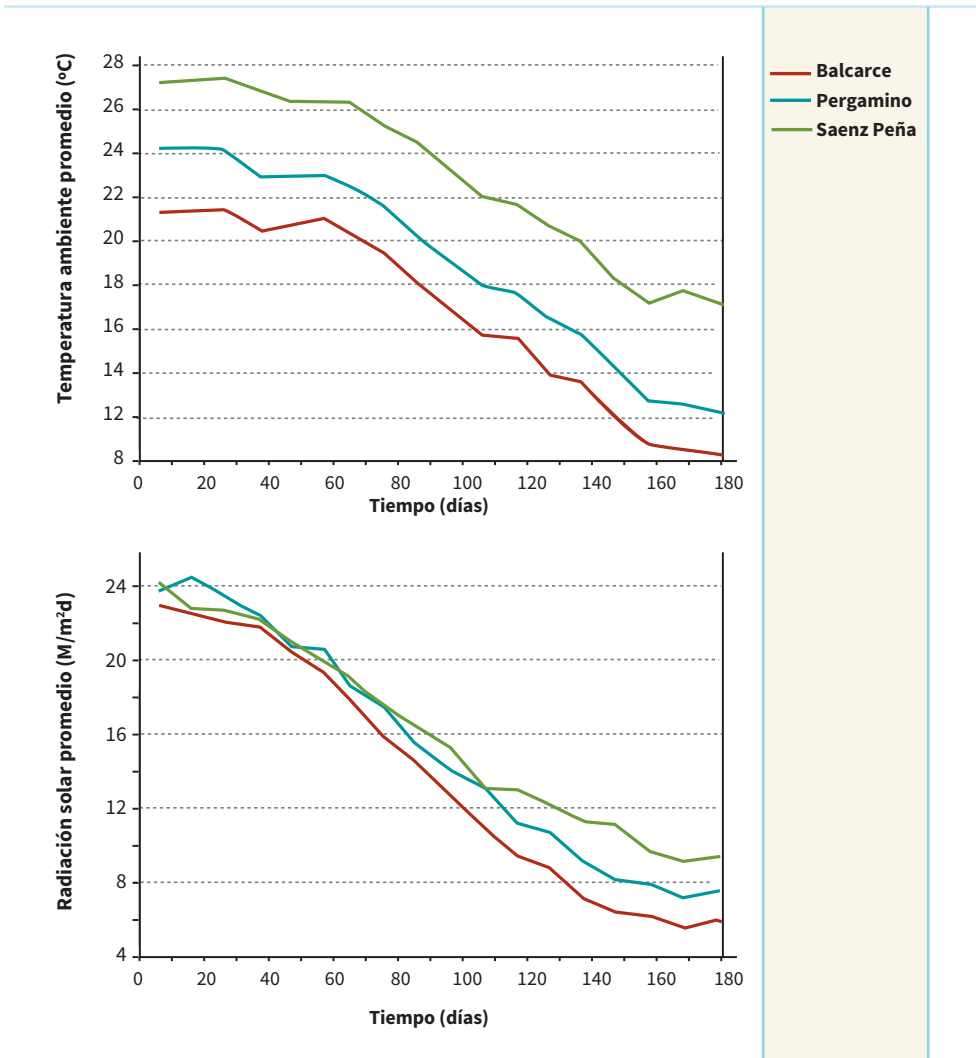
°S; 60,93 °O), en el norte de la provincia de Buenos Aires y a los años 1999 a 2006 para Sáenz Peña (26,78 °S; 60,45 °O), en la provincia del Chaco.

La Figura 2 compara la temperatura promedio anual y la radiación solar en las 3 localidades. En el verano, la temperatura ambiente promedio en Sáenz Peña es de alrededor de 3,0 °C más alta que en Pergamino y 7,0 °C más alta que en Balcarce, mientras que en invierno es aproximadamente 6,0 °C y 8,0 °C más alta respectivamente. La radiación solar es comparable en Sáenz Peña y Pergamino y aproximadamente 9,0% más alta que en Balcarce. En otoño la irradiación en Sáenz Peña es aproximadamente 13,0% y 30,0% más alta que en Pergamino y Balcarce.

Los resultados de cada condición de almacenamiento y localidad fueron promediados y mediante la aplicación de una distribución de probabilidad t - Student se construyó un intervalo de confianza de 90,0% para el promedio de temperatura, CO₂ y O₂ y PMS.

Figura 2.

Comparación de la temperatura ambiente promedio y la radiación solar promedio en las 3 áreas agrícolas.



Comparación de la concentración de CO₂ y O₂

La comparación de los niveles de referencia de CO₂ y O₂ entre las 3 localidades se realiza en términos de la evolución de la concentración promedio de ambos gases. Abalone et al. (2011 c) demostraron que, si se asume que el CH inicial del grano embolsado es uniforme, las diferencias en los valores de la concentración de CO₂ en la dirección vertical en una sección transversal del silo bolsa son del orden de 0,05% V/V. Por un lado, la evolución de los valores locales de la concentración resulta casi idéntica a la evolución de la concentración promedio para dicha sección transversal. Esto implica que la medición de la concentración en 1 o 2 lugares de la bolsa de una sección dada sería suficiente para obtener información confiable sobre las condiciones de almacenamiento. Por otro lado, diferencias de concentración tan pequeñas entre la parte superior e inferior de la bolsa difícilmente sean detectables en los ensayos a campo, en concordancia con Bartosik et al. (2008 b) y Cardoso et al. (2008) quienes reportan que la distribución de la concentración de gases es prácticamente uniforme.

La Figura 3 ilustra la concentración promedio de gases en las 3 localidades para una temperatura inicial de embolsado de 25,0 °C. Se puede apreciar que las condiciones climáticas producen cambios significativos en los niveles de referencia luego de 180 días de almacenamiento para 12,0% y 14,0%. En Balcarce para 12,0%, el nivel de CO₂ aumentó a 4,0% V/V ($\pm 0,07$) y el nivel de O₂ disminuyó a 15,5% V/V ($\pm 0,1$). Un incremento de 3,0 °C en la temperatura ambiente cambió los niveles de CO₂ y O₂ a 4,6% V/V ($\pm 0,1$) y 14,8% V/V ($\pm 0,1$) en Pergamino, y un incremento de 8,0 °C a 6,0% V/V ($\pm 0,1$) y 13,9% V/V ($\pm 0,2$) en Sáenz Peña.

La diferencia en los niveles de concentración entre verano (40 días) e invierno (180 días) permanecieron dentro de los 3,0% puntos aproximadamente en las 3 localidades.

A 14,0% la actividad fúngica se vuelve importante aumentando la concentración de CO₂ a 11,7% V/V ($\pm 0,2$) y reduciendo la concentración de O₂ a 5,0% V/V ($\pm 0,3$) en Balcarce y a 13,2% V/V ($\pm 0,3$) y a 2,9% V/V ($\pm 0,4$) en Pergamino. Se encontraron diferencias de hasta

Figura 3.

Evolución de la concentración de O₂ y CO₂ en Sáenz Peña, Pergamino y Balcarce.

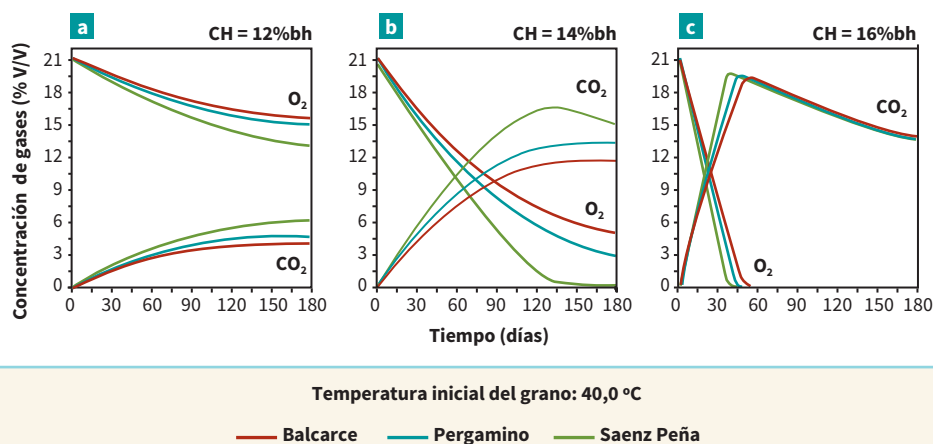
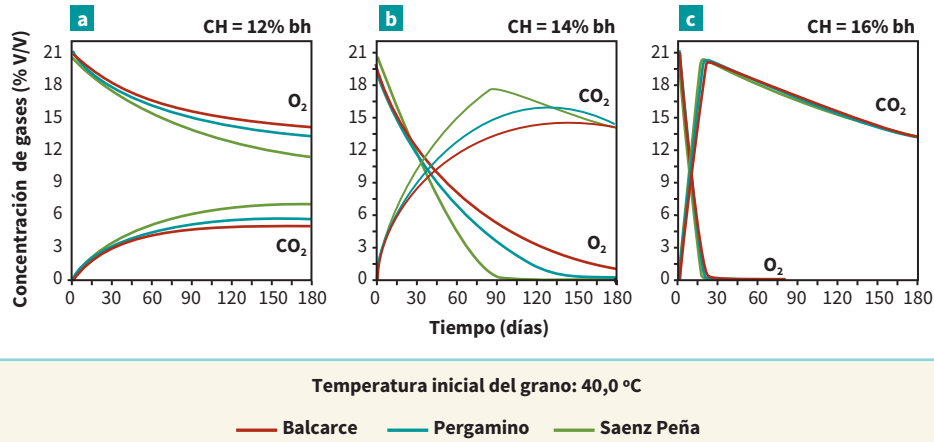


Figura 4.

Evolución de la concentración de O_2 y CO_2 en Sáenz Peña, Pergamino y Balcarce.



7,0% puntos entre verano (40 días) e invierno (180 días). En Sáenz Peña, el O_2 es prácticamente consumido luego de 140 días y permaneció en un nivel 0 a partir de allí porque todo el O_2 ingresante a través del plástico es consumido por la respiración. El CO_2 alcanza 14,9% V/V ($\pm 0,1$) y luego decae como resultado de la permeancia de CO_2 través del plástico que es aproximadamente 3 veces mayor que la del O_2 ($\beta = 3$). Para 16,0%, el O_2 disminuye a menos del 1,0% dentro de los 40 a 50 días (Sáenz Peña y Balcarce) y CO_2 evoluciona como se explicó anteriormente.

La Figura 4 muestra los resultados para 40,0 °C de temperatura inicial. Para 12,0% de humedad el CO_2 aumenta 1,0% a 1,5% V/V puntos respecto a 25,0 °C, mientras que el O_2 disminuyó en la misma magnitud. Para 14,0%, el O_2 disminuye a menos del 1,0% V/V luego de 90 días en Sáenz Peña, 140 días en Pergamino y 180 días en Balcarce, mientras que a 16,0% se alcanzan estas condiciones en aproximadamente 20 días en las 3 localidades.

Comparación de los cambios de temperatura del silo bolsa

Los resultados de la simulación numérica presentada por Gastón et al. (2009) revelaron que los gradientes de temperatura y de CH se concentran en una capa de 0,1 m a 0,2 m de espesor por debajo de la superficie del silo bolsa. Esto significa que aproximadamente el 25,0% del grano almacenado está afectado por las fluctuaciones horarias de las condiciones climáticas estacionales y en consecuencia estará expuesto a mayores pérdidas de calidad y deterioro. Por lo tanto, el cambio de la temperatura durante el periodo analizado en 2 posiciones dentro de la bolsa, debajo de la superficie plástica ($y = 1,4$ m) y en el centro ($y = 0,8$ m) se ilustrarán junto con la evolución de la temperatura promedio del silo bolsa. Para una dada temperatura inicial del grano embolsado, los resultados para 12,0%, 14,0% y 16,0% de CH inicial fueron casi idénticos: por esta razón, solo los resultados correspondientes a 16,0% de CH inicial (peor condición de embolsado) se muestran en la Figura 5 para 25,0 °C y la Figura 6 para 40,0 °C. Debajo de

la superficie, la temperatura oscila con una amplitud promedio de 5,0 °C en verano y 2,5 °C en invierno. En Balcarce y Pergamino, la temperatura en la parte superior comenzó a decrecer desde el comienzo para ambas temperaturas iniciales de embolsado, mientras que en Saenz Peña, el clima más cálido provoca un aumento de 2,5 °C durante el verano para una temperatura inicial de embolsado moderada (25,0 °C). Las oscilaciones se atenúan completamente en la zona central de la bolsa (y = 0,8 m) y la temperatura decreció debido al intercambio de energía con el medioambiente, incluso en el caso de grano húmedo (16,0%).

Figura 5. Evolución de la temperatura del grano en diferentes alturas dentro del silo bolsa para Balcarce, Pergamino y Saenz Peña.

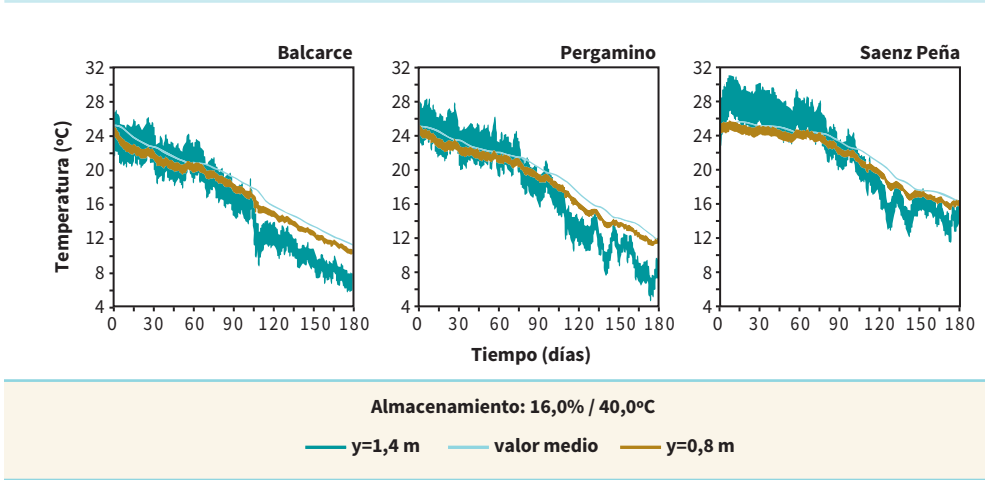
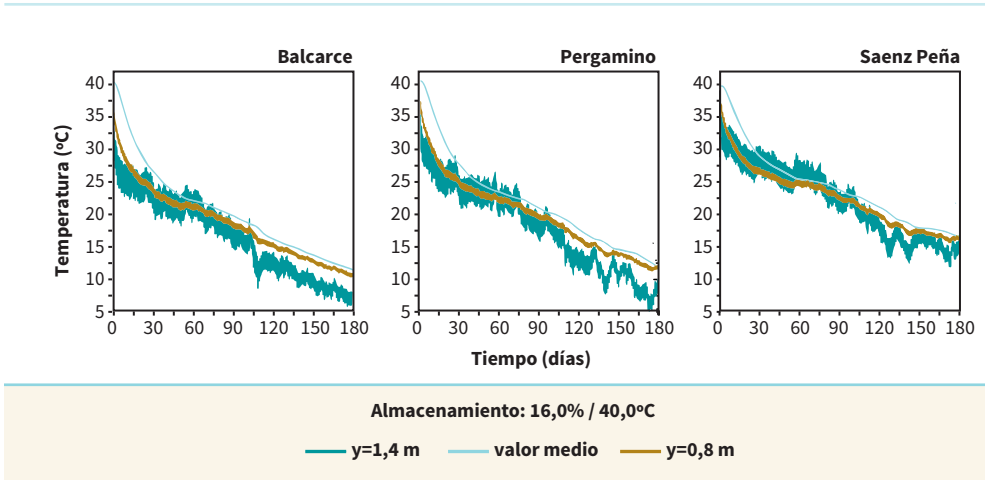
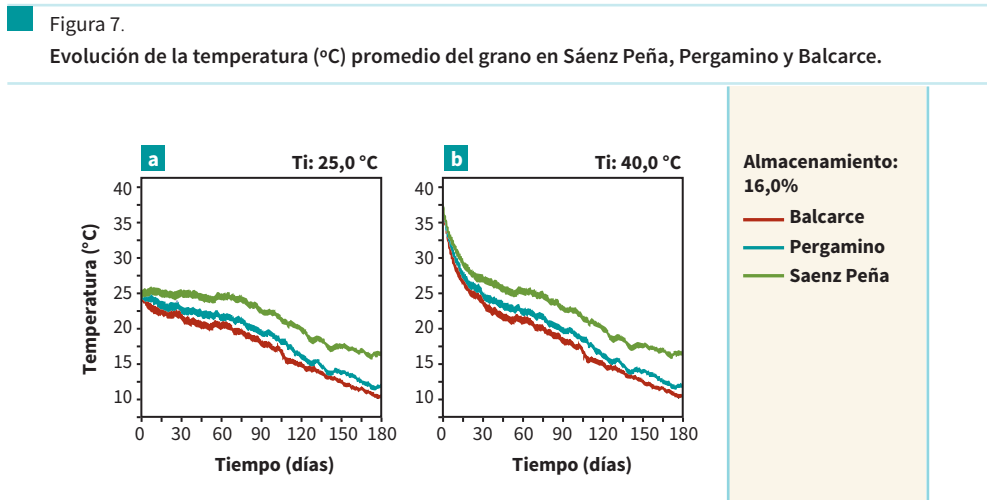


Figura 6. Evolución de la temperatura del grano en diferentes alturas dentro del silo bolsa para Balcarce, Pergamino y Sáenz Peña.



La Figura 7 compara la evolución de la temperatura promedio en las 3 localidades para 16,0%, y temperatura inicial de 25,0 °C y 40,0 °C. Estos resultados demuestran que para las regiones del centro y sur de la Argentina, la actividad de los insectos sería limitada para grano seco y húmedo, ya que la temperatura promedio del grano decrece por debajo de los 17,0 °C durante el otoño y el invierno previniendo la infestación. Más aún, incluso en verano, grano con 14,0% o mayor CH, limitaría la actividad de los insectos como resultado de la baja concentración de O₂ y alta de CO₂ si el silo bolsa mantiene un alto nivel de hermeticidad. Por el contrario, cuando se almacena grano seco (12,0%), la infestación podría desarrollarse durante el verano y al comienzo del otoño (o durante todo el año en las regiones con clima tropical) ya que ni la temperatura ni los niveles de O₂ y CO₂ alcanzan valores para limitarla. Una ventaja adicional del silo bolsa con respecto a la infestación es que los mismos no se reutilizan, cada vez que se embolsa grano se emplea una bolsa nueva libre de insectos (no hay infestación permanente como en las estructuras fijas) y el plástico actúa como una barrera física, por lo que si el grano proviene del campo libre de insectos, no debería producirse una infestación posterior durante el almacenamiento.

También se determinó la redistribución del CH y la misma se produce en dirección opuesta a los gradientes de temperatura. Por lo tanto, la humedad migró principalmente hacia la superficie y en menor medida hacia la base del silo bolsa como se demostró en trabajos previos (Gastón et al., 2008; 2009). En promedio, la acumulación de humedad en la capa superior (y = 1,4 m) fue a lo sumo de 0,2% puntos de humedad para 25,0 °C y de 0,3% para 40,0 °C en las 3 localidades.



Empleando la isoterma de sorción, se predijo la humedad relativa de equilibrio (HRE). Las condiciones de almacenamiento seguro (HRE < 70,0%) se mantuvieron del invierno al verano para 12,0% y 14,0% de CH inicial. Para el 14,0%, HRE intersticial fue siempre superior a 70,0% durante el verano y durante el invierno, la HRE de la capa superior (y = 1,4 m) disminuyó al enfriarse el grano como consecuencia de las condiciones climáticas, pero no lo suficiente como para alcanzar condiciones de almacenamiento seguro (Figuras 8 y 9). Estos resultados demuestran la importancia de mantener la hermeticidad del silo bolsa, especialmente en el caso de almacenamiento de grano húmedo. A pesar de que el

grano húmedo genera condiciones anaeróbicas que previenen la actividad de la microflora (Weinberg et al., 2008), cualquier filtración sería favorable para la actividad fúngica aeróbica causando deterioro y reduciendo el tiempo de almacenamiento seguro.

Figura 8. Evolución de la humedad relativa de equilibrio (HRE) promedio para (a) Balcarce, (b) Pergamino y (c) Sáenz Peña.

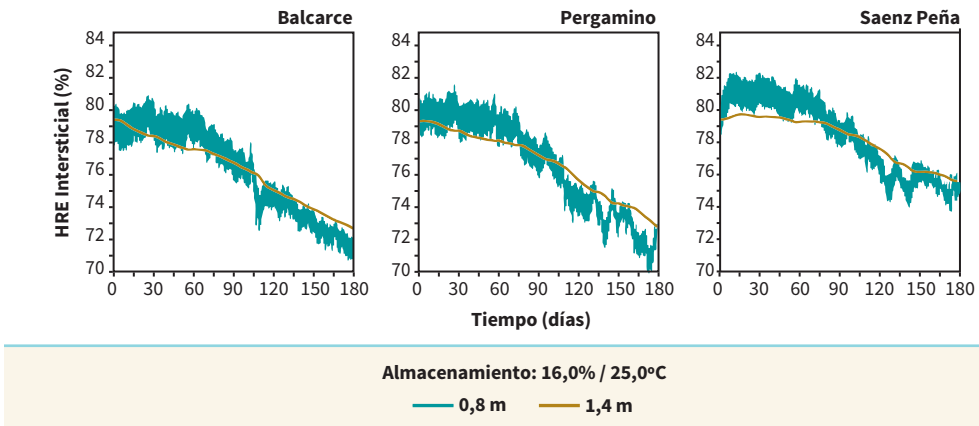
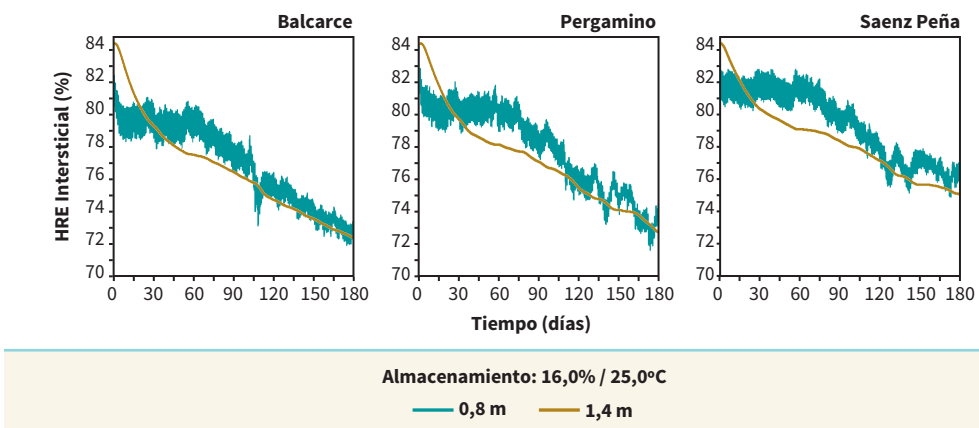


Figura 9. Evolución de la humedad relativa de equilibrio (HRE) promedio para (a) Balcarce, (b) Pergamino y (c) Sáenz Peña.



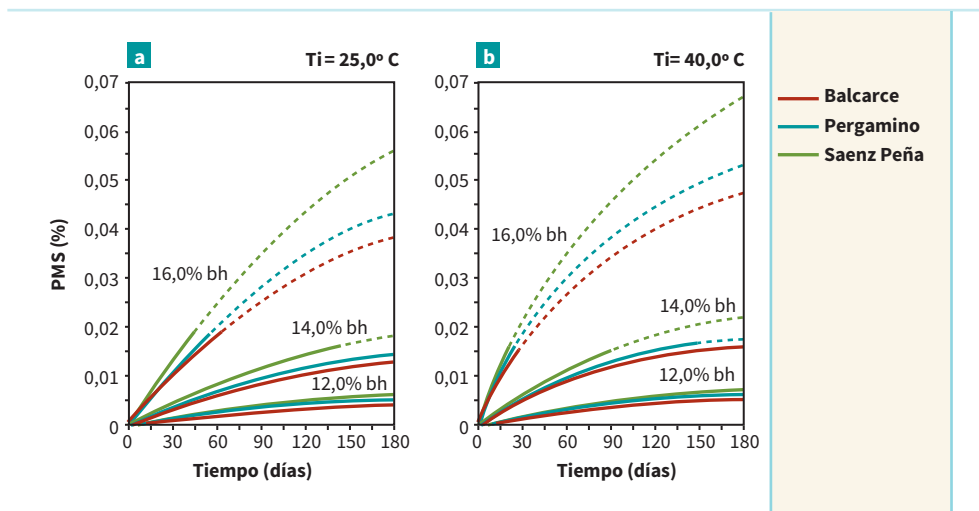
Comparación de la pérdida de materia seca

Para estimar el efecto de las condiciones de almacenamiento en la calidad del grano se calculó la PMS. White et al. (1982) consideran que una PMS de 0,1% es inaceptable para trigo y si el grano se empleara como semilla, el límite de almacenamiento seguro es 0,04% de PMS.

La Figura 10 presenta la PMS local ($y = 1,4 \text{ m}$; $y = 0,8 \text{ m}$) y la PMS promedio del silo bolsa para trigo a 16,0%, 25,0 °C y 40,0 °C en las 3 localidades. Para la peor condición de almacenamiento, trigo a 16,0% y 40,0 °C, la PMS en promedio fue 0,02% ($\pm 0,004$) luego de aproximadamente 20 días. De allí en más, el incremento de la PMS presumiblemente resultaría pequeño debido a la inhibición de la respiración, ya que el nivel de O_2 predicho por el modelo se mantuvo muy bajo, como se muestra en la Figura 4. Las líneas en trazos en la Figura 10 darían una estimación de la magnitud de la PMS media producida en un silo bolsa que ha perdido hermeticidad, de forma tal que se dispone de O_2 en forma irrestricta para la respiración. En tales condiciones, la PMS excedería los límites permitidos para el uso de trigo para semilla, pero no serían lo suficientemente elevados para disminuir la calidad comercial del grano. Esto resultados concuerdan con datos de ensayos a campo que muestran que cuando se embolsaron semillas con bajo CH (HRE menor que 67,0%), no se observó una reducción significativa en el poder germinativo en trigo y soja (Bartosik et al., 2008) y cebada (Massiggoge et al., 2010; Ochandio et al., 2009; 2010), aun cuando el tiempo de almacenamiento se extendió al verano.

Además, se puede observar que el sector dentro de la bolsa con mayor PMS depende de la temperatura inicial de embolsado. Para 25,0 °C, la PMS es mayor en la capa superior que en el centro de la bolsa, mientras que para 40,0 °C el comportamiento es opuesto. Como resultado del intercambio de energía con el medio ambiente, la velocidad promedio de respiración resultó mayor en la capa superior ($y = 1,4 \text{ m}$) porque la temperatura (inicialmente 25,0 °C) aumentó y permaneció superior a la del centro ($y = 0,8 \text{ m}$) durante el verano (primeros 80 días en la Figura 5). Cuando el trigo se embolsó a 40,0 °C, el centro del silo bolsa se mantuvo más caliente que la capa superficial que se enfrió debido a las condiciones climáticas, invirtiéndose así el ritmo de respiración. En base a esta observación, podrían desarrollarse, durante el almacenamiento, variaciones en la calidad de la semilla en el perfil de la bolsa (dirección vertical). Por este motivo, se recomienda muestrear el perfil completo del grano embolsado para obtener información confiable respecto de la calidad de la semilla.

Figura 10. Pérdidas de materia seca (PMS) en un silo bolsa con trigo en las 3 áreas agrícolas evaluadas: Balcarce, Pergamino y Saenz Peña.



Conclusiones

El efecto de las condiciones climáticas en la evolución de la concentración de gases en silo bolsas con trigo fue analizado usando un modelo matemático validado. Valores de referencia de los niveles promedio de O_2 y CO_2 fueron predichos para 3 zonas productivas típicas de Argentina: una en el norte con clima subtropical (Sáenz Peña, provincia del Chaco), otra en el centro con clima intermedio (Pergamino, provincia de Buenos Aires) y la tercera en el sur con clima templado (Balcarce, provincia de Buenos Aires) .

Los resultados mostraron que los valores referenciales de O_2 y CO_2 dependen fuertemente del contenido de humedad inicial y de la temperatura de embolsado del grano. Además, la condición climática agrícola produce cambios significativos, especialmente para grano seco y levemente húmedo. Una diferencia de aproximadamente 7,0 °C a 8,0 °C en el promedio de la temperatura ambiente entre la región norte (Sáenz Peña) y la región sur (Balcarce) cambia los niveles de referencia aproximadamente 2,0% V/V puntos para 12,0% y aproximadamente 4,0% V/V puntos para 14,0%. En las 3 localidades, el O_2 disminuyó a menos de 1,0% para 16,0%.

La evolución de la temperatura promedio del grano en combinación con los niveles de CO_2 y O_2 alcanzados en los silo bolsas demuestra que para las condiciones climáticas de las regiones del centro y el sur de Argentina, la actividad de los insectos podría ser limitada en los silo bolsas. Embolsar grano seco en las zonas del norte permitiría la actividad de los insectos durante el verano y otoño.

El modelo predice un leve incremento en el CH de la capa superior de granos. Para grano húmedo, la HRE de la capa superior es mayor que la de almacenamiento seguro, incluso durante el invierno, resultando factible la actividad fúngica si hay pérdida de hermeticidad. Sin embargo, la PMS predicha para todas las condiciones de almacenamiento no superó los límites para producir una disminución en la calidad comercial del grano; no obstante, la calidad para semilla podría ser afectada en caso de almacenar grano húmedo.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer a las siguientes instituciones: ANPCYT/FONCYT (PICT 20080460), Universidad Nacional de Rosario (PIDING295) y al INTA Proyecto: Eficiencia en la Poscosecha (AEAI 11 - 30023) por el apoyo a este trabajo.

Referencias

- Abalone R.; Gastón A.; Cassinera A. y Lara M. 2006. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica Computacional* 24: 233 - 247.
- Abalone R.; Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2011 a. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part I: Model development and validation. *J. Stored Prod. Res.*, 47: 268 - 275. doi: 10.1016/j.jspr.2011.05.004
- Abalone R.; Gastón A.; Cardoso L.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2011 b. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part II: model sensitivity and effect of grain storage conditions". *Journal of Stored Products Research*, 47(4): 268 - 275.

- Abalone R. y Gastón A. 2011 c. Mathematical modelling of oxygen and carbon dioxide concentration profiles in the interstitial atmosphere of silo - bags, pp. 1 - 9. En: Proc. of XXXIV CIOSTA CIGR V Conference 2011. Efficient and safe production processes in sustainable agriculture and forestry, 29 de junio - 1 de julio, Vienna, Austria.
- Andrade E.; Couto S.; Queiroz D. y Faroni L. 2002. Three dimensional simulation of the temperature variation in corn stored in metallic bin. ASAE Annual Meeting. Paper N° 02 - 3150.
- Arias Barreto A.; Abalone R. y Gastón A. 2011. Simulación computacional de la difusión de gases en sistemas de almacenamiento hermético. *Mecánica Computacional*, 30: 1575 - 1589.
- Banks J. y Fields P. 1995. Physical methods for insect control in stored - grain ecosystems, pp. 353 - 410. En: Jayas D.; White N. y Muir W. (Eds.), *Stored Grain Ecosystems*, Marcel Dekker, Inc., New York, EE.UU.
- Bartosik R.; Rodríguez J. y Cardoso L. 2008 a. Storage of corn, wheat soybean and sunflower in hermetic plastic bags. En: Proc. Int. Grain Quality and Technology Congress, Chicago, EE.UU.
- Bartosik R.; Cardoso M.L. y Rodríguez J. 2008 b. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Bartosik R.; Ochandio D.; Cardoso L. y de la Torre D. 2012. Storage of malting barley with different moisture contents in hermetic silo - bags, pp. 549 - 554. En: Proc of 9th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 15 - 19 de octubre, Antalya, Turquía.
- Bartosik R. 2012. An inside look at the silo - bag system, pp. 117 - 129. En: Proc. of 9th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 15 - 19 de octubre, Antalya, Turquía.
- Bispo Dos Santos S.; Martins M. y Faroni L. 2007. Computational study of oxygen infiltration due to damage in the silo bag surface. En: 2007 ASABE Annual International Meeting, 17 - 20 de junio, Minneapolis, Minnesota, EE.UU, Paper N° 076172.
- Bispo Dos Santos S.; Rodrigues de Brito V.; Martins M. y Faroni L. 2008. Dry matter loss of maize grains hermetically stored. En: Proc. Int. Conf. of Agric. Eng. CIGR 2008, 31 de agosto - 4 de septiembre, Foz de Iguazú, Brasil.
- Brooker D.; Bakker - Arkema F. y Hall C. 1992. *The drying and storage of grains and oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold, Avi Book.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Cardoso L.; Bartosik R. y Milanesio D. 2009. Phosphine concentration change during fumigation in hermetic plastic bags (silo - bags). En: Proceedings of the In-

ternational Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. Conference, Technology and Management to Increase the Efficiency in Sustainable Agricultural Systems, 1 - 4 septiembre, Rosario, Argentina.

- Cardoso L.; Bartosik R.; Campabadal C. y de La Torre D. 2012. Air - tightness level in hermetic plastic bags (silo - bags) for different storage conditions, pp. 583 - 589. En: Proc. of 9th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 15 - 19 de octubre, Antalya, Turquía.
- Carrera - Rodríguez M.; Martínez - Gonzáles G.; Navarrete Bolaños J.; Botello Alvarez E.; Rico - Martínez R. y Jimenez - Islas H. 2011. Transient numerical study of the effect of ambient temperature on 2D cereal grain storage in cylindrical silos. *J. Stored Prod. Res.*, 47: 106 - 122.
- Darby J. y Caddick L. 2007. Review of the harvest bag technology under Australian conditions. CSIRO Entomology. Technical report N° 105.
- Donahaye E.; Navarro S.; Ziv A.; Blauschild Y. y Weerasinghe D. 1991. Storage of paddy in hermetically sealed plastic liners in Sri Lanka. *Trop. Sci.*, 31: 109 - 121.
- Donahaye J.; Navarro S.; Andalesangelita S.; Del Mundo M.; Caliboso F.; Sábio G.; Felix A.; Rindner M.; Azrieli A. y Dias R. 2001. Quality preservation of moist paddy under hermetic conditions, pp. 209 - 225. En: Donahaye E.; Navarro S. y Leesch J. (Eds.), Proc. Int. Conf. Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products.
- Field P. y Muir W. 1996. Physical Control, pp 195 - 221. En: Subramanyam B. y Hagsstrum D. (Eds.), Integrated Management of Insects in Stored Products, Marcel Dekker Inc., Nueva York, EE.UU.
- Gastón A.; Abalone R.; Cassinera A. y Lara M. 2007. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos - bolsa. *Mecánica Computacional* 26: 3577 - 3561.
- Gastón A.; Abalone R.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2008. Heat and mass transfer in soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bags). En: Proc. Int. Conf. of Agric. Eng., 15 - 18 de Julio, Chicago, EE.UU.
- Gastón A.; Abalone R.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2009. Mathematical modeling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo bags). *Biosystems Eng.*, 104: 72 - 85.
- Geankoplis C. 1998. Transport processes and unit operations, 3rd Edition, CECSA, México, 460 p.
- Jia C.; Sun D. y Cao C. 2000 a. Finite element prediction of transient temperature distribution in a grain storage bin. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76: 323 - 330.
- Jia C.; Sun D. y Cao C. 2000 b. Mathematical simulation of temperature fields in a stored grain bin due to internal heat generation. *Journal of Food Engineering*, 43: 227 - 233.
- Jiang S.; Jayas D.; White N. y Alagusundaram K. 2005. A three - dimensional, asymmetric, and transient model to predict grain temperatures in grain storage bins. *Transactions of the ASAE*, 48(1): 263 - 271.
- Jiménez - Islas H.; Navarrete Bolaños J. y Betello Alvarez E. 2004. Estudio numérico de la convección natural de calor y masa 2D en granos almacenados en silos cilíndricos. *Agrociencia*, 38: 325 - 342.

- Khankari K.; Morey R. y Patankar S. 1994. Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due to temperature gradients. *Trans. of the ASAE*, 37(5): 1591 - 1604.
- Khankar K.; Patankar S. y Morey R. 1995 a. A mathematical model for natural convection moisture migration in stored grain. *Trans. of the ASAE*, 38(6): 1777 - 1787.
- Khankari K.; Patankar S. y Morey R. 1995 b. Application of a numerical model for prediction of moisture migration in stored grain. *Trans. of the ASAE*, 38(6): 1789 - 1804.
- Idler C.; Wagne A.; Weber U. y Hoffmann T. 2012. Effect of short - term storage on quality of wheat stored in large polyethylene bags. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 14(1): 149 - 156. Disponible en: <http://www.cigrjournal.org>. Accedido en julio del 2012.
- Iguaz A.; Arroqui C.; Esnoz A. y Vírseda P. 2004 a. Modelling and validation of heat transfer in stored rough rice without aeration. *Biosystem Engineering*, 88(4): 429 - 439.
- Iguaz A.; Arroqui C.; Esnoz A. y Vírseda P. 2004 b. Modelling and simulation of heat transfer in stored rough rice with aeration. *Biosystem Engineering*, 89(1): 69 - 77.
- Ileleji K.; Maier D.; Blat C. y Woloshuk C. 2006. Detection of a developing hot spot in stored corn with a CO₂ sensor. *Applied Engineering in Agriculture*, 22: 275 - 289.
- Lobo Paes J.; Martins M. y Faroni L. 2007. Computational Study of anaerobiosis acceleration in hermetic storage of maize using oxygen depletion. ASABE Annual Int. Meeting. Paper N°. 076173.
- Massigoge J.; Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2010. Almacenamiento de cebada cervecera en silos bolsa. En: Actas del IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, 25 - 29 de julio, Vitoria, ES, Brasil.
- Montross D.; Maier D. y Haghghi K. 2002 a. Development of a finite - element stored grain ecosystem model. *Trans. of the ASAE*, 45(5): 1455 - 1464.
- Montross D.; Maier D. y Haghghi K. 2002 b. Validation of a finite - element stored grain ecosystem model. *Trans. of the ASAE*, 45(5): 1465 - 1474.
- Navarro S.; Donahaye E. y Fishman S. 1994. The future of hermetic storage of dry grains in tropical and subtropical climates, pp. 130 - 138. En: Proc. of the 6th Int. Working Conference on Stored Product Protection, 17 - 23 de abril, Canberra, Australia.
- Navarro S.; Donahaye E.; Caliboso F. y Sabio G. 1996. Application of modified atmospheres under plastic covers for prevention of losses in stored grain. Final Report CDR - USAID Project C7 - 053.
- Navarro S.; Caliboso F.; Sabio G. y Donahaye E. 1997. Quality conservation of paddy stored under gastight seal outdoors in the Philippines, pp. 159 - 168. En: Proc. International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages, Nicosia, Chipre.
- Navarro S.; Donahaye E.; Caliboso F. y Sabio G. 1998 a. Outdoor storage of corn and paddy using sealed - stacks in the Philippines, 225 - 236. En: Proc. 18th ASEAN Seminar on Grains Postharvest Technology.
- Navarro S.; Donahaye E.; Ferizli G.; Rindner M. y Azrieli A. 1998 b. A sealed granary for use by small - scale farmers, pp. 434 - 443. En: Proc. 7th International Working Conf. on Stored product Protection.

- Ochandio D.; Rodríguez J.; Rada E.; Cardoso L. y Bartosik R. 2009. Almacenamiento de cebada cervecera en bolsas plásticas herméticas, pp. 238. En: Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Ochandio D.; Cardoso L.; Bartosik R.; de la Torre D.; Rodríguez J. y Massigoge J. 2010. Storage of quality malting barley in hermetic plastic bags, pp. 331 - 337. En: Proc. of 10th the International Working Conference on Stored Product Protection, 27 de junio - 2 julio, Estoril, Portugal.
- Ochandio D.; Bartosik R.; Yommi A. y Cardoso L. 2012. Carbon dioxide concentration in hermetic storage of soybean (*Glycine max*) in small glass jars, pp. 495 - 500. En: Proc. of 9th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 15 - 19 de Octubre, Antalya, Turquía.
- Ridley A.; Burrill P.; Cook C. y Darglish G. 2011. Phosphine fumigation of silo - bags. *J. Stored Prod. Res.*, 47: 349 - 356.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Malinarich H.; Exilart J. y Nolasco M. 2001. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: Sistema silo - bag. Informe final de girasol. EEA INTA Balcarce. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/silobag.htm>. Accedido en marzo del 2010.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Malinarich H. y Maier D. 2002. Silo - bag: evaluation of a new technique for temporary storage of wheat in the field, pp. 1018 - 1023. En: Proc. of the 8th Int. Working Conference on Stored Products Protection, 22 - 26 de julio, York, Inglaterra.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Malinarich H.; Exilart J. y Nolasco M. 2004. IP Short term storage of Argentine cereals in Silo - bags to prevent spoilage and insects, pp. 1 - 15. En: Proc. of the Int. Quality Grain Conference, Purdue University, West Lafayette, EE.UU.
- Santa Juliana D. y Casini C. 2009. Estudio de la variabilidad de la concentración de dióxido de carbono y oxígeno en granos de maíz (*Zea mays*) almacenados en bolsas plásticas, pp. 2289 - 2299. En: UNR (Eds.). Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR, Rosario, Santa Fe, Argentina, CD - ROM.
- Singh A.; Leonardi E. y Thorpe G. 1993. A solution procedure for the equations that govern three - dimensional free convection in bulk stored grains. *Trans. of the ASAE*, 36(4): 1159 - 1173.
- Thorpe G. 1981. Moisture diffusion through bulk grain. *J. Stored Prod. Res.*, 17(1): 39 - 42.
- Thorpe G. 2002. Physical basis of aeration, pp. 125 - 194. En: Navarro S. y Noyes R. (Eds.), *The mechanics and physics of modern grain aeration management*, CRC Press, Boca Raton, EE.UU.
- Weinberg Z.; Yan Y.; Chen Y.; Finkelman S.; Ashbell G. y Navarro S. 2008. The effect of moisture level on high moisture maize (*Zea mays* L.) under hermetic storage conditions - in vitro studies. *J. Stored Prod. Res.*, 44: 136 - 144.
- White N.; Sinha R. y Muir W. 1982. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Can. Agric. Eng.*, 24: 35 - 42.

4

Hongos y micotoxinas

Publicado en: Castellari C.; Marcos Valle F.; Mutti J.; Cardoso L. y Bartosik R. 2010. Toxigenic fungi in corn (maize) stored in hermetic plastic bags. En: 501 - 504, Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection, 27 de junio - 2 de julio, Estoril, Portugal. Julius - Kühn - Archiv, Bundesforschungsanstalt für Kulturpflanzen, Berlin, 1077 p.

Hongos toxigénicos en maíz almacenado en silo bolsas

Claudia Castellari¹
Facundo Marcos Valle¹
Jeremías Mutti¹
Leandro Cardoso²
Ricardo Bartosik²

Resumen

En Argentina, 35,0 millones de toneladas de granos se almacenan en silo bolsas. Dentro de las bolsas, la atmósfera modificada tiene un efecto sobre los granos almacenados, los insectos y los hongos. Las especies de hongos típicamente identificadas en los granos almacenados consisten en especies de los géneros *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* y hongos xerófilos, algunos de los cuales son posibles productores de micotoxinas. La provincia de Entre Ríos, Argentina, es un área de estudio importante porque gran parte de la producción de maíz almacenado en bolsas es demandada como suministro por la industria avícola. El objetivo de este estudio fue identificar las especies de hongos micotoxigénicos en maíz almacenado en silo bolsas ubicadas en tres departamentos de la provincia de Entre Ríos. Un total de 176 muestras de maíz correspondientes a 23 bolsas ubicadas en los departamentos de Paraná (región oeste), La Paz (región norte) y Tala (región central), fueron analizadas. Dos posibles especies productoras de aflatoxinas (*A. flavus* y *A. parasiticus*) y una especie potencial productora de fumonisinas (*F. verticilloides*) se identificaron en todas las bolsas de plástico analizadas. En el departamento de La Paz, *Aspergillus* spp. y *F. verticilloides* se detectaron en el 66,7% y el 54,0% de las muestras, respectivamente. En el departamento de Tala, *Aspergillus* spp. se detectó en el 63,3% y *F. verticilloides* en el 43,6%, mientras que en Paraná, *Aspergillus* spp. se detectó en el 88,2% de las muestras analizadas y *F. verticilloides* en el 41,4% de las muestras. Los resultados revelaron que los hongos micotoxigénicos pueden

¹FCA Balcarce, UNMDP (Buenos Aires), Argentina.

²EEA INTA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

desarrollarse en maíz almacenado en silo bolsas, implicando un riesgo potencial de contaminación con aflatoxinas y fumonisinas durante el almacenamiento.

Palabras clave: hongos micotoxigénicos, maíz, silo bolsa, calidad de granos, deterioro de granos por hongos

Introducción

La capacidad de almacenamiento total de granos de Argentina se estima en 73,0 millones de toneladas, lo que representa alrededor del 75,0% de la producción. Como resultado, la eficiencia del sistema de poscosecha está comprometida. Para superar estas circunstancias desfavorables, una nueva técnica de almacenamiento de granos secos (trigo, maíz, soja, etc.) ha ganado popularidad entre los productores. Esta nueva técnica consiste en el empleo de silo bolsas. Estas bolsas pueden almacenar aproximadamente 200,0 toneladas de grano y como el material de plástico es de 230 μm de espesor, son herméticas al agua y a los gases, como oxígeno (O_2) y dióxido de carbono (CO_2). La respiración de los granos, los hongos, los insectos y otros organismos vivos consume el O_2 y genera CO_2 . Esta atmósfera modificada tiene efectos sobre las semillas, los insectos y los hongos (Cardoso et al., 2008; Rodríguez et al., 2008). Los géneros de hongos que se encuentran típicamente en los granos almacenados son *Fusarium*, *Penicillium* y *Aspergillus*, y algunas especies de xerófilas, muchas de ellas con capacidad de producir toxinas (Christensen, 1987; Lacey, 1989). El desarrollo de estos hongos puede verse afectado por el contenido de humedad del producto (Giorni et al., 2009; Hell et al., 2000), la temperatura, el tiempo de almacenamiento, el grado de contaminación fúngica antes del almacenamiento y la actividad de insectos y ácaros que podría facilitar la diseminación de hongos. Estos hechos ponen de manifiesto la importancia de identificar las especies de hongos en granos almacenados, prestando una atención especial en los hongos micotoxigénicos ya que estos pueden ser una amenaza potencial para la salud humana y animal. El objetivo de este estudio fue caracterizar las especies de hongos filamentosos aisladas de grano de maíz almacenado en silo bolsas y cuyo destino es la industria avícola en la provincia de Entre Ríos. En esta provincia se concentra el 47,0% de la industria de aves de corral y huevos de todo el país. Los resultados de este estudio tienen como objetivo ayudar a los productores y a la industria a almacenar correctamente sus granos de calidad, especialmente en términos de buenas prácticas de higiene y saneamiento.

Materiales y métodos

Este estudio se llevó a cabo a partir de muestras de maíz recolectadas de silo bolsas ubicadas en los departamentos de Paraná (oeste), La Paz (norte) y Tala (Centro) de la provincia de Entre Ríos. La provincia de Entre Ríos limita al norte con la provincia de Corrientes, al oeste, separadas por el río Paraná, con la provincia de Santa Fe, al sur con la provincia de Buenos Aires, y al este, separadas por el río Uruguay, con la República Oriental del Uruguay.

Muestreo de granos

La cosecha de maíz fue en abril y la toma de muestras de grano se realizó a finales de julio, después de 3 a 4 meses de almacenamiento. Las muestras se recogieron cada 10,0 m a lo largo de la bolsa (en general, las bolsas de plástico son de 60,0 m de largo) con un calador sonda de celdas divididas de 1,8 m de largo, que permitió tomar muestras de todo el perfil vertical de la masa de grano. Los granos recolectados fueron separados según su ubicación en el perfil de la masa de grano: 1) capa superior (0,0 m - 0,1 m) y 2) capas medias e inferiores (0,1 m a 1,8 m). La temperatura y el contenido de humedad del grano también se registraron por cada capa de grano y lugar de muestreo. La temperatura se determinó con un sensor de temperatura portátil que se introdujo en la masa de grano y midió la temperatura a 0,1 m; 0,7 m y 1,6 m desde la parte superior de la bolsa. El contenido de humedad del grano se determinó con un medidor de humedad (Dickey - John, GAC 2100). Las muestras de maíz recolectadas fueron colocadas en bolsas de plástico con cierre hermético y se enviaron al Laboratorio de Microbiología de la Unidad Integrada Balcarce (INTA - Facultad de Agronomía de la Universidad de Mar del Plata), donde se almacenaron a 4,0 °C hasta su procesamiento.

Caracterización de hongos

Aislamiento de hongos

La presencia de hongos filamentosos se determinó por la aplicación de la técnica de plaqueo directo de granos. En una cabina de flujo laminar, tipo II, 110 granos de cada muestra fueron seleccionados y se colocaron en placas de Petri (10 granos por placa) con medio de cultivo agar con 18,0% de glicerol (DG18) (Pitt y Hocking, 1997). El medio DG18 tiene una actividad acuosa superior a 0,9, por lo que permite el crecimiento de las especies no xerófilas (*Penicillium*, *Aspergillus*), así como xerófilas (*Eurotium* spp.) y levaduras. Por otro lado, se colocaron 10 granos en una placa de Petri con agar peptona dicloran cloranfenicol (DCPA), con el fin de detectar *Fusarium* spp. Las placas de Petri se incubaron a 25,0 °C durante 7 días. Luego, el porcentaje de granos contaminados se determinó para cada muestra y todas las colonias con diferencias visuales en su morfología se removieron en condiciones estériles para ser depositadas en placas de Petri con DG18 y medio de cultivo DCPA y, a continuación, se incubaron a 25,0 °C durante 7 días para obtener un cultivo puro.

Identificación de los hongos

Los hongos aislados de los géneros *Penicillium*, *Aspergillus* y *Eurotium* se identificaron utilizando la clave taxonómica de Pitt y Hocking (1997), basada en características morfológicas y bioquímicas. Para las especies que pertenecen al género *Fusarium*, se utilizaron las claves de Samson et al. (1995), Nelson et al. (1983) y el atlas de *Fusarium* (Gerlach y Nirenberg, 1982). Para llevar a cabo estos procedimientos de identificación con rigurosas condiciones de comparación, los cultivos puros fueron cultivados con DCPA y medio agar papa dextrosa APG «Pitt y Hocking, 1997», para obtener cultivos monospóricos.

Determinación de la frecuencia de aislamiento

La frecuencia de aislamiento de los géneros fúngicos y de las especies potencialmente micotoxigénicas en cada silo bolsa se determinó como la relación entre el número de mues-

tras con aislamientos positivos y el número total de muestras analizadas de cada silo bolsa. La frecuencia de aislamiento para cada una de las especies identificadas también se determinó como la relación entre el número de muestras con aislamientos positivos para cada especie y el número total de muestras analizadas de cada departamento.

Resultados

Fueron analizadas un total de 176 muestras de maíz obtenidas de 23 diferentes silo bolsas. Los géneros de *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium* y *Eurotium* fueron identificados en cada bolsa. Aunque *Penicillium* y *Aspergillus* tenían el mayor número de especies solo 2 especies del género *Aspergillus* (*A. flavus* y *A. parasiticus*) y 1 del género *Fusarium* (*F. verticilloides*) fueron identificados y reportados en la literatura como potencialmente micotoxigénicos y de importancia para la salud humana y animal. Se determinó que el 90,0% de los aislamientos del género *Aspergillus*, correspondió a *A. flavus*.

La Tabla muestra la frecuencia de aislamiento de las especies potencialmente micotoxigénicas más importantes para el maíz almacenado, por departamento (Tabla 1).

Tabla 1.

DEPARTAMENTO	<i>Fusarium verticilloides</i> (%)	<i>Aspergillus</i> spp. (%)*	<i>F. verticilloides</i> y <i>aspergillus</i> spp. (%)*
La Paz (Norte)	54,0	66,7	52,4
Paraná (Oeste)	41,4	88,2	36,4
Tala (Centro)	43,6	63,3	ND

**Aspergillus flavus*; *Aspergillus parasiticus*; ND: no detectado

La ubicación del grano en el perfil de la masa de granos (p. ej., capa superior) no tuvo influencia en las especies fúngicas identificadas, ya que en las dos capas evaluadas (superior y centro - inferior) fue identificada la misma especie, aunque la frecuencia de aislamiento fue diferente. Especies micotoxigénicas de los géneros *Aspergillus* y *Fusarium* fueron aisladas en todas las bolsas. Las muestras de granos provenientes del departamento Paraná tuvieron el mayor porcentaje de aislamientos de las especies aflatoxigénicas, mientras que las muestras del departamento La Paz tenían la mayor proporción de *F. verticilloides* (potencial productor de fumonisinas). En este departamento el 52,4% de las muestras estaban contaminadas con las tres especies potencialmente micotoxigénicas (*A. flavus*, *A. parasiticus* y *F. verticilloides*). También se observó que en las muestras en las que *A. flavus* y *F. verticilloides* estaban presentes, la proporción de *F. verticilloides* fue siempre superior (datos no presentados).

Discusión

El almacenamiento de granos en silo bolsas requiere un seguimiento frecuente con el fin de detectar precozmente el deterioro de los granos y el desarrollo de hongos micotoxigénicos. En este estudio se identificaron *A. flavus* y *F. verticilloides* como las especies más importantes desde el punto de vista de su potencial capacidad de producir micotoxi-

nas (aflatoxinas y fumonisinas, respectivamente), como fue reortado por Lino et al., (2007) y por Logrieco et al., (2007). Estudios anteriores identificaron especies micotoxigénicas de *Aspergillus* spp. y *Fusarium* spp. en granos almacenados, así como micotoxinas, aflatoxinas y fumonisinas, en diferentes concentraciones (Pacin et al., 2009; Moreno Cunha et al., 2009).

Por un lado, existe una tendencia mundial de aumentar el consumo de cereales y sus derivados. Por otro lado, el consumo de granos contaminados con micotoxinas causa diferentes problemas, incluyendo la muerte, como fue reportado por Voss et al. (2007) y Lerda et al. (2005). Los estudios realizados sobre las condiciones que conducen al desarrollo de hongos durante el almacenamiento y la producción de micotoxinas indicaron que el contenido de humedad de los granos es uno de los factores más importantes (Giorni et al., 2009; Hell et al., 2000). En el maíz, se determinó que un contenido de humedad de almacenamiento de 13,0% es suficientemente bajo para evitar el desarrollo de hongos y la producción de micotoxinas (actividad acuosa por debajo de 0,65). En este estudio, todas las muestras de grano presentaron un contenido de humedad superior al 13,0%, alcanzando valores de hasta 25,1% en las muestras del departamento de La Paz (región Norte). Estas condiciones de almacenamiento inseguras indicarían que el grano almacenado en silo bolsas puede estar contaminado con diferentes niveles de micotoxinas. De hecho, *Fusarium*, que es un género que afecta típicamente al grano en el campo, se encontró con una frecuencia del 40,0% en las muestras recogidas de las bolsas, muy probablemente debido a la actividad de los hongos durante el almacenamiento de granos extremadamente húmedos.

En Argentina, el almacenamiento de granos en silo bolsas es una práctica común. Se convirtió en una herramienta importante para la agricultura, tanto por su logística como desde el punto de vista económico, ya que es un sistema de almacenamiento sencillo y de bajo costo. Sin embargo, las condiciones de almacenamiento apropiadas deben ser consideradas y evaluadas, especialmente las que afectan a la sanidad y a la calidad del grano, tales como el contenido de humedad, temperatura y tiempo de almacenamiento. Por lo tanto, es importante considerar estos parámetros durante la implementación buenas prácticas de manejo para minimizar el desarrollo de hongos micotoxigénicos durante el almacenamiento. De esta manera se evitarán riesgos para la salud humana y de los animales ocasionados por el consumo de alimentos contaminados.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer a Enrique Behr y Diego Croce por su ayuda en la recolección de las muestras de grano de los silo bolsas. Así como también agradecen al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, a través del proyecto INTA - PRECOP: Eficiencia de poscosecha y a la Universidad de Mar del Plata, a través del proyecto A - 15 - 297, por el apoyo financiero de este estudio.

Referencias

- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled

Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.

- Christensen C.M. 1987. Field and storage fungi, pp. 211 - 232. En: Beuchat L.R. (Ed.) Food and Beverage Mycology. Van Nostrand Reinhold, Nueva York, EE.UU.
- Gerlach W.; Nirenberg H. 1982. The Genus *Fusarium* - a Pictorial Atlas. Arno Brynda GmbH, Berlín, 406 p.
- Giorni P.; Battilani P. y Magan N. 2009. Effect of solute and matric potential on in vitro growth and sporulation of strains from a new population of *Aspergillus flavus* isolated in Italy. *Fungal Ecology*, 1: 101 - 106.
- Hell K.; Cardwell K.F.; Setamou M. y Poehling H.M. 2000. The influence of storage practices on aflatoxin contamination in maize in four agro - ecological zones of Benin west Africa. *Journal of Stored Products Research*, 36: 365 - 382.
- Lacey J. 1989. Pre - and post - harvest ecology of fungi causing spoilage of foods and other stored products. *Journal of Applied Bacteriology Symposium Supplement*, 11S - 25S.
- Lerda D.; Biaggi Bistoni M.; Peralta N.; Ychari S.; Vazquez M. y Bosio G. 2005. Fumonisin in foods from Córdoba (Argentina), presence and genotoxicity. *Food and Chemical Toxicology*, 43: 691 - 698.
- Lino C.M.; Silva L.J.; Pena A.; Fernández M. y Mañes J. 2007. Occurrence of fumonisins B1 and B2 in broa, typical Portuguese maize bread. *International Journal of Food Microbiology*, 118: 79 - 82.
- Logrieco A.; Moretti G.; Perrone G. y Mule G. 2007. Biodiversity of complexes of mycotoxigenic fungal species associated with *Fusarium* ear rot of maize and *Aspergillus* rot of grape. *International Journal of Food Microbiology*, 119: 11 - 16.
- Moreno Cunha E.; Tironi García G.; Ono M.A.; Vizoni E.; Kawamura O.; Hirooka E.Y. y Sataque Ono E.Y.; 2009. Co-occurrence of mycotoxins in corn samples from the Northern region of Paraná State, Brazil. *Food Chemistry*, 116: 220 - 226.
- Nelson P.E.; Toussoun T.A. y Marasas W.F.O. 1983. *Fusarium* species. An Illustrated manual of Identification; The Pennsylvania State University Press : University Park, PA, EE.UU.
- Pacin A.M.; Bovier E.C.; González H.L.; Whitechurch E.M.; Martínez E.J. y Resnik S. 2009. Fungal and fumonisins contamination in Argentine maize (Zea mays L.) silo bags. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57: 2778 - 2781.
- Pitt J. y Hocking A.D. 1997. Fungi and food spoilage. Blackie Academic & Professional, Londres, Reino Unido de Gran Bretaña.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Cardoso L. y Croce D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 589 - 592. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Samson R.A.; Hoekstra E.S.; Frisvad J.C. y Filtenborg O. 1995. Introduction to food - borne fungi. 4th edition Centra al bureau voor Schimmelcultures, Baarn, Holanda.
- Voss K.A.; Smith G.W. y Haschek W.M. 2007. Fumonisin: toxicokinetics, mechanism of action and toxicity. *Animal Feed Science and Technology*, 137: 299 - 325.

Relación entre incidencia de *Fusarium verticillioides* y variables de calidad de grano bajo condiciones de almacenamiento de maíz en Tucumán, Argentina

Cecilia Díaz¹
Ricardo Rodríguez²
Catalina Aguaysol¹
Julián Juárez¹
Pablo Saleme²
Leopoldo Ploper¹

Resumen

Las oportunidades de comercializar con éxito los granos de maíz dependen de factores que interfieren durante el manejo de pre y poscosecha. Es importante conocer la incidencia de patógenos con potencial toxigénico y los niveles de concentración de micotoxinas que tienen las partidas comerciales almacenadas en silo bolsas. Por ende, se propusieron los siguientes objetivos: evaluar la incidencia de *Fusarium* spp. sección *Liseola* con potencial toxigénico en granos almacenados; establecer la relación entre niveles de incidencia y variables de calidad comercial; y cuantificar los niveles de contaminación de fumonisinas de los diferentes silo bolsas. Los resultados mostraron que la especie *Fusarium verticillioides* predominó en condiciones de almacenamiento. Su incidencia promedio, según el silo bolsa, varió entre 15,0% y 17,0%. Dos de las 6 variables regresoras: grano quebrado y humedad, fueron importantes para explicar la variabilidad de la incidencia de *F. verticillioides* en los granos almacenados. Los valores promedio de fumonisinas en los silo bolsas variaron entre 0,01 ppm y 7,4 ppm. Se rescató, además, que existe una relación lineal entre incidencia de *F. verticillioides* y los valores de fumonisinas, a pesar de un ajuste no tan alto ($R^2 = 0,6$). Este trabajo aportó información para nuestra región sobre la predominancia de una especie de *Fusarium* de la sección *Liseola*, con alto potencial en producir fumonisinas, como es *F. verticillioides* en los granos almacenados. También se informa sobre el nivel de contaminación de los granos almacenados y sobre la importancia de la ruptura de la integridad del grano en la colonización de dicho patógeno.

Palabras clave: *Zea mays*, fumonisinas, *Fusarium verticillioides*, granos de maíz almacenado en silo bolsa.

¹Cátedra de Fitopatología, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán (Tucumán) Argentina.

²EEA INTA Famaillá (Tucumán) Argentina.

Introducción

Las enfermedades de poscosecha son aquellas que se desarrollan durante la cosecha y durante la selección, almacenamiento, empaque y transporte; es decir, durante las distintas operaciones que se requieren para llevar la cosecha del productor al consumidor (Agrios, 1991). La colonización por parte de patógenos causantes de estas enfermedades dependerá del manejo cultural, de la pérdida de integridad del producto cosechado, y de factores como la temperatura y humedad en las condiciones de almacenamiento. En el caso de los cultivos para producción de grano, la mayor importancia de estos patógenos radica en la producción de micotoxinas y la consecuente contaminación de los granos cosechados.

Muchas de las enfermedades de poscosecha de granos de maíz (*Zea mays* L.) son el resultado de infecciones incipientes de las plantas por patógenos que se encuentran ya en el campo. Los síntomas de dichas infecciones de campo pueden ser tan inconspicuos que pasan inadvertidos durante la cosecha. Entre las especies de hongos productores de podredumbre de la mazorca en campo se encuentran: *Stenocarpella maydis* (*Diplodia maydis*), *S. macrospora* (*Diplodia macrospora*), *Fusarium verticillioides*, *F. subglutinans*, *F. graminearum*, *F. sporotrichioides* y *Gibberella zeae*. Ocasionalmente, en condiciones de campo se presentan *Penicillium oxalicum*, *Aspergillus flavus* y *A. parasiticus*. Los síntomas y signos más comunes en granos infectados en almacenaje incluyen la decoloración del embrión, el oscurecimiento de los granos y el olor a enmohecido.

Existen factores bióticos y abióticos que contribuyen a aumentar la incidencia y severidad de las infecciones por hongos en el campo y en condiciones de almacenamiento, que alteran la integridad física del grano. Entre los factores bióticos se puede mencionar las plagas insectiles y las aves. La presencia de plagas expone al grano a la colonización fúngica de *Aspergillus* y *Penicillium*. Por su parte, los factores abióticos que más contribuyen al aumento en la incidencia de la flora fúngica y su composición son la temperatura y la humedad. La ocurrencia de estrés térmico, posterior a la polinización, induce la aparición de fenómenos como “*silk - cut*” y “*popped kernel*”, que exponen el embrión y el endosperma a la colonización de especies de los géneros *Fusarium*, *Aspergillus* y *Penicillium*. Asimismo, durante el proceso de cosecha los daños mecánicos producidos por las máquinas favorecen la colonización de hongos tanto en el campo como en el almacenamiento.

Los hongos toxigénicos son muy adaptables y se desarrollan en cualquier planta en crecimiento o en alimentos almacenados. Crecen sobre maíz, trigo, soja, sorgo, maní, ensilados, heno y otros alimentos en diversas condiciones. Por lo tanto, la contaminación de alimentos con micotoxinas está considerada un proceso aditivo, que comienza en el campo y que continúa durante la cosecha, el secado de granos y el almacenamiento de los productos del agro (Council for Agricultural Science and Technology, 2003).

Los daños ocasionados por las enfermedades de poscosecha en granos producen pérdidas directas en calidad y cantidad, además de la contaminación de los granos por sustancias tóxicas. Dichas pérdidas ocurren principalmente en los grandes depósitos, lo cual se refleja en los precios y en los descuentos sobre el valor de la mercadería recibida por los acopiadores. La disminución de su cantidad y calidad afecta directamente la disponibilidad de alimentos, así como la posibilidad de contar con excedentes comercializables que permitan el ingreso de recursos económicos al productor y al país. En este sentido,

evaluar la presencia de especies de *Fusarium* sección Liseola sobre un producto comercial con alto valor agregado, representa un aspecto sumamente relevante. Asimismo, conocer los niveles de contaminación de los silos e identificar la relación que existe entre variables de calidad de grano e incidencia de patógenos toxigénicos, representa un aspecto necesario a evaluar para minimizar las pérdidas ocasionadas por estos patógenos.

Los objetivos del presente trabajo fueron determinar la incidencia de *Fusarium* spp. sección Liseola con potencial toxigénico en granos de maíz provenientes de silo bolsas; establecer la relación entre niveles de incidencia y variables de calidad comercial que contribuyan a la infección de los granos; y cuantificar los niveles de contaminación de fumonisinias a partir de las muestras mencionadas.

Materiales y métodos

Las muestras de granos de maíz se recolectaron durante la cosecha 2009 - 2010 (Tucumán, Argentina), a partir de 6 bolsas de polietileno (silo bolsas), de las cuales se extrajeron 6 muestras por bolsa. Para la extracción de las mismas se utilizó un calador de 1,7 m de longitud introducido de manera diagonal, de arriba hacia abajo, desinfectando el interior del mismo con alcohol 60° (60,0% alcohol / agua) entre cada recolección. El peso de cada muestra fue de aproximadamente 0,8 kg a 1,0 kg. Las muestras tuvieron como destino el análisis comercial, por parte de la empresa acopiadora y receptora de los maíces de la región NOA en la provincia de Tucumán, donde se evaluaron variables de calidad del grano al inicio (17 - 09 - 2010) y al final del ensayo (19 - 01 - 2011).

Dentro de las normas de calidad para la comercialización del maíz (Norma XII), se estipulan las variables a analizar para determinar la calidad del grano. Este proceso se realiza generalmente en el laboratorio de calidad de granos de la empresa acopiadora, y en este caso, se evaluaron las siguientes variables: cantidad de grano dañado (%), cantidad de grano quebrado (%), de materias extrañas (%) y humedad de almacenaje (%).

Los datos de las variables de calidad de granos: grano dañado, grano quebrado, materias extrañas y humedad de almacenaje se usaron para explicar la variabilidad de la incidencia de *F. verticillioides*. Para ello se realizó una matriz de gráficos de dispersión bivariado entre la variable respuesta (incidencia de *F. verticillioides*) y las relacionadas con la calidad de los granos (variables regresoras).

La identificación y cuantificación de granos colonizados por *Fusarium verticillioides* y otras especies de la sección Liseola se desarrolló en el Laboratorio de Fitopatología de la Cátedra de Fitopatología, Facultad de Agronomía y Zootecnia, UNT, situado en Finca El Manantial, Tucumán. A partir de las muestras de maíz recolectadas en los silos (0,8 kg - 1,0 kg), se determinó el porcentaje de semillas colonizadas con *Fusarium* spp. (sección Liseola) mediante la prueba de patología de semillas. Para esto se desinfectaron los granos mediante inmersión en hipoclorito de sodio (2,0%) por 5 minutos. Los granos fueron luego lavados 2 veces en agua destilada estéril y posteriormente colocados en cajas tipo “gerbox” que contenían papel de filtro humedecido con agar - agua (5,0%) (300 semillas por repetición y por muestra, a razón de 25 por caja). El diseño experimental fue completamente al azar con 3 repeticiones. Las cajas “gerbox” fueron mantenidas por 24 horas en freezer a una temperatura de -5,0 °C para evitar la germinación de las semillas. Posterior-

mente, las mismas fueron llevadas a cámara de incubación ajustada a temperatura de 24,0 °C y fotoperíodo de 12 horas. Luego de 12 días se procedió a la identificación de los patógenos. La determinación de las especies de *Fusarium* sección Liseola, fue realizada mediante claves de identificación de Leslie (2006).

La determinación de fumonisinas: a partir de cada punto de muestreo se obtuvo una fracción de granos de maíz molido y se determinó la concentración de fumonisinas mediante el método de ELISA (Ridascreen® FastFumonisin, R - Biopharm AG, Darmstadt, Germany).

Los valores de incidencia de especies de *Fusarium* se correlacionaron con los de las variables de calidad del grano: grano dañado, grano quebrado, materia extraña y humedad de almacenaje, a través de una regresión lineal múltiple de tipo *Stepwise forward*, con la incidencia como variable dependiente y las otras como variables predictoras o independientes. Con este método, las variables independientes son retenidas en el modelo de acuerdo a su contribución estadística en explicar la varianza en la variable dependiente.

Resultados y discusión

Especies de *Fusarium* en granos de maíz almacenados

Entre las especies de *Fusarium* sección Liseola presentes en los silo bolsas analizados, predominó *F. verticillioides* (90,0%). Esto concuerda con los resultados de Díaz et al. (2012) sobre la composición de la población de *Fusarium* sección Liseola en las zonas productoras de maíz de la región Noroeste de Argentina. Como lo reportaron Marin et al. (1998), en el cinturón maicero de Estados Unidos, *F. verticillioides* y *F. proliferatum* son dominantes sobre otras especies, como *F. subglutinans* y *F. graminearum* que comúnmente contaminan al maíz en el campo, sobre un amplio rango de temperatura y agua disponible.

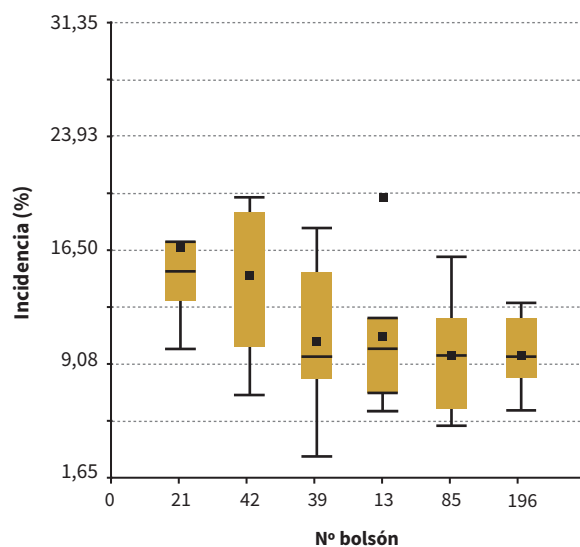
Estos patógenos ingresan y colonizan el grano de maíz durante la fase de polinización y periodos posteriores. En el norte argentino, Torres et al., realizaron en 2001 una caracterización de las especies de *Fusarium* (sección Liseola) asociadas a granos de maíz almacenado, encontrando que la especie más prevalente correspondía a *F. subglutinans*, seguida por *F. verticillioides*. También Aguaysol et al. (2012) encontraron que *Fusarium verticillioides* fue el patógeno prevalente en 5 de las 6 localidades para diferentes híbridos en la campaña 2011 - 2012.

Incidencia de *F. verticillioides* en silo bolsas

Los valores promedio de incidencia de *F. verticillioides*, variaron entre 9,7% y 16,7%. Las bolsas 21 y 42 presentaron los mayores porcentajes de incidencia con 17,0% y 15,0%, respectivamente, hecho que se observa en la Figura 1. Considerando que los niveles de incidencia dependen de la procedencia del lote, de la característica del híbrido, del genotipo, de la presión de plagas y aves, de la temperatura y humedad, y que no existía trazabilidad de estos silo bolsas analizados, no es posible sacar mayores conclusiones sobre las diferencias en los niveles de infección encontrados.

Figura 1.

Diagrama de cajas de Incidencia (%) de *F. verticillioides* en los 6 silo bolsas (o bolsón).



Relación entre la incidencia de *Fusarium* y variables de calidad de grano

En la Figura 2 se muestran las relaciones entre las variables de calidad del grano y la incidencia del patógeno. Las variables grano quebrado y humedad resultaron ser las que registraron una mayor correlación con la incidencia. Los resultados de la regresión lineal múltiple de tipo *Stepwise* se muestran en la Tabla 1. De las 5 variables incluidas originalmente, solo 2 resultaron significativas como variables predictoras de la incidencia de *F. verticillioides* dentro del modelo, y por lo tanto, quedaron retenidas; estas fueron: grano quebrado y humedad. Esto queda demostrado por los altos valores de CpMallows que indican la importancia de estas regresoras en explicar la variabilidad de la incidencia de *Fusarium*.

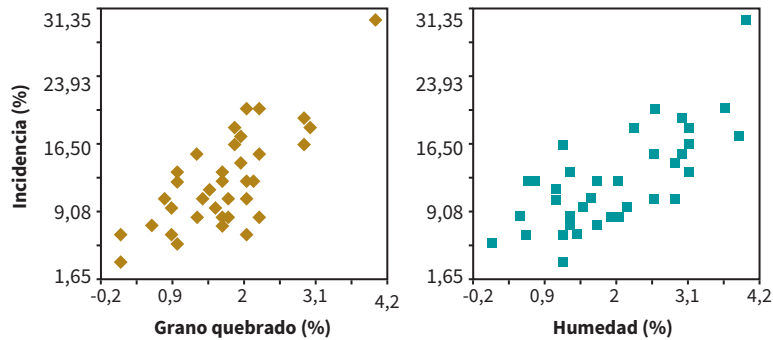
Como lo indican los resultados de varias investigaciones (Díaz, 2012; Juárez y Díaz, 2011), cualquier daño físico que altere la integridad del grano, bajo condiciones de campo, tiene una marcada influencia sobre el establecimiento del patógeno en estudio. Por ejemplo, Juárez y Díaz (2011) establecieron una relación positiva significativa entre daño por insectos lepidópteros y aves, y la severidad de *F. verticillioides* ($R^2 = 0,6$) en el NOA. Generalmente, estos hongos no invaden los granos a través del pericarpio no dañado, pero sí cuando ocurren daños físicos o heridas a través de las chalas (Reis et al., 2004). Asimismo, Sampietro et al. (2009 y 2012), estudiando los mecanismos de defensa del grano de maíz, observaron que las ceras epicuticulares y fenilpropanoides pericarpelares juegan un rol importante en los mecanismos de defensa, y que aquellos granos que presentan algún daño mecánico en el pericarpio de la semilla ven disminuidos los mecanismos de defensa, lo cual se evidencia en un aumento considerable de los niveles de fumonisinas.

La humedad fue la otra variable retenida dentro del modelo y formó parte del conjunto de factores que favoreció el establecimiento de patógenos de almacenamiento. La hu-

medad de grano y la humedad relativa del aire en la masa de granos afectan la estructura de la comunidad de patógenos en poscosecha, como ocurre con los géneros *Aspergillus* y *Penicillium* (Reis et al., 2004). Esto indica que el tenor de humedad de los granos determinará el grupo de hongos a desarrollarse; por ejemplo, los hongos de almacenamiento crecen mejor con humedad de grano por debajo del 18,0% (Reis et al., 2004).

Figura 2.

Diagrama de dispersión de Incidencia de *Fusarium verticillioides* y variables de calidad de grano.



◆ Relación entre incidencia y grano quebrado
 ■ Relación entre incidencia y humedad

Tabla 1.

Coefficientes de regresión lineal múltiple, selección Stepwise para la variable incidencia de *Fusarium*.

COEFICIENTES	ESTIMACIÓN	E. E.	T	P - VALOR	CPMALLOW'S
Constante	-38,5	8,3	-4,6	< 0,0001	-
Grano quebrado	3,6	0,6	4,9	< 0,0001	33,2
Contenido de humedad	2,8	0,6	4,0	< 0,0001	27,4

E.E.: Error estándar; Error cuadrático medio = 7,7.

Contaminación con micotoxinas: fumonisinas

Los valores promedio de fumonisinas en los silo bolsas variaron entre 1,4 ppm y 3,6 ppm (Tabla 2). La contaminación con micotoxinas puede ocurrir en el campo, donde hay niveles favorables de humedad ambiental y de la espiga y el grano, los cuales favorecen el desarrollo de *Fusarium* spp. o durante el almacenamiento o procesamiento de los granos, donde se favorece mayormente el desarrollo de *Aspergillus* y *Penicillium* spp. Asimismo, los niveles de contaminación con micotoxinas dependen de la localidad de siembra, del genotipo sembrado, de las condiciones de manejo en pre y poscosecha, de las condiciones ambientales de la campaña y de la población del patógeno (Iglesias, 2009). El rol ecológico de las micotoxinas ha sido objeto de mucha especulación, en particular su posible rol en la patogénesis

del hospedante (Desjardins y Hohn, 1997). Algunas evidencias apuntan hacia el rol de las fumonisinas en los procesos de infección de *F. verticilloides* y *F. proliferatum*. Algunos autores establecieron una relación entre diferentes niveles de severidad y la capacidad de producir fumonisinas (Presello, 2007). De acuerdo con Desjardins et al. (1995), la virulencia de aislamientos de *F. verticilloides* se cosegregaron con la producción de fumonisinas.

Tabla 2.

Intervalo de confianza, con nivel de significación de 0,05, del promedio de ppm de fumonisinas según N° de silo bolsas.

N° SILO BOLSA	PROMEDIO (PPM)	E.E.	LI (95,0%)	LS (95,0%)
13	2,8	0,8	0,6	4,9
21	3,6	1,2	0,5	6,8
39	2,1	0,9	-0,1	4,3
42	2,4	0,6	1,0	3,8
85	2,8	0,7	0,9	4,6
196	1,4	0,4	0,5	2,3

E.E.: Error estándar. Li: Límite inferior; Ls: Límite superior. Nivel de confianza = 95,0%.

El maíz de Argentina puede estar contaminado con micotoxinas de *Fusarium spp.* (fumonisinas, deoxinivalenol (DON) y zearalenona (ZEA)) y en menor proporción con aflatoxinas y ocratoxina A (OTA) de *Aspergillus spp.* y *Penicillium spp.* A través de numerosos estudios (por métodos convencionales) se encontraron niveles no detectables de DON, ZEA, aflatoxinas y OTA. Sin embargo, las fumonisinas fueron los principales contaminantes del maíz, con valores de concentración por encima de 1,0 ppm (Ramírez et al., 1996; Sydenham et al., 1993; Solovey et al., 1999; Chulze et al., 1996 y 1998; Visconti et al., 1996). La primera cita sobre contaminación de granos de maíz almacenados en el norte argentino se hizo en 2001 (Torres et al. 2001), mencionándose un rango de fumonisinas entre 603 ppb y 1888 ppb ($\mu\text{g kg}^{-1}$) (equivalentes a 0,6 ppm y 1,9 ppm). Los resultados obtenidos en este trabajo están por encima de los valores reportados por Torres et al. (2001), indicando que los niveles de contaminación son elevados. Si a esto se suma el hecho que las especies fúngicas están presentes, y que es posible que se presenten condiciones favorables por mal acondicionamiento de los silos para el desarrollo del patógeno, la comercialización o utilización directa de los granos puede verse aún más comprometida.

Si se considera que la Food and Drug Administration (FDA) de EE.UU. recomienda niveles de tolerancia en maíz para consumo humano entre 2,0 ppm y 4,0 ppm para fumonisinas, es posible decir que estos niveles se encuentran todavía por debajo de los exigidos. Sin embargo, no debe menospreciarse que estos valores pueden verse incrementados, por lo que se recomienda un monitoreo permanente. En este sentido, Iglesias (2009) resalta que en la actualidad no se conocen con exactitud los niveles de concentración de micotoxinas que tienen nuestras partidas comerciales, debido a la falta de implementación de un monitoreo sistemático de las mismas. Tampoco existen manuales de buenas prácticas agrícolas y de manufactura que orienten la producción de maíz libre de toxinas.

Es así como actualmente el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) se encuentra trabajando en un proyecto conjunto que agrupa a la actividad pública y privada con el fin de generar información sobre estos aspectos.

Por último, este estudio evidenció una relación lineal positiva y significativa entre la incidencia de *Fusarium* y los valores de fumonisinas (Figura 3 y Tabla 3), aun cuando el ajuste no fue alto ($R^2 = 0,6$).

Figura 3.

Relación entre incidencia (%) de *Fusarium verticillioides* y cantidad de Fumonisinas (PPM) en bolsas de polietileno (silo bolsas), Tucumán, 2010.

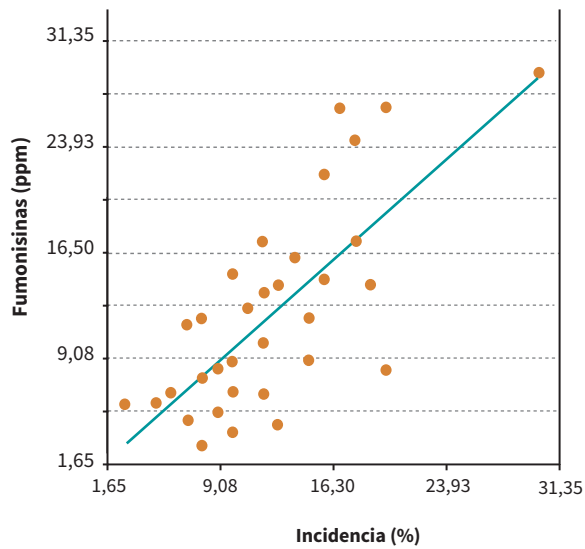


Tabla 3.

Análisis de la varianza de la regresión lineal entre la cantidad de fumonisinas (variable dependiente) e incidencia (variable regresora).

FUENTE DE VARIACIÓN	SC	GL	CM	F	P - VALOR
Modelo	75,3	1	75,3	44,4	< 0,0001
Incidencia	75,3	1	75,3	44,4	< 0,0001
Error	57,7	34	1,7		
Total	133,0	35			

Conclusiones

Estudios como el presente, aportan valiosa información sobre:

- La predominancia de una especie de *Fusarium* de la sección Liseola con alto potencial en producir fumonisinas, como es el caso de *Fusarium verticillioides*.

- El alto nivel de contaminación de los granos almacenados nos pone en alerta, dado que pueden variar en función de los niveles de infección de *F. verticillioides* obtenidos en condiciones de campo, según el híbrido de maíz, año, variables climáticas y presencia de plagas.
- La importancia de la ruptura de la integridad del grano en favorecer la colonización de *F. verticillioides*, aumentando el riesgo de contaminación de los granos por fumonisinas.
- La importancia de conocer estos aspectos para el diseño de estrategias que minimicen el impacto de estos patógenos y su consecuente contaminación por micotoxina.
- La importancia de recordar que el 85,0% de las micotoxinas se originan en el campo, por lo que muchas de las soluciones se deben brindar allí.

Referencias

- Agrios G.N. 1991. Fitopatología. 2^{da} ed. Editorial Limusa, México, 838 p.
- Aguaysol N.C.; González V.; De Lisi V.; Reznikov S.; Stegmayer C.A.; Henríquez D. y Ploper L.D. 2012. Incidencia de *Fusarium verticillioides* y *Fusarium graminearum* en granos de híbridos comerciales de maíz cosechados en la campaña 2011/2012 en 6 localidades de las provincias de Tucumán y Salta. En: El Maíz en el NOA. Campaña 2011/2012. Publicación Especial de la Estación Experimental.
- Agro - Industrial "O. Colombres". 2003 Council for Agricultural Science and Technology. The Science source of food, Agricultural and Environmental Issues. Disponible en: <http://www.cast-science.org>. Accedido en octubre del 2008.
- Chulze S.; Ramirez M.L.; Farnochi M.; Pascale M.; Visconti A. y March G. 1996. Fusarium and fumonisins occurrence in Argentinean maize at different ear maturity stages. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 44: 2797 - 2801.
- Chulze S.N.; Ramirez M.L.; Pascale M. y Visconti A. 1998. Fumonisin production by and mating populations of Fusarium section Liseola isolates from maize in Argentina. *Mycological Research*, 102: 141 - 144.
- Díaz C.G.; Heredia A.M.; Iglesias J.; Presello D.A. y Lori G.A. 2012. Caracterización patogénica de especies de Gibberella fujikuroi, habilidad en producir fumonisinas y su correlación con daño del grano de maíz en la región del Noroeste Argentino. *Tropical Plant Pathology*, Sociedade Brasileira de Fitopatología. (En prensa).
- Desjardins A.E.; Plattner R.D.; Nelsen T. y Leslie J. 1995. Genetic analysis of fumonisin production and virulence of Gibberella fujikuroi mating population A (*Fusarium moniliforme*) on maize (*Zea mays*) seedlings. *Applied and Environmental Microbiology*, 61: 79 - 86.
- Desjardins A.E. y Hohn T.M. 1997. Mycotoxins in plant pathogenesis. MPMI. *The American Phytopathological Society* 10(2): 147 - 152.
- Iglesias J.; Presello D.A.; Fauguel C.M. y Botta G.L. 2009. Micotoxinas: ¿debemos preocuparnos? Disponible en: <http://pergamino.inta.gov.ar>. Accedido en noviembre del 2010.

- Juárez J.H. y Díaz C.G. 2011. Contaminación de maíz por Fumonisinias producidas por *Fusarium verticilloides*. En: XXVIII Jornadas Científicas Tucumán, 26 - 28 de octubre. Tafi del Valle, Tucumán, Argentina, 19 p.
- Leslie J.F. y Summerell B.A. 2006. The fusarium laboratory manual. Sydney Blackwell, 388 p.
- Marin S.; Companys E.; Sanchis V. y Ramos A.J. 1998. Effect of water activity and temperature on competing abilities of common maize fungi. *Mycological Research*, 120: 959 - 964.
- Presello D.A.; Iglesias J.; Botta G. y Eyherabide G.H. 2007. Severity of Fusarium ear rot and concentration of fumonisin in grain of Argentinian maize hybrids. *Crop Protection*, 26: 852 - 855.
- Ramírez M.L.; Pascale M.; Chulze S.N.; Reynoso M.M.; March G y Visconti A. 1996. Natural occurrence of fumonisins and their correlation to Fusarium contamination in commercial corn hybrids grown in Argentina. *Mycopathologia*, 135: 29 - 34.
- Reis M.E.; Casa Trezzi R. y Reis Bresolin A.C. 2004. Manual de diagnose e controle de doenças do milho. 2nd Ed., Editora lages Ltda., Brasil, 144 p.
- Sampietro D.A.; Vattuone M.A.; Presello D.A.; Fauguel C.M. y Catalán C.A. 2009. The pericarp and its surface wax layer in maize kernels as resistance factors to fumonisin accumulation by *Fusarium verticillioides*. *Crop Protection*, 28: 196 - 200.
- Sampietro D.A.; Vattuone M.A.; Presello D.A.; Fauguel C.M. y Catalán C.A. 2012. Phenylpropanoids from maize pericarp: resistance factors to kernel infection and fumonisin accumulation by *Fusarium verticillioides*. *European Journal of Plant Pathology* (En prensa).
- Sydenham E.W.; Shephard G.S.; Thiel P.G.; Marasas W.F.O.; Rheeder J.P.; Peralta Sanhueza C.E.; González H.H.L. y Resnik S.L. 1993. Fumonisin in Argentinian field - trial corn. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41: 891 - 895.
- Solovey M.M.; Somoza C.; Cano G. y Resnik S. 1999. A survey of fumonisins, deoxynivalenol, zearalenone and aflatoxins contamination in corn - based food products in Argentina. *Food Additives and Contaminants*, 16(8): 325 - 329.
- Torres A.M.; Reynoso M.M.; Rojo F.G.; Ramirez M.L. y Chulze S.N. 2001. Fusarium species (section Liseola) and its mycotoxins in maize harvested in northern Argentina. *Food Additives and Contaminants*, 18: 836 - 843.

5

Hermeticidad y uso de fumigantes

Publicado en: Cardoso L.; Bartosik R.; Campabadal C. y de La Torre D. 2012. Air-tightness level in hermetic plastic bags (silo - bags) for different storage conditions, pp. 583 - 589. En: Proc. of 9th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 15 - 19 de octubre, Antalya, Turquía.

Nivel de hermeticidad en silo bolsas para diferentes condiciones de almacenamiento

Leandro Cardoso¹
Ricardo Bartosik¹
Carlos Campabadal²
Diego de La Torre¹

Resumen

El silo bolsa es un sistema de almacenamiento hermético usado en más de 50 países. Alcanzar y mantener un nivel alto de hermeticidad es un factor clave para el éxito de una buena conservación del grano.

La hermeticidad del silo bolsa puede ser afectada por un inapropiado cierre en el extremo de la bolsa y perforaciones en el plástico. Los diferentes ítems que definen la hermeticidad del silo bolsa, como las técnicas de cierre, las prácticas de manejo y sus efectos en el nivel de hermeticidad, deben ser estudiados para realizar recomendaciones referidas al uso apropiado del sistema de silo bolsa.

El objetivo de este estudio fue realizar el test de caída de presión (TCP) para determinar el nivel inicial de hermeticidad del silo bolsa y su evolución luego de 4 meses de almacenamiento.

El TCP fue realizado en 23 silo bolsas comerciales al inicio del almacenaje (se almacenaron aproximadamente 200,0 toneladas de grano en cada uno) y fue repetido en 13 de esas bolsas luego de 4 meses de almacenamiento. Además del TCP, las condiciones del terreno (p. ej., si el silo bolsa se encontraba sobre suelo mejorado o sobre suelo con residuos de cosecha), el sistema de cierre y la presencia de roturas fueron registrados al principio y luego de 4 meses de almacenamiento.

En general, una baja proporción de silo bolsas (menos de 35,0%) alcanzó una buena performance con el TCP. En el 75,0% de las bolsas el tiempo de caída de presión hasta la mitad disminuyó luego de 4 meses de almacenamiento. Las buenas

¹INTA EEA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

²Programa Internacional de Granos, Universidad Estatal de Kansas, Manhattan, KS, EE.UU.

técnicas de cierre (especialmente termosellado), una buena preparación del suelo y un correcto cuidado del silo bolsa se correlacionaron con un alto nivel de hermeticidad. La inspección ocular no es suficiente para determinar el nivel de hermeticidad del silo bolsa, por lo que se recomienda realizar un TCP antes de una fumigación, un tratamiento de atmósfera controlada o de atmósfera modificada.

Palabras clave: atmósfera modificada, atmósfera controlada, aplicación de fumigantes, test de caída de presión, sistema de cierre, roturas.

Introducción

El silo bolsa es un sistema de almacenamiento hermético usado por más de 50 países. En Argentina fueron almacenadas 40,0 millones de toneladas de granos en silo bolsas en el 2011 (Bartosik, 2012). La mayor parte de los granos almacenados pertenece a los productores agrícolas. Sin embargo, la industria comercial de granos y los acopios han mostrado un creciente interés en este sistema de almacenamiento. En el año 2006, solo un 20,0% de granos fue almacenado en silo bolsas por acopios (Vicini, 2006), pero esa proporción se ha incrementado notablemente desde ese año.

Cada silo bolsa mide 60,0 metros de largo y 2,7 metros de diámetro, con una cubierta de plástico tricapa (color blanco por fuera y negro por dentro de la bolsa) de 235 μm de espesor (Cardoso et. al., 2008), y tiene una capacidad aproximada de almacenamiento de 200,0 toneladas de trigo y 180,0 toneladas de soja o maíz.

La hermeticidad creada por el plástico del silo bolsa previene la reposición normal de oxígeno (O_2), gas usado durante la respiración aeróbica de los componentes bióticos del granel (hongos, insectos y granos). El plástico también permite la retención de dióxido de carbono (CO_2), gas subproducto generado durante el proceso de respiración (Cardoso et. al., 2008). Esta modificación atmosférica trae aparejada beneficios desde el punto de vista de la conservación del grano.

Por lo tanto, alcanzar y mantener un nivel adecuado de hermeticidad es un factor clave para el éxito del almacenamiento. De hecho, alcanzar un alto nivel de hermeticidad es crítico para una aplicación efectiva de atmósferas modificadas, atmósferas controladas (Navarro, 1998) y control de actividad biológica (Darby y Caddick, 2007).

La hermeticidad del silo bolsa puede ser negativamente afectada por un cierre inapropiado en el extremo de la bolsa y por perforaciones en la cubierta de plástico (Cardoso et. al., 2010; Bartosik, 2012). Los diferentes ítems que definen la hermeticidad del silo bolsa, como las técnicas de cierre, las prácticas de manejo y sus efectos en el nivel de hermeticidad, deben ser estudiados para realizar recomendaciones referidas al uso apropiado del sistema de silo bolsa.

El uso de la prueba de presión constante (o test de caída de presión; TCP) es citado por Navarro (1998) como una metodología válida para determinar el nivel de hermeticidad de una estructura de almacenamiento. Darby y Caddick (2007) indican que el TCP es relativamente simple y fácil de implementar.

El objetivo de este estudio fue realizar el test de caída de presión a campo para determinar el nivel inicial de hermeticidad en los silo bolsas y su evolución luego de 4 meses de almacenamiento.

Materiales y métodos

Los experimentos fueron realizados en diferentes campos y acopios de la zona productiva de Balcarce (provincia de Buenos Aires, Argentina) y de Manhattan (Kansas, EE.UU.). El TCP fue realizado en 23 silo bolsas (con aproximadamente 200,0 toneladas de grano cada una) al inicio del almacenamiento y fue repetido en 13 de ellas luego de 4 meses.

El procedimiento para realizar el TCP consiste en generar 1200 Pa de presión negativa (-1200 Pa) en el silo bolsa. Un tubo de PVC de 5,0 cm de diámetro y 1,6 m de largo fue insertado en el silo bolsa, cerca del centro (Figura 1). El extremo del tubo fue cerrado para evitar la entrada del grano al mismo, pero tenía pequeñas perforaciones para permitir el paso del aire en el tubo. El otro extremo del tubo estaba conectado a un generador de vacío por medio de una manguera flexible de similar diámetro. Entre el tubo de PVC perforado y la manguera flexible se instaló una válvula de cerrado de PVC. El punto de inserción del tubo en el silo bolsa se selló con cinta y sellador siliconado.

El generador de vacío utilizado en Balcarce fue un ventilador centrífugo (Chicago Blower, 0,3 HP); y en Manhattan se usó una bomba de vacío (General Electric, 0,5 HP).

El generador de vacío se encendió hasta generar -1200 Pa, medido con un manómetro digital (Sper Scientific, China) y un manómetro de columna de agua. La válvula fue cerrada a -1200 Pa, o cuando se alcanzó una presión negativa constante a valores menores a -1200, luego de 10 min de funcionamiento. Luego de cerrada la válvula se registraron tiempos parciales de caída de presión (cada 100 Pa) hasta que la presión cayó a -100 Pa. Las condiciones del suelo (p. ej., ubicación de la bolsa en suelo mejorado o ubicada sobre residuos de la cosecha previa), el sistema de cierre y la presencia de roturas fueron registradas al momento del embolsado y cada 15 días durante el almacenamiento.



Figura 3.
Instrumental usado para realizar el TCP en un silo bolsa de Balcarce.

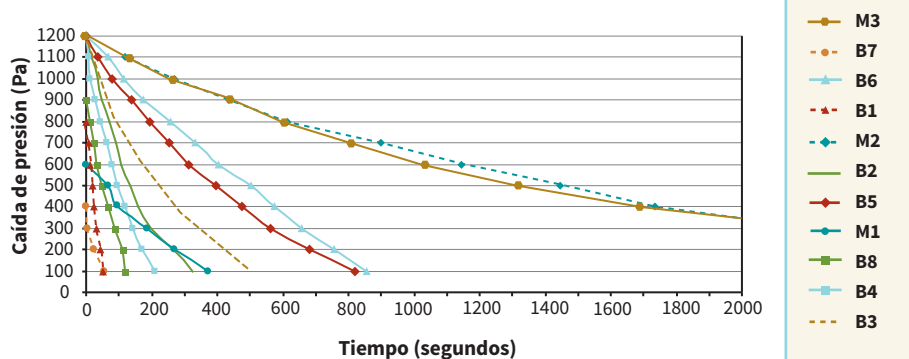
A través de la observación se realizaron 2 clasificaciones respecto a como cada silo bolsa fue cerrado: 1) buen sistema de cierre (BSC) ó 2) pobre sistema de cierre (PSC). También, por observación, se establecieron 2 condiciones de terreno en relación al riesgo de rotura del silo bolsa: 1) bajo riesgo de rotura (BRR) ó 2) moderado - alto riesgo de rotura (ARR).

Resultados y discusión

La Figura 2 muestra silo bolsas en buenas sistema de cierre (BSC) y bajo riesgo de rotura (BRR) al comienzo del almacenamiento. Excepto por B8, todos los silo bolsas en la Figura 2 estaban ubicados en centros de acopio de grano. Los silo bolsas con pobre sistema de cierre (PSC) y/o problemas en la cubierta de plástico (ARR), presentados en la Figura 3, estaban ubicados en establecimientos rurales (campos). Una de las razones para que las condiciones en los acopios sean mejores es que normalmente cada año se usa el mismo lugar para ubicar los silo bolsas, lo que permite condiciones mejores del terreno (nivelado, limpieza, etc.), así como otras prácticas que favorecen la hermeticidad de los silo bolsas. Además, durante el llenado del silo bolsa, el operador normalmente dispone de mejores herramientas para cerrar la bolsa (p. ej., tablas de cerrado o termosellado). Por otra parte, cuando el llenado de las bolsas se realiza en los campos durante la cosecha, los silo bolsas usualmente se ubican sobre suelos con residuos de la cosecha previa (algunas veces se puede triturar el rastrojo, como en B8 y B16) o sobre suelos con riesgo de anegamiento. Adicionalmente, la tarea del cierre del silo bolsa puede ser implementada sin el cuidado adecuado. Dado que la cosecha y llenado de las bolsas ocurren simultáneamente en los campos, esto resulta en una mayor improvisación sobre la ubicación y cierre de las bolsas que en los acopios.

Figura 2.

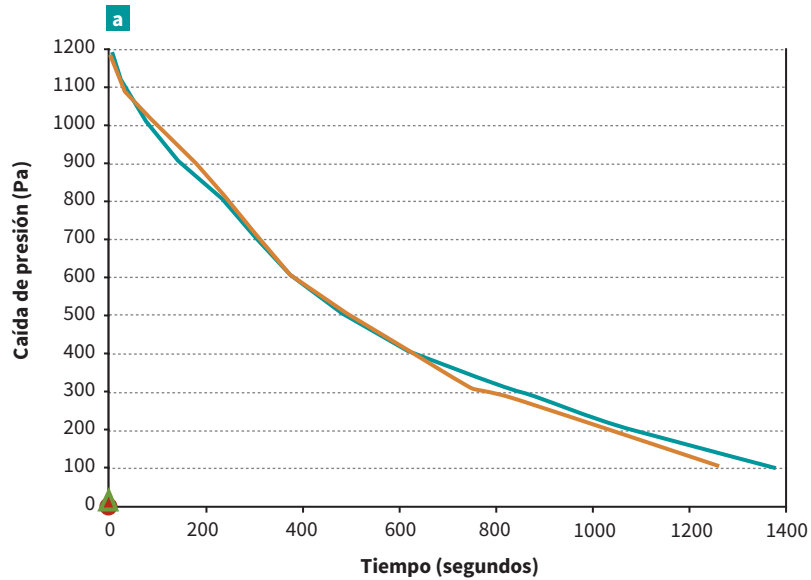
Caída de presión (Pa) en el tiempo (segundos) para silo bolsas (M = Manhattan, B = Balcarce) con buen sistema de cierre y bajo riesgo de roturas al comienzo del almacenamiento.



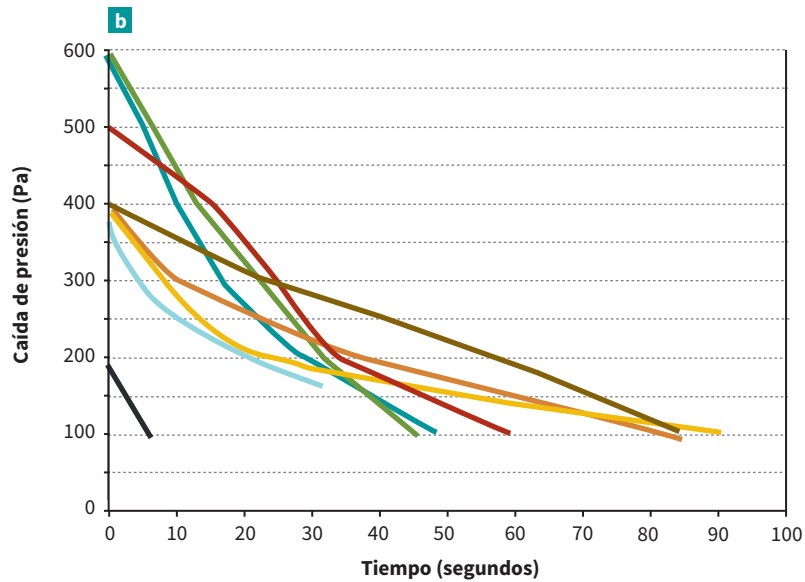
Las Figuras 2 y 3 muestran que aproximadamente el 43,0% de los silo bolsas estudiados alcanzan -1200 Pa durante el TCP; el 63,0% de los silo bolsas que alcanzaron -1200 Pa fueron en condiciones de BSC y BRR (Figura 2). Esto indica claramente el efecto positivo que las buenas técnicas de cierre, las condiciones propicias del suelo y el mantenimiento de la estructura física del silo bolsa tienen sobre el nivel de hermeticidad del silo bolsa.

Figura 3.

Caída de presión (Pa) a través del tiempo (segundos) para silo bolsas (M: Manhattan, B: Balcarce) con moderado - alto riesgo de rotura, buen sistema de cierre (a) o pobre sistema de cierre (b).



M4 M5 M6 M7



B9 B10 B11 B12
B13 B14 B15 B16

Darby y Caddick (2007) realizaron un TCP en silo bolsas, con un rango de caída de presión hasta la mitad (CPM) de -1200 Pa a -600 Pa, indicando que una CPM de 5 min implica un alto nivel de hermeticidad, una CPM de 3 min a 5 min permite una fumigación exitosa, y una CPM de menos de 3 min indica un pobre nivel de hermeticidad. La Figura 2 muestra

que 4 de 11 silo bolsas (36,0%) del presente estudio calificadas con BSC y BRR, tuvieron una CPM (-1200 Pa a -600 Pa) igual o mayor a 5 min (4 bolsas mantuvieron -600 Pa luego de 5 min), y 5 de 11 silo bolsas (45,0%) tuvieron una CPM de aproximadamente 3 min o mayor (5 bolsas mantuvieron -600 Pa luego de 3 min). El resto de los silo bolsas en estas condiciones no alcanzaron el tiempo de CPM requerido para realizar una fumigación exitosa. Darby y Caddick (2007) informaron que los silo bolsas recientemente instalados, sin evidencia visible de daño o cierre deficiente, han tenido un TCP insuficiente. Esto se debió a perforaciones en la parte inferior del silo bolsa durante la operación de embolsado. El mismo hecho se observó en el presente trabajo.

La Figura 3 (b) muestra que ningún silo bolsa calificado como PSC alcanzó -1200 Pa. Esto indica que un buen sistema de cierre es crítico para alcanzar altos niveles de hermeticidad. La Figura 3 (a) muestra que, por una parte, el 50,0% de los silo bolsas con BSC alcanzaron un TCP de 5 min o más, indicando que un buen BSC está relacionado con un alto nivel de hermeticidad. Por otra parte, en la otra mitad de las bolsas no se logró alcanzar los -100 Pa mientras funcionaba el generador de vacío.

Navarro (1998) propuso presiones menores, realizando TCP con CPM de -250 Pa a -125 Pa. Su recomendación de CPM fue que estructuras flexibles de menos de 500,0 m³ (un silo bolsa posee 260,0 - 270,0 m³) requiere un mínimo de 1 min 30 s para la aplicación eficiente de fumigantes, 3 min para sistemas de atmósferas controladas y 5 min para sistemas de atmósferas modificadas, incluyendo al almacenamiento hermético. De acuerdo a estos umbrales de CPM, 3 de 23 (13,0%) silo bolsas califican como sistema hermético de almacenamiento (se usó una CPM desde -200 Pa a -100 Pa). El 17,0% de silo bolsas podrían ser usados para atmósferas controladas (CPM mayor a 3 min), y 8 silo bolsas (35,0%) podrían ser usados para fumigación exitosa (CPM mayor a 1 min 30 s). Esto implica que las típicas condiciones de almacenamiento en silo bolsas tienen restricciones en el uso de fumigantes y, más aún, en atmósferas modificadas y controladas. Sin embargo, existen antecedentes de fumigaciones exitosas (Cardoso et. al., 2009; Ridley et. al., 2011) e incluso la implementación de atmósferas controladas en silo bolsas (Milanesio, 2010) en establecimientos rurales cuando las condiciones de BSC y BRR son alcanzadas.

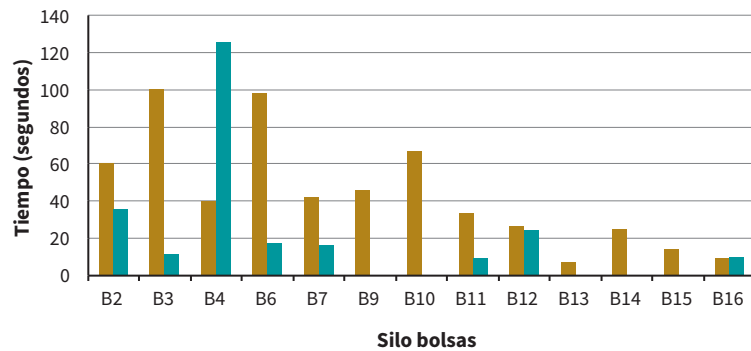
El rango de la caída de presión considerado para computar el TCP puede causar diferencias en la caracterización del nivel de hermeticidad de los silo bolsas. Por ejemplo, en el silo bolsa B5 (Figura 2) el TCP fue de 5 min 23 s cuando fue considerado un rango de CPM de -1200 Pa a -600 Pa, y de 2 min 20 s para un rango de CPM de -200 Pa a -100 Pa. En general, cuando se usa un rango menor de caída de presión, el tiempo de CPM es menor. La variación del tiempo de CPM de acuerdo con el rango de presión es más significativa en aquellas bolsas con alta hermeticidad. Una sobre o subestimación del nivel de hermeticidad del silo bolsa puede ser efectuada de acuerdo al rango de la prueba de CPM implementado.

La Figura 4 muestra que en un 75,0% de los silo bolsas, el tiempo de CPM, y por consiguiente la hermeticidad, disminuyen luego de 4 meses de almacenamiento (el estudio solo incluye los silo bolsas de Balcarce). Algunos silo bolsas no pudieron alcanzar el objetivo de una presión de -200 Pa. Darby y Caddick (2007) reportaron que mantener la hermeticidad en los silo bolsas requiere continuo mantenimiento. En la mayoría de los casos, la pérdida de hermeticidad estuvo relacionada con roturas en la cubierta de plástico causadas por animales (zorros, perros, pájaros roedores, etc.). Estos problemas son

más comunes en los campos que en los acopios. El uso de cercos eléctricos para mantener a los animales alejados de los silo bolsas fue una solución adecuada. En algunos silo bolsas, la CPM disminuyó sustancialmente, pero no se observaron evidencias de daños en las bolsas. Sorprendentemente, la hermeticidad de un silo bolsa al finalizar el almacenamiento fue mayor que al comienzo del mismo. Esto se explica por desarrollo de vegetación debajo del silo bolsa que selló las roturas en la parte inferior de la bolsa, incrementando la hermeticidad.

Figura 4.

Tiempo (segundos) de la caída de presión hasta la mitad (desde -200 Pa a -100 Pa) para 13 silo bolsas al inicio y al final del ensayo.



■ Inicio del ensayo ■ Fin del ensayo

Dado que la inspección ocular no es satisfactoria para determinar la hermeticidad de un silo bolsa, se recomienda que el TCP se realice antes de una fumigación o tratamiento de atmósfera controlada o modificada.

Los resultados de la Figura 5 indican que cualquier fumigación, tratamiento de atmósfera controlada o modificada tendrá más éxito al principio del almacenamiento que luego de varios meses. Dado que la cubierta de plástico del silo bolsa previene la entrada de insectos, una vez que la bolsa fue tratada, deberían esperarse pocas chances de una doble infestación.

Conclusiones

Un test de caída de presión fue realizado en varios silo bolsas, y los resultados se relacionan con la calidad del cierre y de la condición de la cubierta de plástico.

El test de caída de presión fue simple y su implementación no fue problemática, ni a nivel de campo ni en acopios.

En general, una baja proporción de silo bolsas alcanzó un buen tiempo inicial de CPM (menos del 35,0%); en el 75,0% de las bolsas el tiempo de CPM disminuyó luego de 4 meses de almacenamiento.

Una buen cierre (especialmente termosellado), buena preparación del suelo y buen cuidado del silo bolsa en general conllevan a un alto nivel de hermeticidad.

El rango de presión al cual la prueba de CPM es realizado afectó el resultado del TCP.

La fumigación, los tratamientos de atmósferas controladas o modificadas tendrán más chances de ser exitosos al principio del almacenamiento que luego de varios meses.

Dado que la inspección ocular no es satisfactoria para determinar el nivel de hermeticidad de un silo bolsa, se recomienda realizar una prueba de TCP antes de una fumigación o tratamientos de atmósferas controladas o modificadas.

Referencias

- Bartosik R. 2012. El grano que mejor se almacena está seco, frío y limpio. Red Agroactiva. Disponible en: <http://www.cadena3.com/contenido/2012/01/05/72226.asp>. Accedido el 24 de mayo del 2012.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Cardoso L.; Bartosik R. y Milanesio D. 2009. Phosphine concentration change during fumigation in hermetic plastic bags (silo - bags). En: Proceedings of the International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. Conference, Technology and Management to Increase the Efficiency in Sustainable Agricultural Systems, 1 - 4 septiembre, Rosario, Argentina.
- Cardoso M.L; Bartosik R.E. y Rodriguez J.C. 2010. Manejo y monitoreo de granos en silo bolsa. Diario El Quintal. Disponible en: http://www.silcheck.com/blog/uploads/Silcheck_en_el_Quintal.pdf. Accedido el 20 de mayo de 2012.
- Darby J.A. y Caddick L.P. 2007. Review of grain harvest bag. CSIRO technical report. Disponible en: <http://www.csiro.au>. Accedido en enero del 2010.
- Milanesio D. 2010. Inyección de dióxido de carbono para el control de insectos en bolsas plásticas. Tesis de grado FCA, UNMdP, Balcarce, 52 p.
- Navarro S. 1998. Pressure test for gaseous applications in sealed storages: Theory and practice, pp. 385 - 390. En: Zuxum J.; Quan L.; Yongsheng L.; Xianchang T. y Lianghua G. (Eds.), Proc. 7th International Working Conference of Stored - Product Protection, 14 - 19 de octubre, Chengdu, China.
- Ridley A.W.; Burrill P.R.; Cook C.C. y Dalglish, G.J. 2011. Phosphine fumigation of silo bags. *Journal of Stored Products Research*, 47: 349 - 356.
- Vicini L. 2006. El silo bolsa en acopios de granos. Disponible en: www.cosechay-postcosecha.org. Accedido en julio del 2009.

Fumigación de silo bolsas con fosfina

Leandro Cardoso¹
Ricardo Bartosik¹
David Milanesio²

Resumen

En el año 2008 fueron almacenadas más de 33,0 millones de toneladas de grano en bolsas de plástico herméticas, llamadas silo bolsas. En general, cuando el grano recientemente cosechado se almacena en silo bolsas a campo, no se reportan problemas de infestación de insectos. Sin embargo, cuando la bolsa se llena con el grano procedente de otras instalaciones de acopio (silos y celdas), se observa a menudo un cierto grado de infestación de insectos. Cuando el grano infestado tiene bajo contenido de humedad, la velocidad de respiración es baja y también lo es el aumento de CO₂ en el silo bolsa. Bajo estas circunstancias, el efecto de la atmósfera modificada no produce control sobre la actividad de los insectos. El objetivo de este experimento fue desarrollar y probar una metodología adecuada para el control de insectos con fosfina durante el almacenamiento de granos en silo bolsa. La fumigación debe garantizar una concentración de 200 ppm de fosfina durante al menos 5 días. Se utilizaron 2 silo bolsas, con aproximadamente 200,0 toneladas de trigo seco cada uno, y un tercer silo bolsa se utilizó como testigo. El primer tratamiento consistió en la dosificación de 1 pastilla de fosforo de aluminio por metro cúbico (3,0 g/m³ de fosforo de aluminio o 1,0 g/m³ de fosfina) y el segundo tratamiento duplicó la dosis. Las pastillas de fosforo se aplicaron cada 5,0 m lineales a lo largo de la bolsa. Además, en diferentes lugares del silo bolsa se insertaron celdas que contenían insectos vivos (*Sitophilus oryzae*). La concentración de fosfina se midió diariamente en diferentes lugares del silo bolsa durante 10 días. Después del tratamiento, las celdas con los insectos fueron inspeccionados y se registró la mortalidad de los insectos.

Los principales resultados indicaron que el tratamiento con la concentración de fosfina más baja (1,0 g/m³) fue suficiente para alcanzar la concentración objetivo durante 5 días en la mayor parte del silo bolsa. El área cercana al cierre de la bolsa resultó con una concentración de fosfina más baja que la deseada, lo que indicó una falta de hermeticidad en ese sector. Las zonas más próximas a los puntos de aplicación de las pastillas de fosforo de aluminio resultaron con concentraciones

¹INTA EEA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

²Alumno Facultad de Ciencias Agrarias Balcarce, UNMDP (Buenos Aires), Argentina.

de fosfina más altas que otras áreas. Sin embargo, el espaciamiento de los puntos de aplicación cada 5,0 m lo largo del silo bolsa resultó en una distribución eficiente del gas. La mortalidad de los insectos fue del 100,0% en ambos tratamientos, mientras que la mortalidad del control fue de entre 13,0% y 33,0%.

Palabras clave: fosforo de aluminio, seguimiento, control de insectos, de almacenamiento, de grano.

Introducción

El silo bolsa es un sistema de almacenaje temporario, ampliamente utilizado en Argentina para el almacenaje de diversos granos (trigo, soja, maíz, girasol, etc.). La evolución de la cantidad de grano almacenado en los silos bolsas indicó un rápido aumento desde el año 2000 (5,0 millones de toneladas) al 2005 (21,4 millones de toneladas), registrándose en la campaña 2007/2008 un máximo de 40,0 millones de toneladas (Casini, 2008).

Gran parte del grano que se almacena en silos bolsas pertenecen a los productores agrícolas. Sin embargo, los acopios e industria, que hace unos años almacenaban un 20,0% de su stock en silo bolsa, últimamente aumentaron vertiginosamente el acopio bajo este sistema (Vicini, 2006).

Fuentes de infestación de insectos plaga de granos almacenados en silos bolsas

Los productores generalmente almacenan el grano recientemente cosechado y la bolsa se ubica en el mismo establecimiento, por lo que el manipuleo del grano hasta el almacenaje es mínimo.

Algunos estudios indican que, en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), no se detectó la presencia de insectos plagas en cultivos de maíz y trigo. Al mismo tiempo, estudios realizados en silos bolsas de soja (Ochandio, 2008) y trigo (PRE-COP, no publicado), ubicadas en establecimientos rurales del sudeste de Buenos Aires, no detectaron la presencia de insectos plaga de granos almacenados. En cambio, investigaciones conducidas en la región centro - norte del país, donde se registra una mayor temperatura promedio anual, reportan la presencia de insectos plaga de granos almacenados en las últimas etapas del cultivo de trigo y maíz. Subramanyam y Hags-trum (1995) observaron que la infestación de insectos proveniente del cultivo suele ser baja, pero aumenta en función de la cercanía de acopios al lote del cultivo. Los insectos plaga presentes en los acopios reinfestan los cultivos cercanos aumentando la población de insectos. Los acopios y la industria suelen embolsar granos que reciben durante la época de cosecha. También es común que destinen al silo bolsa granos previamente almacenados en estructuras de almacenamiento tradicionales (silos y celdas) por un periodo más o menos prolongado de tiempo. En estas circunstancias, los granos tienen más probabilidades de ingresar infestados con insectos durante el almacenamiento. Por otro lado, cuando el grano se almacena en silos bolsas, es poco probable que ocurra una infestación de insectos durante el almacenamiento, ya que la bolsa es una barrera física efectiva para prevenir la infestación (Cardoso et al., 2007).

Efecto de las condiciones de almacenamiento de silo bolsa sobre la mortalidad de insectos

Numerosos autores (Rodríguez et al., 2005; Casini, 2009; Bartosik et al., 2008) citan al silo bolsa como un sistema de atmósfera modificada, donde los niveles de oxígeno (O_2) del aire intergranario son en parte consumidos por la respiración aerobia de los microorganismos, grano e insectos, aumentando como consecuencia la concentración de dióxido de carbono (CO_2). Bartosik et al. (2008) proponen que los niveles de O_2 y CO_2 presentes en el silo bolsa dependerán de un equilibrio entre la actividad respiratoria del granel (consumo de O_2 y generación de CO_2), la entrada de O_2 en la bolsa y la pérdida de CO_2 intersticial hacia el exterior, debido a la permeabilidad propia del plástico y a perforaciones producidas en el mismo.

El efecto letal sobre los insectos de una severa hipoxia ($O_2 < 21,0\%$), anoxia o hipercarbia ($CO_2 > 0,03\%$) está ampliamente probado (Bailey, 1965; Banks y Field, 1995). Sin embargo, el efecto combinado de una atmósfera con bajo O_2 y enriquecida con CO_2 (hipoxia e hipercarbia, respectivamente), como la obtenida en el silo bolsa, sigue siendo controversial. Annis y Morton (1996) indican que existe un efecto antagónico entre una baja concentración de O_2 y una elevada concentración de CO_2 , con una reducción en la mortalidad de los insectos a medida que la concentración de CO_2 aumenta. Sin embargo, la hipótesis más aceptada sostiene que existe un efecto sinérgico cuando se añade CO_2 a un entorno que posee una baja cantidad de O_2 (Calderón y Navarro, 1980; Donahaye et al., 1996). Aparentemente, este efecto podría ocurrir a niveles moderados de CO_2 (5,0% - 15,0%), pero no con mayores concentraciones de este gas (Mitcham et al., 2006).

Las investigaciones realizadas en Argentina acerca del control de insectos en silo bolsa se focalizaron principalmente en *Sitophilus oryzae*, considerada una plaga de gran importancia y una de las más tolerantes a la toxicidad de CO_2 (Annis, 1987; Bartosik et al., 2001). Los experimentos con maíz (Casini et al., 2009; Rodríguez et al., 2002 a, b), trigo, girasol (Rodríguez et al., 2002 c) y soja (Rodríguez et al., 2002 d) determinaron que un cambio moderado en la atmósfera intersticial ($CO_2 < 10,0\%$ y $O_2 > 10,0\%$) por lo general permite la supervivencia de los insectos adultos entre 60 y 80 días. Cuando se crea una atmósfera rica en CO_2 (al menos 15,0%) y una baja cantidad de O_2 ($< 5,0\%$) permite un control completo de los insectos adultos en menos de 1 mes de almacenaje. Sin embargo, un cambio severo en la atmósfera intersticial se asoció con una disminución de los parámetros de calidad del grano (poder germinativo, peso hectolítrico en trigo, acidificación del aceite en girasol, etc.) causada por una actividad biológica intensa, en particular de los hongos. Es por ello que las buenas prácticas de almacenamiento están diseñadas para minimizar el cambio en la atmósfera dentro del silo bolsa (por ejemplo, almacenamiento con humedad del grano por debajo de la tolerancia para comercialización), relegando así el efecto deletéreo una atmósfera modificada sobre los insectos. Además de la composición de la atmósfera en el interior del silo bolsa, la temperatura del grano en la estación fría del año puede ser una limitante para el desarrollo de los insectos. La temperatura media del grano en el silo bolsa varía de acuerdo con la temperatura media mensual (Bartosik et al., 2009). Esto significa que con temperatura ambiente templada o fría, la temperatura del grano puede ser inferior a 15,0 °C (Cardoso et al., 2009). En estas condiciones, el desarrollo de los insectos es lento (Burgess y Burrell, 1964) o nulo (Banks y Fields, 1995). Sin embargo, la baja temperatura no es suficiente para lograr una

mortalidad completa. Por otra parte, a partir de mediados de la primavera, durante el verano y la primera mitad del otoño, la temperatura del grano no sería un obstáculo para el desarrollo de los insectos.

Alternativas para el control de insectos en silo bolsas

Basado en lo anterior, hay determinadas situaciones en la cual los insectos pueden sobrevivir en el silo bolsa: cuando son embolsados junto con el grano (por lo general cuando el grano proviene de otras estructuras de almacenamiento y, en menor medida, los insectos que vienen con el grano desde el campo) y las condiciones del almacenamiento no son restrictivas (insuficiente modificación de la atmósfera intersticial, almacenamiento durante periodos cortos de tiempo en la época cálida del año). Mientras que el daño directo causado por los insectos en el grano puede resultar insignificante en el silo bolsa, la presencia de insectos vivos es una limitante para la comercialización del grano. De acuerdo con las normas de comercialización de granos en Argentina, cada partida de grano que contenga insectos vivos debe ser rechazada para su comercialización (FAO, 2009). Darby y Caddick (2007) señalan que el silo bolsa, debidamente llenado y cuidado, puede alcanzar un alto nivel de hermeticidad. Sobre esta base, el uso de fumigantes como la fosfina puede ser una alternativa adecuada para el control de insectos en silo bolsas. Considerado como uno de los mejores fumigantes en la actualidad (Cao y Wan, 2001), la fosfina tiene bajo costo, es fácil de usar, no deja residuos (Collins et al., 2001) y no afecta la germinación de semillas (Bond, 2007). Este fumigante se comercializa formulado como fosfuro de aluminio o magnesio, en forma de pastillas o tabletas que se distribuyen en el grano. El fosfuro reacciona con agua del aire para producir un gas fumigante, la fosfina. El número de días requeridos para la gasificación y control depende de la temperatura, la humedad, la marca fumigante (Banks, 1991), especie y población de insectos (Anon, 1998; Darglish et al., 2002). Es un veneno de acción lenta que es eficaz en concentraciones muy bajas, si el tiempo de exposición es suficiente. Por lo general, un mínimo de 4 o más días de exposición son necesarios para el control de insectos (Bond, 2007). Navarro y Noyes (2002) citan que es necesario que la concentración de gas se deba mantener por encima de 150 - 200 ppm durante 120 horas para lograr un efecto letal en todas las especies y estadios de insectos plaga.

Objetivo general

Determinar una metodología racional de fumigación con fosfina para el control de insectos en granos almacenados en silo bolsas herméticos.

Objetivos específicos

Determinar la cantidad de pastillas de fosfina adecuadas para lograr una concentración efectiva del gas que logre el control de huevos (200 ppm) durante todo el tiempo de exposición recomendado (5 días).

Determinar una metodología adecuada de colocación de las pastillas en la masa de granos para llegar a la concentración efectiva del gas de manera rápida y uniforme en la totalidad del silo bolsa.

Estudiar la dinámica de la concentración del gas fumigante durante el tratamiento (tiempo que se tarda en lograr la concentración adecuada, y como ésta va decayendo en el tiempo).

Determinar el nivel de control de insectos (mortalidad).

Materiales y métodos

El ensayo se realizó en el establecimiento “El Monerío” ubicado en la ruta 226,0 sobre el km 97,0 en el partido de Balcarce, durante el mes de febrero de 2007.

Para la realización de este ensayo se seleccionaron 3 silo bolsas, con 200,0 toneladas cada uno, de trigo cosechado durante diciembre de 2006 y con similares contenidos de humedad (entre 12,8% y 13,4%). Se utilizaron 2 silo bolsas para los tratamientos de fumigación (3,0 g/m³ de fosfuro de aluminio y 6,0 g/m³ de fosfuro de aluminio), mientras que el tercero se utilizó como testigo.

Cálculo de la dosis de aplicación

Teniendo en cuenta un peso hectolítrico del grano de 750,0 kg/m³, el volumen total estimado de cada silo bolsa fue de 266 m³ (200,0 toneladas/ 0,75 toneladas/m³).

Silo bolsa A (menor dosis) =

1 pastilla /m³ (3,0 g/m³ de fosfuro de aluminio o 1,0 g/m³ de fosfina)

Cantidad total de pastillas = 266 (798,0 g).

Silo bolsa B (mayor dosis) =

2 pastillas/m³ (6,0 g/m³ de fosfuro de aluminio o 2,0 g/m³ de fosfina)

Cantidad total de pastillas = 532 (1596,0 g).

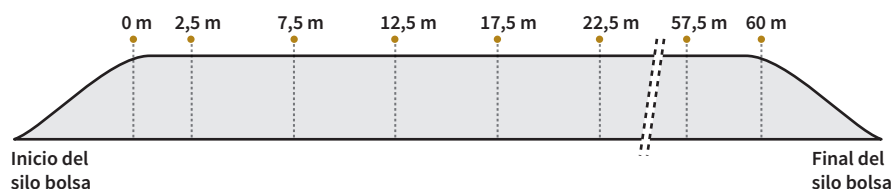
Metodología de aplicación

Se decidió realizar una aplicación cada 5,0 m lineales de silo bolsa, poniendo en cada aplicación la cantidad correspondiente de pastillas para el volumen de grano que representa dicha distancia. La longitud total de la bolsa fue de 60,0 m, por lo que se determinaron 12 puntos de aplicación en la extensión total de la bolsa (12 puntos * 5,0 m/punto = 60,0 m). Se midieron 2,5 m desde el extremo del silo bolsa para establecer el primer punto de aplicación. A partir de allí, se midieron 5,0 m para determinar la posición del segundo punto de aplicación, y así sucesivamente hasta llegar al otro extremo de la bolsa (Figura 1).

Figura 1.

DETALLE DE LOS PUNTOS DE COLOCACIÓN DE LAS PASTILLAS DE FOSFINA EN SILO BOLSA DE TRIGO

12 puntos de aplicación cada 5 m



La dosis a aplicar en cada punto de medición fue calculada como sigue:

Silo bolsa A (menor dosis) = 266 pastillas en 60,0 m

Cantidad de pastillas por punto de aplicación =

266 pastillas/12 puntos de aplicación = 22 pastillas/punto de aplicación

Silo bolsa B (mayor dosis) = 532 pastillas en 60,0 m

Cantidad de pastillas por punto de aplicación =

532 pastillas/12 puntos aplicación = 44 pastillas/punto de aplicación

Las pastillas se insertaron dentro del silo bolsa por medio de un tubo plástico de 4,0 cm de diámetro. Luego de realizar un corte vertical de aproximadamente 6,0 cm sobre la pared lateral del silo bolsa, se introdujo el tubo plástico en forma diagonal hacia el centro de la masa de granos, hasta hacer contacto con el piso del silo bolsa (tomando la precaución de no sobrepasar el límite para no perforar la bolsa). Luego de insertar el tubo plástico se introdujeron en el mismo las pastillas de fosfina. En cada punto de aplicación se tomó la precaución de distribuir las pastillas en el perfil de la masa de granos. En caso de aplicar todas las pastillas agrupadas, en contacto entre ellas, durante la gasificación podría producirse una reacción exotérmica violenta. Esto se evitó al ir retirando paulatinamente el tubo plástico, mientras se dejada caer algunas pocas pastillas a través del mismo (aproximadamente 5 pastillas), permitiendo que cada grupo de pastillas quede cubierto con grano. También se controló que las pastillas no queden en contacto con la superficie de la bolsa, para evitar daños en el plástico durante la gasificación.

Medición de la concentración del fumigante

La medición de la concentración del gas se realizó con una bomba manual y ampollas de vidrio con material sensible a la presencia del gas fumigante, el cual cambia de color (de blanco a marrón oscuro) en una escala graduada (Figura 2). La medición se realizó con frecuencia diaria desde el momento de la aplicación hasta que la concentración del gas cayó por debajo 150 ppm.



Figura 2.
Medición de fosfina en silo bolsa por medio de tubo colorimétrico.

El éxito del tratamiento con fosfina de la bolsa depende de lograr mantener la concentración deseada (200 ppm) durante el tiempo de exposición mínimo (5 días) en toda la masa de granos. Para un silo bolsa sano, es decir sin roturas de importancia en su superficie, la zona más crítica sería el area cercana al cierre de la bolsa. Este sector es el menos confiable respecto del mantenimiento de la concentración del gas, debido a que en algunos casos las tareas del cierre y sellado de la bolsa son deficientes. El otro extremo, el comienzo de la bolsa, presenta por lo general menores pro-

blemas para mantener la hermeticidad, ya que el cierre queda aprisionado por la misma masa de granos. La medición del gas se realizó en el lado opuesto del silo bolsa a donde realizó la aplicación. De esta forma, los puntos de medición se establecieron en la zona del silo bolsa donde más tiempo demora en difundir el gas (Figura 3).

Figura 3.

VISTA LATERAL Y EN SUPERFICIE DE LOS PUNTOS DE APLICACIÓN DE LAS PASTILLAS DE FOSFURO Y LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE FOSFINA EN LOS SILO BOLSAS

a Vista lateral

b Vista en superficie



La medición de la concentración se realizó en 4 lugares diferentes de cada bolsa tratada:

1. Cerca del extremo del cierre de la bolsa.
2. Entre los 2 primeros puntos de aplicación (cerca del extremo de cierre de la bolsa).
3. A la altura de uno de los puntos de aplicación.
4. En el extremo del cierre de la bolsa.

En simultáneo con las mediciones de concentración de fosfina se realizaron mediciones diarias de la concentración de CO₂ y de la temperatura de la masa de granos.

Mortalidad de los insectos

Para evaluar el efecto de la concentración de fosfina lograda sobre los insectos se introdujeron en los silo bolsas celdas con insectos vivos. Luego de finalizado el ensayo se retiraron las celdas y se contaron los insectos muertos para determinar nivel de mortalidad o control. Para estar seguros que la mortalidad de los insectos fuera atribuida al efecto de la fosfina, y no a la concentración de CO₂, se repitió el mismo experimento en la bolsa testigo.

La semana previa del ensayo se confeccionaron las celdas con insectos vivos. Cada celda fue armada con un tubo plástico de aproximadamente 15,0 cm de longitud. Los extremos del tubo fueron tapados con una malla fina de tul (Figura 4). Los tubos se llenaron con trigo, y en cada uno de ellos se pusieron 10 gorgojos vivos (*Sitophilus oryzae*).

En el interior de un caño de diámetro ligeramente superior fueron colocados 3



Figura 4.

Tubos con rellenos de trigo con 10 insectos vivos.

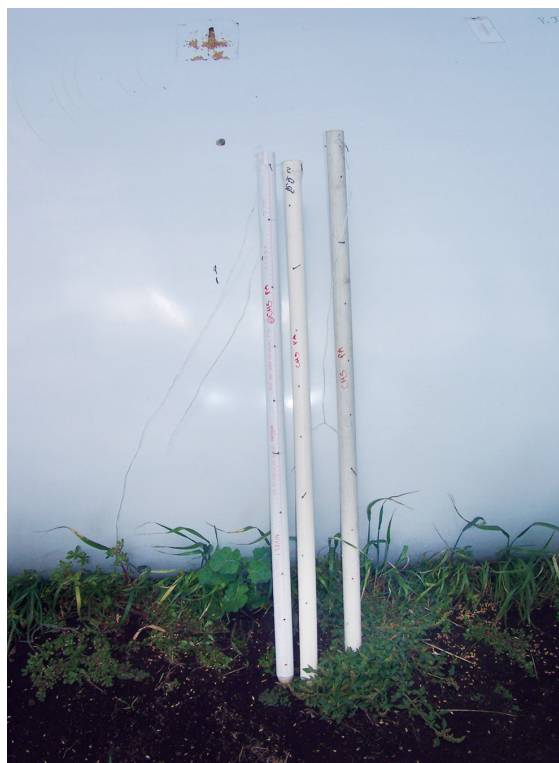


Figura 5. Detalle de los caños que contenían los tubos con insectos en su interior. Se puede observar la perforación de los caños y el corte en el silo bolsa por donde se introdujeron los caños.

de estos tubos (Figura 5). El caño se encontraba totalmente perforado para permitir el intercambio gaseoso con el interior de los tubos que contenían los insectos. Los caños fueron introducidos en los silo bolsas, en los mismos puntos donde se realizó la medición de la concentración de fosfina (Figura 3).

Resultados y discusión

Concentración de fosfina

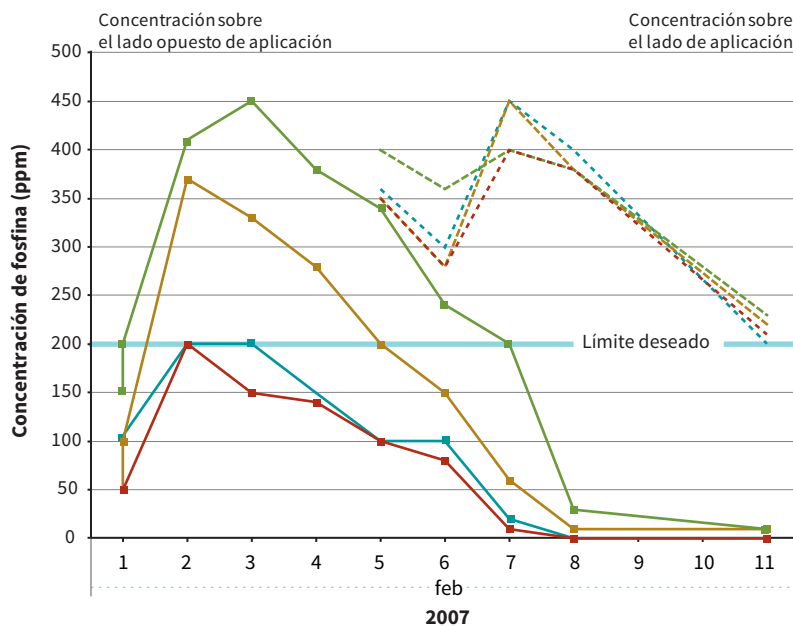
La Figura 6 muestra la concentración de fosfina alcanzada en el silo bolsa tratado con la mayor dosis (6,0 g/m³ de fosfuro de aluminio) desde el inicio del experimento (31 de enero) hasta 10 días después. En general, se pudo observar que el pico de concentración se produjo 1 o 2 días después de la aplicación. Se puede apreciar que la concentración de fosfina medida en el lado opuesto a los puntos de aplicación superó las 200 ppm durante un lapso de 6 días (llegando a un pico de 450 ppm el día 2 de febrero), cuando se midió

frente a uno de los puntos de aplicación. Cuando la medición se realizó entre 2 puntos de aplicación la concentración de fosfina se mantuvo por encima de las 200 ppm solo durante 4 días. La concentración objetivo no se alcanzó cerca del cierre de la bolsa. Las mediciones realizadas demostraron que se llega a las 200 ppm solo por 1 o 2 días, siendo esta combinación de concentración y tiempo de exposición insuficiente para lograr el control de los huevos de insectos. Como era de esperar, la medición de la concentración de fosfina, sobre el mismo lado de la bolsa donde se realizó la aplicación de las pastillas, fue mayor y se mantuvo por encima de las 200 ppm durante un periodo de tiempo más prolongado. En la misma figura (Figura 6) se puede observar que, luego de 7 días de iniciado el experimento, la concentración de fosfina en todos los puntos de medición estaba entre 400 y 450 ppm (aún en las mediciones cercanas al cierre de la bolsa). Al final del periodo de medición (10 de febrero) la concentración de fosfina, medida sobre el lado de aplicación, estaba entre las 200 y 250 ppm.

La Figura 7 muestra el cambio en la concentración de fosfina en la bolsa tratada con la menor dosis (silo bolsa A). En esta figura solo se graficó la concentración medida en el lado opuesto a la aplicación de las pastillas. De manera similar a lo observado en el experimento de mayor dosis, la concentración más alta se registró 3 días después de la aplicación. El punto de medición que registró mayor concentración de fosfina fue el próximo al punto de aplicación, donde se puede apreciar que la concentración se mantuvo por en-

cima de las 200 ppm durante 6 días (del 1 al 7 de febrero). Cuando la medición se efectuó entre 2 puntos de aplicación, la concentración de fosfina alcanzó o estuvo por encima de las 200 ppm durante 5 días (del 1 al 6 de febrero). Al igual que en el experimento de mayor dosis, la concentración de fosfina cerca del cierre del silo bolsa fue sustancialmente menor que en el resto de la bolsa, alcanzando un pico de 150 ppm al tercer día, para luego bajar de las 100 ppm al séptimo día.

Figura 6. Cambio en la concentración de fosfina en los diferentes puntos de medición del silo bolsa a través del tiempo. Tratamiento: 6,0 g de fosforo de aluminio por m³.



Medición sobre el lado opuesto a la aplicación

- 1°-cerca del cierre
- 2°-entre puntos de aplicación
- 3°-en punto de aplicación
- 4°-en el cierre

Medición sobre el mismo lado de aplicación

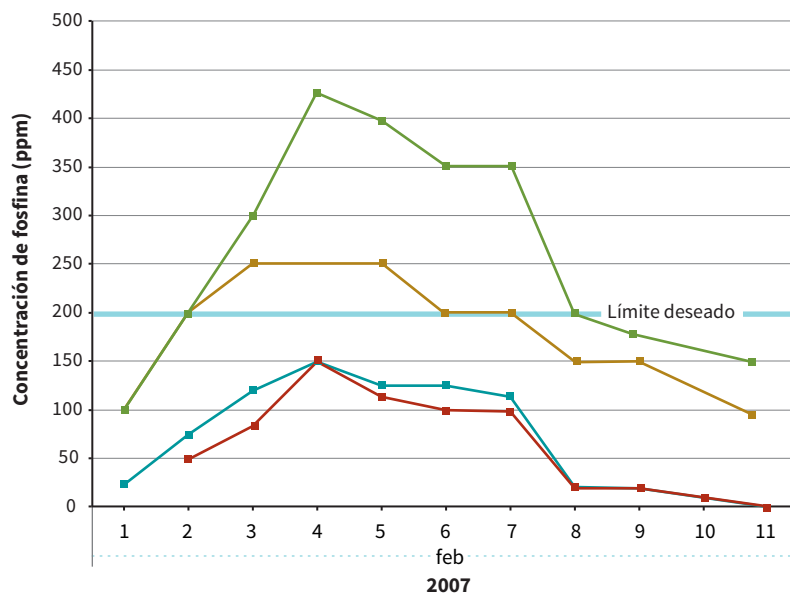
- - 1°-cerca del cierre
- - 2°-entre puntos de aplicación
- - 3°-en punto de aplicación
- - 4°-en el cierre

Concentración de fosfina: 6,0 g / m³

Reed y Pan (2000) estudiaron la dinámica de fosfina en silos metálicos sellados (llenos de trigo y vacíos) y sin hermetizar (lleno de trigo), para diferentes condiciones de humedad y temperatura del grano. Bajo condiciones similares a los evaluados en este ensayo (13,2% de humedad y 25,0 °C), la concentración máxima de fosfina en el silo sellado fue de menos de 70,0% del potencial (o PT = potencial teórico de dosis aplicada de fosfina; 1,0 g/ m³ de fosfina aplicada es igual a 718 ppm), mientras que en el silo sellado sin grano estaba por encima de 90,0%. Esto indica que una proporción significativa de la fosfina es adsorbi-

Figura 7.

Cambio en la concentración de fosfina en los diferentes puntos de medición del silo bolsa a través del tiempo. Tratamiento: 3,0 g de fosforo de aluminio por m³.



Medición sobre el lado opuesto a la aplicación

- 1º-cerca del cierre
- 2º-entre puntos de aplicación
- 3º-en punto de aplicación
- 4º-en el cierre

Concentración de fosfina: 3,0 g / m³

da por el grano. En el silo sin sellar, se alcanzó una concentración de 10,0% a 12,0% del PT. El tratamiento de mayor dosis mostró una evolución del gas similar al silo sellado (máxima concentración de fosfina en 1 - 2 días). Sin embargo, los niveles máximos de fosfina alcanzados son bajos en comparación con el PT, tanto en la medición del punto de aplicación (31,0% de 1436 ppm aplicados (2,0 g/m³)) como entre 2 puntos de aplicación (26,0% de PT), con una disminución continua en los niveles de fosfina en los días subsiguientes. Por otro lado, los niveles máximos de fosfina medidos cerca del final del silo bolsa fueron 14,0% de PT, similar valor que para un silo no hermético. Esto indicó que el cierre de la bolsa utilizada en este tratamiento no tiene un alto nivel de hermeticidad. Esto no solo se evidencia por los bajos niveles de fosfina obtenidos, sino también por la rápida disminución de la concentración del gas.

En el tratamiento de menor dosis, la concentración máxima en el punto de aplicación (60,0% de PT) y, en menor grado entre puntos de aplicación (35,0% de PT), son significativamente mejores. También se observó una mayor hermeticidad en el cierre de la bolsa (20,0% PT). En todos los puntos de medición la tasa de caída de fosfina fue más atenuada en el tiempo. Esto indica que, en general, el Silo bolsa A presentó una mejor hermeticidad que el silo bolsa B.

En la Figura 7 se observa que la liberación de la mayor parte de la fosfina sólo se retrasó unos pocos días. La alta tasa de liberación de fosfina permitió que existan grandes diferencias de concentración a pocos metros de distancia (hay unos 4,0 metros desde el punto de aplicación hasta la distancia media entre los puntos de aplicación, del lado opuesto a la aplicación), produciendo una rápida propagación inicial. Sin embargo, existe una brecha entre el máximo de fosfina (y posterior caída) del punto más alejado de la aplicación (2 días) y el máximo de fosfina (y posterior caída) en el sitio de aplicación fosfina (5 días). Esto sugiere que la duración del tratamiento debería ser al menos 10 días de duración (5 para alcanzar la concentración máxima en todos los sectores y luego 5 días más para exponer una concentración de 200 ppm o mayor).

Las diferencias en la concentración de fosfina alcanzada cerca del punto aplicación y en los puntos de aplicación (tanto en el lado opuesto de la aplicación de fosfina), son más grandes en el silo bolsa A (180 ppm). Esto puede indicar que en un silo bolsa con un buen grado de hermeticidad, la velocidad de difusión del gas se muestra como un factor limitante para alcanzar un PT homogéneo en toda la bolsa. Esta diferencia de concentración podría ser incluso mayor, si se establece una mayor distancia entre los puntos de aplicación. De las figuras 7 y 8 se observó que la mayor parte de la masa de granos recibió la dosis objetivo (5 días a 200 ppm o más), en ambos silo bolsas. Esto indica la factibilidad de alcanzar hermeticidad en el silo bolsa para lograr una buena fumigación. También se visualizaron diferencias de hermeticidad entre los 2 silo bolsas, especialmente debido a un sellado deficiente del sistema de cierre, que provocaron fugas del producto fumigante. Como en este caso, por lo general los silo bolsas se cierran plegando el plástico sobre si mismo, y luego se cubre el extremo con tierra o cualquier objeto pesado. Una metodología más eficiente para el cierre de la bolsa (el termosellado, o un cierre entre 2 listones de madera clavados y enrollados) son mas recomendables. Además de realizar un trabajo adecuado en el cierre de la bolsa, también se recomienda aumentar la dosis de fosfina en la zona cercana al extremo de la bolsa, para compensar cualquier posible pérdida de hermeticidad (por ejemplo, dosificar el doble o el triple de la concentración en los últimos 4,0 metros de silo bolsa). Además, una reaplicación de la dosis en el cierre de la bolsa después de 3 días ayudaría a mantener una concentración eficaz.

Mortandad de los insectos

La concentración de CO₂ de los silo bolsas durante los tratamientos estaba por debajo del 3,5% (promedio de 1,5% en el silo bolsa de A, 2,5% en el silo bolsa B y silo bolsa testigo), concentración claramente insuficiente para lograr, por si misma, el control de insectos.

La Tabla 1 muestra los resultados del efecto de diferentes tratamientos con fosfuro de aluminio (3,0 g/m³ y 6,0 g/m³ y testigo) en la mortalidad de los insectos adultos. El estudio encontró que, incluso cuando en los extremos de cierre del silo bolsa no se alcanzó la concentración objetivo (200 ppm) durante el tiempo de exposición deseado (5 días), se logró controlar el 100,0% de los adultos, incluso en el tratamiento de la dosis más baja. A su vez, el silo bolsa testigo mostró un porcentaje de mortalidad de entre 13,0% - 33,0%. Esta mortalidad puede asociarse a condiciones de almacenamiento desfavorables, como la baja humedad relativa (debido a la baja humedad del grano en la bolsa) y alta fluctuación de la temperatura de la masa de grano, sobre todo en las capas superiores. Evans (1983) mues-

tra el efecto combinado de temperatura y humedad relativa en la supervivencia de adultos de *S. oryzae*. Cuando fueron expuestos a una humedad relativa de 70,0% y 45,0%, con una temperatura de 30,0 °C, el tiempo de vida se redujo de 30 a 19 semanas, pero cuando la temperatura fue de 13,0 °C no se encontraron diferencias. Rodríguez et al. (2002 b), bajo similares condiciones (12,5% de humedad y alta temperatura del grano), observaron la

Tabla 1.

Mortandad de insectos en las celdas ubicadas a diferentes profundidades (superior, media e inferior) en 3 sitios diferentes del silo bolsa (cercano al punto de aplicación, entre 2 puntos de aplicación, y próximo al cierre de la bolsa) en el testigo y los tratamientos con 3,0 g/m³ y 6,0 g/m³ de fosfuro de aluminio, a los 10 días de iniciado el experimento.

TRATAMIENTO	LUGAR	PROFUNDIDAD	REPETICIÓN			PROMEDIO
			1(%)	2(%)	3(%)	(%)
Testigo		Superior	20	10	40	23
		Media	20	20	60	33
		Inferior	20	20	0	13
3,0 gr / m ³ *	Punto aplicación	Superior	100	100	100	100
		Media	100	100	100	100
		Inferior	100	100	100	100
	Entre puntos aplicación	Superior	100	100	100	100
		Media	100	100	100	100
		Inferior	100	100	100	100
	Cierre de la bolsa	Superior	100	100	100	100
		Media	100	100	100	100
		Inferior	100	100	100	100
6,0 gr / m ³ *	Punto aplicación	Superior	100	100	100	100
		Media	100	100	100	100
		Inferior	100	100	100	100
	Entre puntos aplicación	Superior	100	100	100	100
		Media	100	100	100	100
		Inferior	100	100	100	100
	Cierre de la bolsa	Superior	100	100	100	100
		Media	100	100	100	100
		Inferior	100	100	100	100

*Las concentraciones de 3,0 g/m³ y 6,0 g/m³ de fosfuro de aluminio marca Phostoxin se corresponden a 1,0 g/m³ y 2,0 g/m³ de fosfina, respectivamente.

mortalidad total de gorgojos adultos antes de los 45 días de almacenaje. El efecto letal de los bajos niveles de fosfina en el extremo del cierre del silo bolsa indicaría que el grado de resistencia en la población de insectos a la fosfina no fue alto. Nayak et al. (2003, 2007) señalan que con 200 ppm de fosfina se puede lograr el control de las poblaciones de adultos susceptibles en horas; incluso en poblaciones más resistentes (Australia) se requerirán 2 días. Cuando se trata de poblaciones con alta resistencia (China) pueden necesitarse tiempos de exposición más prolongados (16 días) a dicha concentración para lograr un control. Aunque sólo se evaluó la mortalidad de adultos, hay referencias que indican un control de todas las etapas de *S. oryzae* (incluidos los huevos y pupas), al ser expuestos a 200 ppm durante 5 días. Mills y Athie (2000), lograron un control similar con una dosis de 350 ppm en sólo 72 horas (temperatura de 25,0 °C y humedad relativa de 60,0%), lo que indicaría que con un tiempo de 120 h de exposición a una dosis más baja sería suficiente. Para controlar una población resistente se requerirá aumentar la dosis de 600 a 700 ppm durante 5 días, o mantener la dosis objetivo durante al menos 7 días (Nayak et al., 2001), combinación que se logró sólo en algunas áreas de los silos bolsas tratados. Varios estudios sostienen que el incremento del CO₂ en el granel podría ser beneficioso para el control con fosfina (Ren et al., 1994). Athie et al. (1998) informaron que el CO₂ aumenta la toxicidad del fumigante en las poblaciones de varias especies de gorgojos resistentes a la fosfina. Kashi y Bond (1975) encontraron que la absorción de fosfina y la mortalidad de *Sitophilus granarius* y *Tribolium confusum* aumentó con una concentración de 4,0% de CO₂. El efecto de bajas dosis de CO₂ aumenta el metabolismo de los insectos. La respiración de los insectos puede aumentar en un 50,0% debido al incremento del nivel de CO₂ a 3,0%, o al 300,0% cuando la concentración de CO₂ se eleva a 5,0% (Mueller, 1994). Esto indicaría que, incluso cuando los silos bolsas tenían un bajo nivel de CO₂ (3,0%), cantidad que no puede causar la mortalidad por sí misma, esta podría potenciar el efecto letal de la fosfina. Esta situación implica que la fumigación de granos en silos bolsas tendría 2 beneficios potenciales: 1) la hermeticidad del sistema; 2) un efecto letal adicional de la fosfina, debido a la presencia de CO₂ en concentración de aproximadamente 3,0%.

Conclusiones

La concentración de fosfina en ambos tratamientos alcanzó o superó las 200 ppm en gran parte del silo bolsa, durante los 5 días requeridos para el control de huevos de la mayoría de los insectos plagas. Por lo tanto, se puede concluir que el tratamiento con 3,0 g/m³ de fosfuro de aluminio (266 pastillas en la totalidad de la bolsa) fue suficiente para lograr el objetivo propuesto.

La zona cercana al cierre del silo bolsa presentó problemas de fuga de gas, impidiendo que la concentración de fosfina llegue a las 200 ppm y se mantenga en esos valores durante 5 días.

Para asegurarse que la concentración de fosfina sea la adecuada en la totalidad de la bolsa resulta necesario extremar los cuidados en el cierre de la misma, y así lograr la mayor hermeticidad posible. A su vez, resultaría conveniente incrementar la dosis de producto en la zona de cierre del silo bolsa.

La concentración de fosfina alcanzó mayores valores en las zonas cercanas a los puntos de aplicación. Sin embargo, una distribución de los puntos de aplicación de 5,0 m

lineales a lo largo de la bolsa resultó eficiente, lográndose el pico de concentración en la zona más alejada (entre 2 puntos de aplicación y del lado opuesto de la bolsa) a los 3 - 4 días de iniciado el tratamiento. El tratamiento de control de insectos con fosfina debe, entonces, realizarse en un periodo de tiempo no inferior a los 9 días.

La concentración de fosfina decae lentamente luego del cuarto día de la aplicación, registrándose valores de 150 ppm en algunas zonas del silo bolsa luego de 10 días de tratamiento. Por dichos motivos es importante recomendar que se tomen precauciones para manipular el grano en silos bolsas que han sido recientemente tratados con este producto.

La mortalidad de insectos adultos fue del 100%, aún en el silo bolsa tratado con la menor dosis (3,0 g/m³ de fosfuro de aluminio), mientras que en la bolsa testigo (sin tratar) la mortalidad fue de 13,0% a 33,0%.

Agradecimientos

Se agradece, a través del señor Enrique Villa y del Ing. Guillermo Romero, la cooperación de la empresa Fugran SA por la donación de la fosfina y el material de medición utilizado en este ensayo. Se agradece también a los dueños y administradores del establecimiento "El Monerío" de Balcarce, en especial al Ing. Lucas Kelly por facilitar las bolsas con trigo para la realización de este ensayo.

Referencias

- Annis P.C. 1987. Towards rational controlled atmosphere dosage schedules: a review of current knowledge, pp. 128 - 148. En: Donahaye E. y Navarro S. (Eds.), Proceedings of the 4th international working conference on stored - products protection, Tel Aviv, Israel.
- Annis P.C. y Morton R. 1996. The acute mortality effects of carbon dioxide on various life stages of *Sitophilus oryzae*. *Journal of stored products research*, 33(2): 115 - 124.
- Anon. 1998. Phytosanitary procedures. Phosphine fumigation of stored products to control stored - product insect pests in general. PM 3/18 (2) english. European and mediterranean plant protection organization, (EPPO), Paris, Francia, 4 p.
- Athie I.; Gomes R.A.; Bolonhezi S.; Valentini S.R. y de Castro F.M. 1998. Effects of carbon dioxide and phosphine mixtures on resistant populations of stored - grain insects. *Journal of stored products research*, 34(1): 27 - 32.
- Bailey S.W. 1965. Air - tight storage of grain; its effect on insect pests - IV *Rhyzopertha dominica* (F.) and some other Coleoptera that infest stored grain. *Journal of stored products research*, 1: 25 - 33.
- Banks H.J. 1991. Influence of water and temperature on release of phosphine from aluminum phosphide - containing formulations. *Journal of stored products research*, 27: 41 - 56.
- Banks H.D. y Fields P. 1995. Physical methods for insect control in stored ecosystems, pp. 353 - 409. En: Jayas D.; White N. y Muir W (Eds.), Stored grain ecosystems, Marcel Dekker Inc., Nueva York, EE.UU.

- Bartosik R.; Rodriguez J. y Maier D.E. 2001. Effects of CO₂ dosage and exposure time on the mortality of adult and immature stages of *Sitophilus oryzae*. ASAE, N°: 01 - 6110, St. Joseph, Michigan.
- Bartosik R.; Cardoso M.L. y Rodríguez J. 2008. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo - bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Bartosik R.; Rodriguez J.; Malinarich H. y Cardoso L. 2009. Almacenaje de maíz, trigo, soja y girasol en bolsas plásticas herméticas, pp. 2 - 14. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.), Almacenamiento de granos en bolsas plásticas, INTA Manfredi, Córdoba, 180 p.
- Bogliaccini A. 2001. Almacenamiento hermético. Revista granos, año VI - N°XXVII. En: Rodríguez J. C.; Bartosik R.E. y Malinarich H.D. 2002. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: Sistema silobag, informe final de trigo. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/AlmTrigo.pdf>. Accedido en julio del 2009.
- Bond E.J. 2007. Manual of fumigation for insect control. FAO plant production and protection, Vol. 54. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/x5042e/x5042E00.htm>. Accedido en junio del 2009.
- Burges H.D. y Burrell N.J. 1964. Cooling bulk grain in the British climate to control storage insects and to improve keeping quality. *J. sci. food agric.*, 15: 32 - 50.
- Calderón M. y Navarro S. 1980. Synergistic effect of CO₂ and O₂ mixture on stored grain insects, pp. 79 - 84. En: Shejbal J. (Ed.), Controlled atmosphere storage of grains, Elsevier, Amsterdam.
- Cao Y. y Wan D. 2001. Relationship between phosphine resistance and narcotic knockdown in *Tribolium castaneum* (Herbst), *Sitophilus oryzae* (L.) and *S. zeamais* (Motsch.), pp. 609 - 616. En: Donahaye E.J.; Navarro S. y Leesch J.G. (Eds.), Proc. int. conf. controlled atmosphere and fumigation in stored products, Fresno. Executive printing services, Clovis, CA, EE.UU.
- Cardoso L.; Bartosik R. y Rodriguez J. 2007. Monitoreo de la calidad de granos almacenados en silo - bolsa. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/balcarce>. Accedido en junio del 2009.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodriguez J. y Ochandio D. 2009. Factores que afectan la concentración de dióxido de carbono en el aire intersticial de soja almacenada en bolsas plásticas herméticas, pp. 41 - 46. En: Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.), Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. INTA Manfredi, Córdoba, 180 p.
- Casini C. 2008. Las bolsas plásticas en la actual campaña. Disponible en: www.agrofederal.com. Accedido en junio del 2009.
- Casini C. 2009. Conservación de granos, almacenamiento en bolsas plásticas. *Revista agromercado*, 288: 4 - 6.
- Casini C. y Santa Juliana D.M. 2009. Determinación del efecto de la humedad del maíz sobre la concentración de O₂ y CO₂, en bolsas plásticas, pp. 153 - 160. En:

- Casini C.; Rodriguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. INTA Manfredi, Córdoba, 180 p.
- Collins P.J.; Daghli G.J.; Nayak M.K.; Ebert P.; Schlipalius D.; Chen W.; Pavic H.; Lambkin T.M.; Kopittke R.A. y Bridgeman B.W. 2001. Combating resistance to phosphine in Australia, pp. 593 - 607. En: Donahaye E.J.; Navarro S. y Leesch J. (Eds.), Proceedings of the international conference on controlled atmosphere and fumigation in stored products 2000, Fresno, CA, EE.UU.
 - Daghli G.J.; Collins P.J.; Pavic H. y Kopittke R.A. 2002. Effects of time and concentration on mortality of phosphine resistant *Sitophilus oryzae* (L) fumigated with phosphine. *Pest management science*, 58: 1015 - 1021.
 - Darby J.A. y Caddick L.P. 2007. Review of grain harvest bag technology under Australian conditions. Technical report N° 105. CSIRO Entomology. Disponible en: <http://www.csiro.au/resources/HarvestBagReport.html>. Accedido en junio del 2009.
 - Donahaye E.; Navarro S.; Rinmdner M. y Azrieli A. 1996. The combined of temperature and modified atmospheres on *Tribolium castaneum*. *Journal of stored products research*, 32 (3): 225 - 232.
 - Evans D.E. 1983. The influence of the relative humidity and thermal acclimation on the survival of adult grain beetles in cooled grain. *Stored products research*, 19: 79 - 83.
 - FAO. 2009. Circular técnica N° 39 - Pérdidas, mermas y deterioros de los granos en la postcosecha. Disponible en: <http://www.fao.org/wairdocs/x5408s/x5408s00.htm#Contents>. Accedido en junio del 2009.
 - Kashi K.P. y Bond E.J. 1975. The toxic action of phosphine: role of carbon dioxide on the toxicity of phosphine to *Sitophilus granarius* (L.) and *Tribolium confusum* du Val. *Journal of stored products research*, 11: 9 - 15.
 - Mills K.A. y Athié I. 2000. Control of immature stages of phosphine susceptible and resistant strains of *Sitophilus oryzae* (L.), by phosphine fumigation. *Brazilian journal of food technology*, 3: 171 - 176.
 - Mitcham E.; Martin T. y Zhou S. 2006. Controlled atmosphere mode of action. Bulletin of entomological research. *Cambridge university press*, 96: 213 - 222.
 - Mueller D.K. 1994. A new method of using low levels of phosphine in combination with heat and carbon dioxide. *Fumigants and pheromones*, 33: 14.
 - Nayak M.K.; Collins P.J.; Pavic H. y Cao Y. 2003. Developments in phosphine resistance in China and possible implications for Australia, pp. 156 - 159. En: Wright E.J.; Webb M.C. y Highley E. (Eds.). Stored grain in Australia 2003: Proceedings of the Australian postharvest technical conference, 25 - 27 de junio, CSIRO Stored grain research laboratory, Canberra.
 - Nayak M.K.; Collins P.J. y Pavic H. 2007. Developing fumigation protocols to manage strongly phosphine - resistance rice weevils, *Sitophilus oryzae* (L.), pp. 267 - 273. En: Donahaye E.J.; Navarro S.; Bell C.; Jayas D.; Noyes R. y Phillips T.W. (Eds.), Proc. int. conf. controlled atmosphere and fumigation in stored products, 8 - 13 de agosto, Gold -Coast, Australia.
 - Navarro S. y Noyes R.T. 2001. The mechanics and physics of modern grain aeration management. CRC Press, Boca Ratón, 449 p.

- Ochandio D.C. 2008. Factores que afectan la concentración de CO₂ en soja almacenada en bolsas plásticas herméticas. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Agrarias, UNMDP. Balcarce, Buenos Aires, Argentina, 61 p.
- Reed C. y Pan H. 2000. Loss of phosphine from unsealed bins of wheat at six combinations of grain temperature and grain moisture content. *Journal of stored products research*, 36: 263 - 279.
- Ren Y.L.; O'Brien I.G. y Whittle C.P. 1994. Studies on the effect of carbon dioxide in insect treatment with phosphine, pp. 173 - 177. En: Highley E.; Wright E.J.; Banks H.J. y Champ B.R. (Eds.), *Stored product protection: Proceedings of the 6th international working conference on stored product protection*, 17 - 23 de abril, Canberra, Australia
- Rodríguez J.; Bartosik R.E. y Malinarich H.D. 2002 a. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: sistema silobag, informe final de maíz. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/AlmMaiz.pdf>. Accedido en junio del 2009.
- Rodríguez J.C.; Bartosik R.E. y Malinarich H.D. 2002 b. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: sistema silobag, informe final de trigo. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/AlmTrigo.pdf>. Accedido en junio del 2009.
- Rodríguez J.C.; Bartosik R.E. y Malinarich H.D. 2002 c. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: sistema silobag, informe final de girasol. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/AlmGirasol.pdf>. Accedido en junio del 2009.
- Rodríguez J.C.; Bartosik R.E. y Malinarich H.D. 2002 d. Almacenaje de granos en bolsas plásticas: sistema silobag, informe final de soja. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/documentos/agric/posco/granos/AlmSoja.pdf>. Accedido en junio del 2009.
- Rodríguez J.C.; Bartosik R.E.; Malinarich H.; Exilart J. y Nolazco M. 2005. Almacenaje de soja y girasol en bolsas plásticas. Disponible en: <http://www.inta.gov.ar/ediciones/idia/oleaginosa/varios01.pdf>. Accedido en junio del 2009.
- Subramanyam B. y Hagstrum D.W. 1995. *Integrated management of insects in stored products*. CRC Press, Boca Ratón, pp. 92 - 94.
- Taylor R.W.D. 1994. Methyl bromide - Is there any future for this noteworthy fumigant? *Journal of stored products research*, 30: 253 - 260.
- Vicini L. 2006. Los silos bolsa en los acopios. Disponible en: www.cosechaypostcosecha.org. Accedido en julio del 2009.

6

Logística y economía

Publicado en: Buzzato P.; Berruto R.; Cardoso L. y Bartosik R. 2011.
Logistics and economics of grain harvest and transport systems with the use of
silo bag. ASABE Paper N.º 1100019. ASABE Annual International Meeting,
7 - 10 de Agosto, Louisville, Kentucky, EEUU.

Logística y economía de la cosecha de granos y sistemas de transporte con el uso de silo bolsas

Patrizia Busato¹
Remigio Berruto¹
Leandro Cardoso²
Ricardo Bartosik²

Resumen

Argentina tiene zonas de la producción de granos bajo condiciones marginales y, con frecuencia, la escala de los establecimientos agropecuarios es lo que la hace rentable. Bajo estas condiciones, un sistema de almacenamiento temporal de granos, llamado silo bolsa, fue ampliamente difundido e investigado por el INTA. Uno de los beneficios de este sistema es la posibilidad de almacenamiento en el campo. Además, con el almacenamiento temporario en el silo bolsa el transporte no es un obstáculo para las operaciones de cosecha. De otro modo se debería proveer la logística de transporte para no detener el ritmo de la trilla, lo cual es difícil debido a la gran demanda instantánea de camiones (y al alto costo del flete derivado de esta alta demanda). Se desarrolló una simulación de eventos discretos para modelar la operación de cosecha y transporte con los datos recogidos durante los ensayos de campo. El objetivo de este trabajo fue comparar la logística de cosecha utilizando el sistema de silo bolsa versus el sistema tradicional de transporte de granos recién cosechados hasta un acopio de granos. Los parámetros de la simulación fueron: tamaño de la cosechadora, la velocidad de la operación, el tiempo insumido, el tiempo de descarga y la eficiencia general de trabajo. La forma, el tamaño y la ubicación de los establecimientos agropecuarios donde se realizó el almacenamiento temporario (silo bolsa), junto con la distancia del recorrido has-

¹DEIAFA, Universidad de Torino (Torino), Italia.

²EEA INTA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

ta el acopio y las operaciones dentro del acopio, también fueron estudiadas. La simulación fue capaz de optimizar los parámetros de la cosecha, el número y la ubicación de los silo bolsas y el número de camiones para el transporte que mejor se ajustó a la cosechadora para los 2 sistemas. Esta herramienta tiene como propósito minimizar los costos de la logística en la poscosecha, maximizar el rendimiento de los granos cosechados y los ingresos, como una estrategia para reducir los riesgos agrícolas y mejorar la sustentabilidad.

Palabras clave: silo bolsa, logística, modelado de eventos discretos, resultados de campo, análisis económico.

Introducción

En Argentina, la capacidad de almacenamiento permanente de granos (silos de hormigón o chapa, celdas horizontales, etc.) es de solo 65,0 al 70,0% de la producción total de granos. Como consecuencia de esta deficiencia de almacenaje, surgen problemas de logística en las operaciones de poscosecha de granos. Bajo estas circunstancias, una nueva técnica de almacenamiento (almacenamiento en silo bolsas) ha ganado popularidad entre los productores, los acopiadores y la industria. Esta técnica ha estado en el mercado durante varios años para el “ensilado” de reservas forrajeras, y luego fue adaptada para el almacenamiento de grano seco. Estos silo bolsas tienen un alto nivel de hermeticidad a los gases (vapor de agua, O_2 y CO_2). Como resultado, la respiración de los componentes bióticos de la masa de granos (hongos, insectos y grano) aumenta la concentración de CO_2 y reduce la concentración de O_2 , con beneficios para la conservación de los granos.



Figura 1.
Silo bolsas con 200,0 toneladas de capacidad.

Cada bolsa puede contener, aproximadamente, 200,0 toneladas de maíz, trigo o soja y con la maquinaria disponible actualmente, el llenado de la bolsa es una operación muy ágil. Las empresas argentinas también desarrollaron maquinaria para descargar los silos, bolsas y transferir el grano directamente al camión o tolva de manera eficiente. La nueva generación de cosechadoras de alta capacidad encuentra en el sistema silo bolsa al socio ideal, ya que la capacidad de carga de la máquina embolsadora se limita, básicamente, a la capacidad de transporte entre la cosechadora y el lugar donde se llena la bolsa. Otra ventaja de los silos bolsa es que pueden ser fácilmente incorporados a programas de preservación de la identidad de los granos (programas IP de granos). Los silos bolsa se pueden ubicar sin problemas en el campo (con el resguardo correspondiente para evitar daños), en la periferia del lote de producción. Con esta modalidad de embolsado se reducen los riesgos de contaminación de los granos especiales con otras materias primas, situación que ocurre comúnmente cuando se concentran los granos en plantas de acopio. Muchos productores de trigo han encontrado en el sistema de silo bolsa la herramienta ideal para segregar las diferentes variedades de trigo, directamente en el campo.

En 2001, alrededor de 2,0 millones de toneladas de granos (maíz, trigo, soja y girasol) se almacenaron con este sistema. Durante los últimos años, esta técnica de almacenamiento ha sido mejorada y el sistema de silo bolsa ha ganado una rápida adopción entre los agricultores argentinos, hasta el punto que en el año 2010 más de 40,0 millones de toneladas se almacenaron en silos bolsa (más del 40,0% de la producción total). Numerosas investigaciones han estudiado el efecto de esta tecnología de almacenamiento en la calidad del grano (Bartosik et al., 2008; Cardoso et al., 2010; Ochandio et al., 2010). En estos estudios se comparó la evolución en el tiempo de parámetros de calidad de grano almacenado seco y húmedo, mostrando que el grano seco se puede almacenar en silo bolsa durante más de 6 meses sin afectar sus atributos de calidad. El grado de modificación de la atmósfera intersticial también se estudió para varios granos, mostrando que el contenido de humedad del grano, la calidad del grano, el tiempo de almacenamiento y la temperatura del grano durante el almacenamiento, pueden afectar la tasa de respiración del ecosistema granario (Cardoso et al., 2008; Rodríguez et al., 2008).

El efecto del almacenamiento en silo bolsa sobre hongos y micotoxinas en maíz fue investigado por Castellari et al. (2010), y la posibilidad de controlar los insectos en el silo bolsa con fumigación fue estudiada por Cardoso et al. (2009).

Un intensivo trabajo se ha realizado sobre la simulación de las condiciones de almacenamiento en silos bolsa. Gaston et al. (2009) implementaron un modelo de transferencia de calor y humedad para estudiar el efecto del silo bolsa en el almacenamiento de trigo. Más tarde, Abalone et al. (2011 a, b) incluyeron en el modelo una correlación para la respiración de trigo, evaluando el efecto de diferentes condiciones de almacenamiento en las concentraciones finales de O_2 y de CO_2 .

A pesar de toda la investigación llevada a cabo sobre silos bolsa, el efecto de esta novedosa tecnología de almacenamiento en el sistema de poscosecha (a nivel de establecimientos agropecuarios o a nivel regional) aún no ha sido abordado. El sistema de silo bolsa está siendo incorporado como una parte integral del sistema de almacenamiento en otros países, por lo que información referida a las ventajas logísticas en los diferentes niveles del sistema de poscosecha de grano son necesarios.

Desde el punto de vista de la logística, el uso de silo bolsas divide la cadena de suministros en 2 partes que son independientes. De esta forma, la capacidad de la cosechadora no está vinculada a la capacidad de transporte ni a los tiempos de recepción del acopio, por lo que la falta de la capacidad de transporte o la falta de capacidad de recepción del acopio no afecta el ritmo de cosecha.

El objetivo de la investigación fue evaluar la ventaja logística y económica de la utilización de silo bolsas frente a la cadena de suministro tradicional, donde los productores llevan el grano directamente al acopio.

Materiales y métodos

Implementación de los modelos de simulación

Cadena de suministros tradicional

El modelo simula la cadena de suministros como un sistema. Las operaciones que se consideran son la cosecha, con la correspondiente descarga de la cosechadora en el carro tolva, el transporte del grano desde el interior del lote de producción hasta la periferia del lote donde un camión está esperando para recibir el grano del carro tolva. Luego, el modelo simula el transporte del grano al acopio y las operaciones de recepción de grano en el mismo. El tipo de modelo de evento discreto sincroniza las distintas operaciones. Esto significa que si un camión no está disponible en el campo, la tolva, llena de grano, tiene que esperar a que el camión descargue. Si el tiempo de espera es demasiado largo, también la cosechadora tiene que detener la cosecha. En otras palabras, una máquina o una operación (p. ej., la descarga de grano en el acopio) podría ser un factor limitante para otras operaciones (p. ej., el trabajo de la cosechadora en el campo).

Cadena de suministros con el uso de silo bolsas

Las operaciones que se consideran son la cosecha, con la correspondiente descarga de la cosechadora en el carro tolva. Luego se considera el transporte del grano desde el interior del campo hasta una esquina, donde una máquina embolsadora está disponible para recibir el grano del carro tolva y llenar el silo bolsa.

La segunda parte del modelo simula la descarga del grano del silo bolsa y la carga del grano en el camión. Luego el modelo simula el transporte del grano hasta el acopio y las operaciones de recepción en el acopio. Esta operación se produce fuera de la temporada de cosecha, así que los tiempos de espera en el acopio son más cortos en comparación con el pico de la temporada de cosecha.

Datos de entrada para el modelo de simulación

Para la simulación de la cosecha se consideraron 16 lotes de 6,4 ha (0,5*0,5 millas) cada uno, con un rendimiento de 4,0 t/ha (65,0 bu/ac) de soja.

Los siguientes datos de la cosechadora se utilizaron para el modelo:

- Ancho de trabajo de 9,0 m (30,0 pies).
- Velocidad de trabajo de 7,2 km/h (4,5 millas).
- Capacidad del depósito de grano en la cosechadora de 6,0 toneladas (240,0 bu).

- La capacidad teórica de trabajo 6,6 ha/h (16,4 ac/h).
- Tiempo de trabajo diario: 8 h/día, teniendo en cuenta las horas disponibles para la cosecha de soja.

La velocidad del carro tolva dentro del lote es de 10,0 km/h (6,0 millas/h), con una capacidad de carga de 15,0 toneladas (600,0 bu). La capacidad de descarga del carro tolva es 400,0 t/h (266,0 bu/min), por lo que tarda menos de 3 min para descargarlo.

La embolsadora tiene una capacidad de trabajo equivalente a la capacidad de descarga de la tolva de grano. El tiempo de preparación para comenzar a hacer un nuevo silo bolsa es de 20 min. El costo de cada silo bolsa es de USD 450 y podrá contener hasta 200,0 toneladas de maíz y soja, ó 120,0 toneladas de semillas de girasol.

La máquina extractora tiene una capacidad de 280,0 t/h (187,0 bu/min) y requiere 20 min de preparación para comenzar a vaciar un silo bolsa.

La velocidad del camión se estimó mediante la siguiente función:

$s = \max(0,7 * d + 16,61, 60)$; donde:

- s es velocidad en km/h
- d es la distancia en km

Esto implica que a medida que la distancia entre el lote de producción y el acopio aumenta, también aumenta la velocidad promedio del transporte, con un límite máximo de 60,0 km/h. La velocidad es la misma tanto para camiones vacíos como para camiones llenos.

El tiempo de servicio en el acopio se consideró con distribución log - normal, con una media de 80 min y desvío estandar de 20 min. Las unidades de tiempo de simulación fueron minutos, así que todas las operaciones que impliquen una actividad se calculan en minutos.

Datos económicos

El costo por hora de los equipos se calcula utilizando ASAE D497.4 y EP 496.2. Los costos por hora utilizados para el cálculo son los siguientes:

- Cosechadora = 210,0 USD/h
- Carro tolva de grano = 40,2 USD/h
- Máquina embolsadora y tractor = 16,6 USD/h
- Máquina extractora y tractor = 23,0 USD/h

Además del costo de los equipos, se consideran 20,0 USD/h como costo de la mano de obra. Para el cálculo del costo de operación, el costo por hora de las máquinas se multiplicó por 8, que eran las horas de trabajo de la cosechadora. De esta manera, también el tiempo de espera de la máquina se calcula como tiempo de trabajo.

Los camiones no son de propiedad del establecimiento agropecuario, sino que se contratan como un servicio. Los gastos de transporte de camiones son de 21,0 a 36,0 USD/t para 10,0 km y 40,0 km, respectivamente, durante la temporada de cosecha. Se plantea un 15,0% de reducción de la tarifa por la contratación fuera de temporada de cosecha (considerado en la opción de cosecha con uso de silo bolsa). La tarifa incluye los tiempos de espera de descarga en el acopio, por esta razón es muy alta; además, puede variar durante la temporada.

Estudio realizado

Por el momento, un solo cultivo (soja) y un solo tamaño de campo (6,4 ha) fueron considerados. El sistema tradicional, que depende de camiones para el transporte de granos hasta el acopio justo después de la cosecha, y el sistema de silo bolsa, que almacena el grano en el campo y posteriormente se transporta el grano hasta el acopio, se compararon a 16,0 km (10,0 millas) y 64,0 km (40,0 millas) de distancia entre el establecimiento agropecuario y el acopio.

Para el sistema tradicional, se consideraron escenarios donde se utiliza de 1 a 3 camiones, teniendo en cuenta que 3 camiones era el número óptimo para garantizar una capacidad plena de funcionamiento de la cosechadora, debido a los elevados tiempos de recepción del grano por parte del acopio.

Resultados

Experimento I. Distancia del campo al acopio de 16,0 km (10,0 millas)

En el sistema tradicional se opera a plena capacidad cuando hay suficientes camiones para garantizar el continuo flujo de granos desde la cosechadora. Después de hacer correr el modelo, la cosechadora tenía la capacidad de transporte garantizada si 3 camiones estaban disponibles durante las 8 horas de trabajo de la cosechadora. La adición de un cuarto camión no incrementa la capacidad de cosecha. Los resultados también dependen, en gran medida, de la distancia del campo al acopio y del rendimiento del cultivo. Por ejemplo, de haberse considerado el cultivo de maíz, la producción podría duplicarse o triplicarse, por lo que la disponibilidad de camiones también debería incrementarse.

Con 3 camiones disponibles, la cadena de trabajo tiene una capacidad equivalente (5,9 ha/h) para ambos sistemas, lo cual es casi el máximo disponible para los parámetros simulados de la cosechadora (Tabla 1). Sin embargo, si el número de camiones disponibles se reduce a 1 o 2, la capacidad del sistema en el campo también se reduce, dado que los carros tolvas tienen que esperar a que un camión esté nuevamente disponible, y por lo tanto la cosechadora tiene que esperar al carro tolva. Los largos tiempos de espera, en este caso, reducen la capacidad de la cadena de trabajo. La reducción, en comparación con el sistema que utiliza silo bolsas, será del 16,0% si 2 camiones están disponibles; y del 81,0% si solo un camión está disponible para la cosechadora, teniendo en cuenta una distancia del campo al acopio de 16,0 km (10,0 millas).

Tabla 1.

Capacidad de trabajo en la cadena de cosecha - almacenamiento con una distancia de 16,0 km (10,0 millas) desde el campo al acopio.

N.º CAMIONES	CAPACIDAD DE TRABAJO (HA/H)		CAPACIDAD DE TRABAJO (AC/H)		INCREMENTO CON SILO BOLSAS				
	Camiones	Silo bolsas	Camiones	Silo bolsas	ha/día	ha/h	ac/día	ac/h	%
1 camión	3,2	5,9	8,1	14,6	21,2	2,6	2,5	6,5	81,0%
2 camiones	5,1	5,9	12,6	14,6	6,7	0,8	16,5	2,0	16,0%
3 camiones	5,9	5,9	14,7	14,6	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0%

El sistema de silo bolsa trabaja siempre de la misma forma porque no se ve afectado por el transporte y las operaciones del acopio. Esta es la principal ventaja logística del uso del sistema de silo bolsa.

Aún cuando se cuenta con 3 camiones, pueden ocurrir situaciones de retraso de cosecha si el acopio tiene un día muy ocupado, con mayor tiempo para la recepción de la mercadería enviada. Esto implica una extensión en el tiempo de retorno de los camiones, que no podrán igualar la capacidad de la cosechadora.

Desde un punto de vista económico, cuando los 3 camiones están disponibles, los costos son similares para ambos sistemas. La adopción del silo bolsa permite un ahorro de 12,0 USD/ha cuando 2 camiones están disponibles y de 17,8 USD/ha cuando solo hay 1 camión disponible. El monto del ahorro también indicaría cuánto se puede permitir como pérdida en la poscosecha cuando se utilizan silo bolsas en lugar del sistema tradicional. El porcentaje de ahorro se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 2.

Comparación de los resultados económicos. Campo a una distancia de 16,0 km (10,0 millas) del acopio.

N.º CAMIONES	COSTOS (\$/HA)		COSTOS (\$/AC)		AHORROS CON SILO BOLSA		
	Camión ⁽¹⁾	Silo bolsa ⁽²⁾	Camión	Silo bolsa	(\$/ha)	(\$/ac)	%
1 camión	167,6	149,8	67,8	60,6	17,8	7,2	10,6
2 camiones	161,8	149,8	65,4	60,6	11,9	4,8	7,4
3 camiones	151,0	149,8	61,1	60,6	1,1	0,4	0,7

⁽¹⁾ el costo incluye operaciones de cosecha, el transporte en el campo, *el transporte* en camiones (1 - 3 camiones disponibles) y el tiempo de servicio del acopio como una restricción para la cadena de trabajo.

⁽²⁾ el costo incluye operaciones de cosecha, *el transporte* en el campo, *carga del silo bolsa* en el campo, *descarga del silo bolsa*, transporte por ruta (1 camión disponible), mientras que el tiempo *de servicio del acopio* no es una limitación, en este caso, para la cosechadora y *para las operaciones de transporte en el campo*.

Un aspecto que también debe ser investigado es el valor de la puntualidad, porque el sistema de silo bolsa permite la cosecha de una gran cantidad de hectáreas en el tiempo, mientras el sistema de camiones puede sufrir importantes fluctuaciones que podrían implicar cosechas tardías. Si el clima permite menos días disponibles para la cosecha, estos días van a estar muy ocupados para los acopios y también va a ser muy difícil para los productores encontrar un número suficiente de camiones para transportar la cosecha. En este caso se espera un mejor rendimiento del sistema de silo bolsa en comparación con el rendimiento de los camiones.

Experimento 2. Distancia del campo al acopio de 64,0 km (40,0 millas)

Con 3 camiones disponibles, la cadena de trabajo tiene una pequeña reducción (7,0%) de la capacidad (5,6 ha/h) en comparación con el uso de silo bolsas. El experimento con 4 camiones, aunque si bien proporciona la misma capacidad que el sistema de silo bolsas, también aumenta los costos de operación para el sistema de camiones, por lo que no se presenta aquí.

Por otra parte, si el número de camiones disponible se reduce a 1 o 2, la capacidad de trabajo en el campo se reduce, porque el carro tolva tiene que esperar que un camión esté

disponible; por lo tanto la cosechadora tiene que esperar al carro tolva, esto resulta en largos tiempos de espera que reducen la capacidad de la cadena de trabajo. La reducción de capacidad de trabajo, en comparación con el silo bolsa, será del 29,0% si solo 2 camiones están disponibles, y del 87,0% si solo un camión está disponible para la cosechadora, teniendo en cuenta una distancia del campo al acopio de 64,0 km (40,0 millas).

Tabla 3.

Capacidad de trabajo en la cadena de cosecha - almacenamiento con una distancia de 64,0 km (40,0 mi) desde el campo al acopio.

N° CAMIONES	CAPACIDAD DE TRABAJO (HA/H)		CAPACIDAD DE TRABAJO (AC/H)		INCREMENTO CON SILO BOLSAS				
	Camiones	Silo bolsas	Camiones	Silo bolsas	ha/día	a/h	ac/día	ac/h	%
1 camión	3,1	5,9	7,8	14,6	22,1	277	54,8	6,8	87,0%
2 camiones	4,1	5,9	11,4	14,6	10,6	133	26,2	3,2	29,0%
3 camiones	5,5	5,9	13,7	14,6	3,1	039	7,7	0,9	7,0%

Las mismas consideraciones que se hicieron para la distancia más corta (16,0 km) se aplican para distancias más largas (64,0 km), para un determinado nivel de actividad del acopio y el número de camiones disponibles.

Desde un punto de vista económico, la adopción de silo bolsas permite un ahorro de 34,6 USD/ha cuando los 3 camiones están disponibles, de 47,5 USD/ha cuando 2 camiones están disponibles y de 138,8 USD/ha cuando solo 1 camión está disponible. A mayor distancia, también el equivalente de pérdidas de la poscosecha podría ser mayor para el sistema de silo bolsas. El porcentaje de ahorro se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4.

Comparación de los resultados económicos. Campo a 64,0 km (40,0 millas) de distancia del acopio.

	COSTOS (\$/HA)		COSTOS (\$/AC)		AHORRO CON SILO BOLSAS		
	Camiones ⁽¹⁾	Silo bolsas ⁽²⁾	Camiones	Silo bolsas	(\$/ha)	(\$/ac)	%
1 camión	327,0	188,2	132,3	76,1	138,7	56,1	42,4
2 camiones	235,7	188,2	95,3	76,1	47,4	19,2	20,1
3 camiones	222,9	188,2	90,1	76,1	34,6	14,0	15,5

⁽¹⁾ el costo incluye las operaciones de cosecha, el transporte en el campo, el transporte de camiones (1 - 3 camiones disponible) y el tiempo de servicio del acopio como una restricción para la cadena de trabajo.

⁽²⁾ el costo incluye las operaciones de cosecha, el transporte en el campo, la carga de silo bolsa en el campo, la descarga de silo bolsa, el transporte por rutas (1 camión disponible) mientras que el tiempo de servicio del acopio no es una limitación en este caso para la cosechadora, ni para las operaciones de transporte.

Conclusiones

La comparación del sistema de cosecha con transporte directo al acopio y la cosecha con almacenamiento en silo bolsa y transporte diferido en el tiempo permite algunas conside-

raciones desde el punto de vista de la logística. El silo bolsa es eficaz, ya que permite un alto y constante rendimiento de la cadena de cosecha, porque las operaciones de transporte y las del acopio se realizan más tarde y de esa manera no influyen en la capacidad de la cosechadora, como ocurre en el sistema de transporte tradicional. Por esta razón, el silo bolsa es adecuado para las nuevas áreas agrícolas, donde las distancias entre el lote de producción y la planta de acopio son grandes, produciendo un importante ahorro de tiempos y costos. Debido al hecho de que la operación con silo bolsa no está relacionada con la actividad del acopio, también está menos influenciada por malas condiciones climáticas. Si el clima permite menos días disponibles para la cosecha, durante esos días los acopios estarán muy ocupados. También va a ser muy difícil para los productores encontrar un número suficiente de camiones para sus operaciones de cosecha. En este caso se espera un mejor rendimiento del sistema de silo bolsa en comparación con el rendimiento de los camiones. Por otra parte, la distancia de transporte y el rendimiento del acopio son factores importantes para la cadena de suministro tradicional. Esta primera evaluación permite determinar el costo y el tiempo de operación en los 2 sistemas, y ofrece información básica para aquellos que quieren comenzar a cosechar utilizando silo bolsas para el almacenamiento temporal del granos.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad de Torino, Italia y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina por el apoyo financiero de esta investigación.

Referencias

- Abalone R.; Gastón A.; Bartosik R.; Cardoso L. y Rodríguez J. 2011. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part I: Model development and validation. *J. Stored Prod. Res.*, 47: 268 - 275. doi: 10.1016/j.jspr.2011.05.004
- Abalone R.; Gastón A.; Cardoso L.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2011. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part II: model sensitivity and effect of grain storage conditions". *Journal of Stored Products Research*, 47(4): 268 - 275.
- Bartosik R.; Rodríguez J. y Cardoso L. 2008. Storage of corn, wheat soybean and sunflower in hermetic plastic bags. En: Proc. Int. Grain Quality and Technology Congress, 15 - 18 de juliom Chicago, EE.UU.
- Cardoso L.; Ochandío D.; de la Torre D.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2010. Storage of quality malting barley in hermetic plastic bags. En: International Working Conference on Stored Product Protection, 27 junio - 2 de julio de 2010, Estoril, Portugal.
- Cardoso L.; Bartosik R. y Milanesio D. 2009. Phosphine concentration change during fumigation in hermetic plastic bags (silo - bags). En: Proceedings of the International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. Conference, Technology and Management to Increase the Efficiency in Sustainable Agricultural Systems, 1 - 4 septiembre, Rosario, Argentina.

- Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of soybean stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 565 - 568. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Castellari C.; Marcos Valle F.; Mutti J.; Cardoso L. y Bartosik R. 2010. Toxigenic fungi in corn (maize) stored in hermetic plastic bags. En: 501 - 504, Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection, 27 de junio - 2 de julio, Estoril, Portugal. Julius - Kühn - Archiv, Bundesforschungsanstalt für Kulturpflanzen, Berlín, 1077 p.
- Gastón A.; Abalone R.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2009. Mathematical modeling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo bags). *Biosystems Eng.*, 104: 72 - 85.
- Ochandio D.; Cardoso L.; Bartosik R.; de la Torre D.; Rodríguez J. y Massigoge J. 2010. Almacenamiento de canola en bolsas plásticas herméticas, pp. 325-332. En: Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection, 27 de junio al 2 de julio de 2010, Estoril, Portugal. Julius-Kühn-Archiv, Bundesforschungsanstalt für Kulturpflanzen, Berlín, 1077 p.
- Rodríguez J.; Bartosik R.; Cardoso L. y Croce D. 2008. Factors affecting carbon dioxide concentration in interstitial air of wheat stored in hermetic plastic bags (silo - bag), pp. 589 - 592. En: Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.

Análisis económico del almacenamiento de granos en silo bolsas a través de una aplicación web

Ricardo Bartosik¹
Leandro Cardoso¹
Hernán Urcola¹

Resumen

El almacenamiento de granos en bolsas plásticas herméticas (silo bolsas) es una práctica frecuente para productores, acopiadores y para la agroindustria en Argentina. En los últimos 5 años, aproximadamente el 40,0% de la producción de granos se almacenó en silo bolsas, lo cual destaca la importancia de esta tecnología en Argentina. Además, esta tecnología está siendo exportada a varios países de los 5 continentes.

Los silo bolsas pueden almacenar aproximadamente 200,0 toneladas de grano y se pueden armar tanto, en el mismo lote de producción, como en terrenos especialmente dedicados en la cercanía de los acopios.

Algunos productores adquieren todo el equipamiento para realizar el embolsado de granos (embolsadora, extractora, carro tolva y tractores). Para ellos es crítico conocer el costo real del embolsado, para compararlo con el costo de enviar el grano directamente al acopio. Por otra parte, otros productores contratan la labor de embolsado. Para los contratistas también es crítico conocer el costo real del trabajo de embolsado para cobrar una tarifa adecuada.

Los principales objetivos de este trabajo fueron: 1) desarrollar una aplicación web para calcular el costo de almacenamiento de granos en silo bolsas y 2) determinar el costo del embolsado de granos para una situación típica de Argentina.

El costo del embolsado por tonelada decrece a medida que aumentan las toneladas embolsadas, desde 5,9 USD/t para 15 silo bolsas por año a 5,0 USD/t para 500 silo bolsas/año. El costo de embolsado no cambia de manera substancial a medida que aumentan las bolsas realizadas por año, debido a la alta proporción de costos variables. Para una operación de tamaño mediano (126 silo bolsas/año), el costo de la bolsa correspondió al 59,0% del total, la mano de obra al 13,0% y combustible al 24,0%. Por otra parte, los costos fijos (amortización, reparaciones e intereses) fueron solo del 4,0% del total. El costo de almacenamiento por tonelada

¹INTA EEA Balcarce (Buenos Aires), Argentina.

es variable según el tipo de grano, con valores de entre 4,2 USD a 4,6 USD/t para trigo, maíz, soja y cebada; y de 6,9 USD/t para girasol o arroz.

Esta aplicación puede ser utilizada para que los interesados puedan calcular sus costos de embolsado basados en su propia estructura de costos, modalidad de uso de la maquinaria, precios relativos de combustible y mano de obra, entre otras.

Palabras clave: almacenamiento, granos, costos, logística, aplicaciones web, silo bolsa.

Introducción

El almacenamiento de granos en silo bolsa es un tipo de almacenamiento hermético. Los granos, microorganismos asociados e insectos respiran, consumiendo O_2 y generando CO_2 , para crear una atmósfera modificada dentro del silo bolsa. Esta atmósfera modificada genera ciertas ventajas para la conservación de los granos.

El almacenamiento de granos en silo bolsas es una alternativa frecuente para productores, para acopiadores y para la industria de procesamiento de granos en Argentina. Durante los 5 últimos años, cerca del 40,0% de la producción de granos en Argentina se almacenó en silo bolsas, lo cual destaca la importancia de esta tecnología a nivel país. Además, esta tecnología está siendo exportada a varios países de los 5 continentes. Los silo bolsas tienen forma tubular, están compuestos por un material plástico de 3 capas (blanco en el exterior y negro en el interior) de 235 μm de espesor. El tamaño de bolsa más utilizada es de 60,0 m de largo y 2,7 m de diámetro, y pueden contener aproximadamente 200,0 toneladas de grano cada una. Con el equipamiento actualmente disponible es muy simple de realizar las operaciones de llenado y vaciado del silo bolsa. Las bolsas se pueden armar en el mismo lote de producción, o en un área especialmente acondicionada en las proximidades de la planta de almacenamiento o de procesamiento.

El INTA ha realizado una importante y extensa investigación relacionada al almacenamiento en silo bolsas en los últimos años. El efecto de la humedad y el tiempo de almacenamiento sobre la calidad del trigo, maíz, soja, girasol y cebada fue analizado por Bartosik et al., (2012). Cardoso et al. (2009) estudiaron los cambios en la concentración de fosfina durante la fumigación de granos en silo bolsas. Por otra parte, Cardoso et al. (2012) implementaron una prueba de presión para determinar el nivel de hermeticidad de los silo bolsas y su evolución luego del almacenamiento durante 4 meses en el campo.

Estudios de logística demostraron la flexibilidad del uso de silo bolsas y la mejora en la eficiencia la cosecha (Busato et al., 2011). Recientemente Bartosik (2012) presentó un informe completo de las investigaciones realizadas en la temática de silo bolsas hasta el momento.

Algunos productores adquieren todo el equipamiento para realizar el embolsado de granos (embolsadora, extractora, carro tolva y tractores). Para ellos es crítico conocer el costo real del embolsado para compararlo con el costo de enviar el grano directamente al acopio. Por otra parte, otros productores contratan la labor de embolsado. Para los contratistas también es crítico conocer el costo real del trabajo de embolsado, para cobrar una tarifa adecuada.

El cálculo del costo de almacenamiento en silo bolsas requiere de ciertas consideraciones. El equipamiento necesario incluye: embolsadora, extractora, carro tolva auto-

descargable y 2 tractores con potencia suficiente para transportar el carro tolva y darle movimiento a las roscas sinfín (uno para el carro tolva y otro se usa para la embolsadora o extractora, dependiendo si se embolsa o se extrae grano). Además de los costos derivados de tener la propiedad del equipo (amortizaciones, mantenimiento e intereses) hay otros gastos en relación con la mano de obra y con el combustible necesario para la operación. La bolsa no es reutilizable, por lo que cada vez que se realiza el embolsado es preciso adquirir una bolsa nueva. De acuerdo a la capacidad económica/financiera de cada agente, como así también a la escala, los componentes de costos pueden ser significativamente diferentes. Una complejidad adicional puede presentarse cuando se considera el tiempo dedicado de las diferentes máquinas a la tarea de embolsado (por ejemplo: el tractor puede utilizarse para otras tareas, por lo que los costos de propiedad deben asignarse de manera proporcional al uso).

El INTA desarrolla aplicaciones web para ayudar a los productores y a la agroindustria en la toma de decisión de diferentes actividades del manejo y conservación de los granos. Un ejemplo de ello es el programa Airear, que permite calcular y seleccionar ventiladores de aireación de granos y dimensionar sistemas de aireación (Bartosik et al., 2009). Este programa, de acceso libre y gratuito, puede ser utilizado por cualquier interesado (se debe registrar previamente). Con esta herramienta, los diferentes agentes de la cadena de la poscosecha de granos tienen libre acceso a cálculos complejos e información específica, que de otra manera, sería muy difícil de conseguir.

A pesar de la amplia variedad de temas de investigación relacionados al almacenamiento en silo bolsas presentados anteriormente, no se ha hecho hasta el momento un esfuerzo importante para realizar estudios económicos de almacenamiento con este sistema. Los principales objetivos de este trabajo fueron: 1) desarrollar una aplicación web para calcular el costo de almacenamiento de granos en silo bolsas y 2) determinar el costo del embolsado de granos para una situación típica de Argentina.

Materiales y métodos

Una operación típica de almacenamiento de granos en silo bolsa de Argentina fue analizada, la cual incluye las sub-operaciones de: 1) transporte desde la cosechadora en el campo hasta la ubicación de la embolsadora, 2) el embolsado, y 3) la extracción del grano. El transporte subsecuente del grano hasta el acopio, la industria de procesamiento o el puerto no fueron considerados en el análisis, ya que este debe hacerse independientemente del periodo de tiempo de almacenamiento del grano en el silo bolsa.

Como se mencionó anteriormente, el equipo requerido para la operación de embolsado consiste en 1 embolsadora, 1 extractora, 1 carro tolva autodescargable y 2 tractores. Los mismos también serán utilizados para la actividad de extracción del grano. La embolsadora considerada tiene una capacidad de 400,0 t/h y requiere una potencia de al menos 60,0 HP. La extractora tiene una capacidad de 80,0 - 110,0 t/h (dependiendo del tipo y condición de grano), y requiere una potencia de 90,0 HP. La tolva autodescargable tiene una capacidad de 14,0 toneladas y está equipada con una rosca sinfín que descarga 360,0 t/h de grano. Para satisfacer las necesidades de potencia de estos equipos se consideraron 2 tractores de 90,0 HP, los cuales pueden ser utilizados indistintamente para la

embolsadora, la extractora o el carro tolva. Esta es una configuración típica de equipo para un contratista que ofrece el servicio de embolsado a productores o acopios en Argentina. Los precios de los equipos e insumos se tomaron de revistas especializadas (*Agromercado*) y de consultas con empresas proveedoras de insumos y equipos. La vida útil del equipo fue establecida en 10 años, con excepción de los tractores a los cuales se les asignó una vida útil de 20 años. El valor residual del equipo fue considerado del 25,0% de su valor a nuevo, mientras que el costo de mantenimiento anual se fijó en el 3,0% de su valor (Tabla 1).

Tabla 1.
Características, precio, vida útil, valor residual y costo de mantenimiento para los equipos considerados en la operación de embolsado.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS	PRECIO (USD)	VIDA ÚTIL	VALOR RESIDUAL (%)	TASA DE INTERÉS (%/AÑO)	COSTO DE MANTENIMIENTO (%)
Embolsadora	400,0 t/h capacidad	3842	10	25,0	15,0	3,0
Extractora	80,0 - 110,0 t/h capacidad	10105	10	25,0	15,0	3,0
Carro tolva	14,0 t capacidad, con rosca de descarga de 360t/h	15378	10	25,0	15,0	3,0
Tractor 1	90,0 HP	50000	20	25,0	15,0	3,0
Tractor 2	90,0 HP	50000	20	25,0	15,0	3,0

El precio de un silo bolsa estándar, de 60,0 m de largo por 2,7 m de diámetro, fue de 500 USD. La cantidad de grano a embolsar varía de acuerdo a la densidad volumétrica del grano (200,0 t de trigo, maíz, soja y sorgo, 180,0 t de cebada y 120,0 t de girasol y arroz).

Dedicación de tiempo a la operación de embolsado

La embolsadora y extractora son destinadas exclusivamente a la actividad de embolsado. En este caso el 100,0% de las amortizaciones, los intereses y los gastos de mantenimiento son imputados a esta actividad. Por otra parte, el carro tolva y los tractores son utilizados en otras operaciones, por lo que los costos de propiedad son asignados al embolsado de manera proporcional.

Basados en experiencias prácticas, se asume que durante la operación de embolsado el equipo se utiliza 10 h por día, o sea que se pueden llenar 4 bolsas en un día (2 h 30 min por bolsa). Durante la extracción, el equipo también se utiliza 10 h por día, pero solo se pueden descargar 2,5 bolsas en un día (4 h por bolsa).

Tractor de la embolsadora: este tractor está en uso cada vez que la tolva descarga grano en la embolsadora. Se asumió una capacidad de descarga promedio de 300,0 t/h y se adicionó un 20,0% del tiempo para compensar, por eventuales ineficiencias; el tiempo de trabajo del tractor de la embolsadora se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Tractor embolsadora (h)} = \frac{\text{Cantidad total granos (t)}}{\text{Capacidad descarga de la tolva } \left(\frac{\text{t}}{\text{h}}\right)} \times 1,2$$

Ec. 1

Embolsadora: el tiempo de trabajo de la embolsadora se consideró igual al de su correspondiente tractor.

Tractor de la extractora: el tractor dedicado a la extractora está en uso cada vez que se extrae grano del silo bolsa. Se asumió una capacidad de trabajo de 90,0 t/h, y se adicionó un 20,0% del tiempo para compensar por eventuales ineficiencias; el tiempo de trabajo de este tractor se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Tractor extractora (h)} = \frac{\text{Cantidad total granos (t)}}{\text{Capacidad extractora (t/h)}} \times 1,2 \quad \text{Ec. 2}$$

Extractor: el tiempo de trabajo de la extractora se consideró igual al de su correspondiente tractor.

Tractor del carro tolva: el tractor dedicado al carro tolva está en uso durante el transporte del grano desde el campo (cosechadora) hasta el silo bolsa, durante la descarga de la tolva al silo bolsa y durante el viaje de regreso vacío a la cosechadora. El número de viajes depende de la cantidad de grano a embolsar y de la capacidad de la tolva. La distancia promedio entre la cosechadora y la embolsadora se fijó en 1,5 km (3,0 km el viaje ida y vuelta), la velocidad del tractor es de 15,0 km/h y la capacidad de descarga de la tolva en 300,0 t/h. Se adicionó 20,0% del tiempo para compensar por eventuales ineficiencias. El tiempo de trabajo del tractor del carro tolva se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Tractor carro tolva (h)} = (\text{Cantidad total granos (t)} \times \text{distancia (km)}) / \text{Capacidad tolva (t)} \quad \text{Ec. 3}$$

Carro tolva: el tiempo de trabajo del carro tolva se consideró el mismo que el de su correspondiente tractor.

La dedicación de los diferentes equipos a la operación de embolsado se listan en la Tabla 2.

Tabla 2.

Uso anual del equipo (horas) y dedicación porcentual a la operación de embolsado.

EQUIPO	USO ANUAL (HORAS)	DEDICACIÓN A LA OPERACIÓN DE EMBOLSADO (%)
Embolsadora	Ec. 1	100
Extractor	Ec. 2	100
Carro tolva*	2000	Ec. 3/2000 x 100
Tractor embolsadora*	2000	Ec. 1/2000 x 100
Tractor extractora*	2000	Ec. 2/2000 x 100
Tractor carro tolva*	2000	Ec. 3/2000 x 100

* considerando las horas de uso para la operación de embolsado y otras actividades.

Amortizaciones

La amortización anual del equipamiento se calculó de la siguiente manera (Guida Daza et al., 2009):

$$\text{Amortización} = \frac{\text{Valor a nuevo} - \text{Valor residual}}{\text{Vida útil}} \times \text{dedicación (\%)}$$

Ec. 4

Interés

Para tener en cuenta el costo de oportunidad del capital invertido, fue considerada una tasa anual de interés del 3,0%.

$$\text{Interés} = \left(\frac{\text{Valor nuevo}}{2} \right) \times \text{tasa de interés dedicación (\%)}$$

Ec. 5

Costo del combustible

Se consideró que cada tractor tiene un consumo promedio de combustible de 20,0 l/h y que el precio del gasoil fue de 1,3 USD/l. Para cada tractor el consumo de combustible se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Costo combustible (USD)} = \text{tiempo dedicado al embolsado (h)} \times \text{consumo gasoil} \left(\frac{\text{l}}{\text{h}} \right) \times \text{precio gasoil} \left(\frac{\text{USD}}{\text{l}} \right)$$

Ec. 6

Mano de obra

Las tareas relacionadas al embolsado de granos se dividieron en 3 sub tareas: 1) embolsado (el operario demanda las mismas horas de trabajo que el tractor del carro tolva), 2) transporte del grano (el operario demanda las mismas horas de trabajo que el tractor del carro tolva) y 3) extracción (el operario demanda las mismas horas de trabajo que el tractor de la extractora). Se consideró un salario promedio de 2000 USD/mes y un total de 200 h de trabajo mensual. El costo de la mano de obra para cada sub tarea se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Costo mano de obra (USD)} = \frac{\text{Tiempo de la suboperación (h)}}{200 \left(\frac{\text{h}}{\text{mes}} \right)} \times \text{salario} \left(\frac{\text{USD}}{\text{mes}} \right)$$

Ec. 7

Tamaño de la operación de embolsado

El análisis económico de la operación de embolsado se realizó desde una escala pequeña (15 bolsas/año) hasta una escala grande (503 bolsas/año), utilizando siempre la misma configuración de equipo. En cada caso se consideró una mezcla de granos a embolsar (Tabla 2).

Calculador de costos

El calculador de costos de embolsado se programó primero en una planilla Excel y luego de tradujo a un lenguaje web. Esta aplicación estará pronto disponible online para el público general a través de la web del INTA.

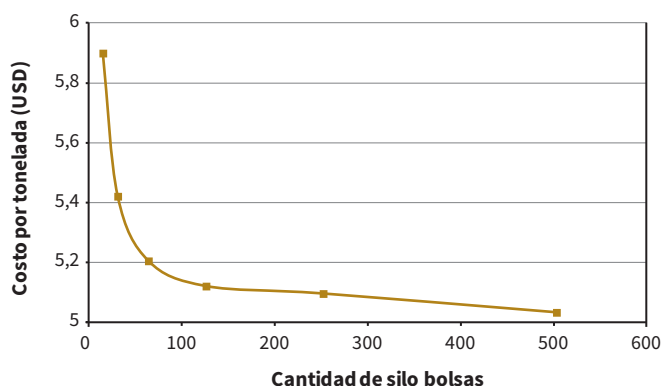
Resultados y discusión

La Figura 1 muestra el costo por tonelada de almacenar granos en silo bolsa. Como se puede apreciar, el costo por tonelada baja a medida que el número de silo bolsas incrementa, desde 5,9 USD/t para 15 bolsas/año a 5,0 USD/t para 500 bolsas/año. Este efecto era esperado y es el resultado de distribuir los costos fijos en un mayor número de toneladas. La reducción de costos a medida que aumentan las toneladas embolsadas es marcado hasta un poco más de 100 silo bolsas/año. A partir de allí, aumentar el número de bolsas que se hacen por año reduce los costos por tonelada en muy baja magnitud. Esto puede explicarse debido a la baja proporción de los costos fijos en la estructura general de costos, en comparación con los costos variables.

La Figura 2 muestra la composición de costos para una operación de embolsado de 126 silo bolsas/año (23300 t). Las bolsas representan el 59,0% del costo total, el combustible el 24,0% y la mano de obra el 13,0%, con lo cual los costos variables representan el 96,0% del costo total de embolsado. Por otra parte, los costos fijos representan solo el 4,0% del total, divididos en costos de mantenimiento (1,0%), intereses (1,0%) y amortizaciones (2,0%).

Figura 1.

Costo de almacenamiento de granos en silo bolsas (USD/t) para operaciones de diferentes escalas.



La Figura 3 muestra el costo de almacenamiento por tonelada de los diferentes granos considerados con base en una operación anual de 126 silo bolsas. Como es esperable, los granos que tienen menor peso hectolítrico (tales como el girasol o el arroz) tienen un costo asociado mayor, ya que es menor la cantidad de grano que se puede almacenar en cada silo bolsa. El costo por tonelada varía entre 4,2 USD/t a 4,6 USD/t (para trigo, maíz, soja y cebada) a 6,9 USD/t (para girasol o arroz).

Es importante remarcar que para comparar el costo de hacer bolsas en el propio establecimiento versus mandar el grano directamente al acopio se deben tener en cuenta otros aspectos económicos. Estos deben incluir el costo del transporte desde el campo hasta el acopio, costos de comercialización, costos de control de calidad y cantidad entregada, etc. También es importante resaltar que el presente artículo no tiene la intención de hacer un análisis de inversión en maquinaria para el embolsado, el cual se debería realizar a través de un análisis de inversiones y no a través de una estructura de costos.

Figura 2.
Composición porcentual de costos para una actividad de embolsado de 126 silo bolsas por año (23300 t).

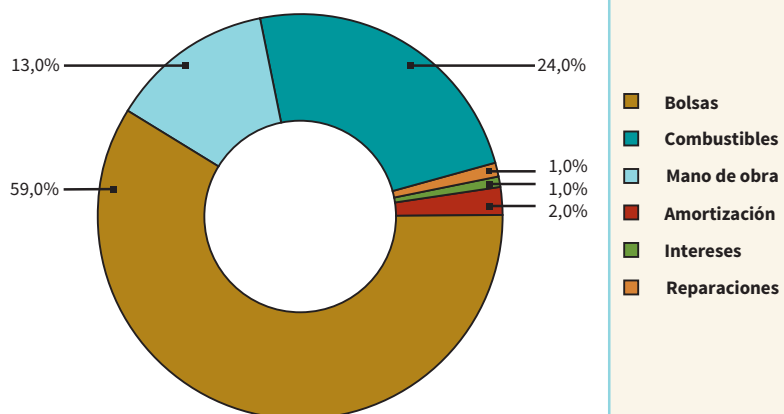
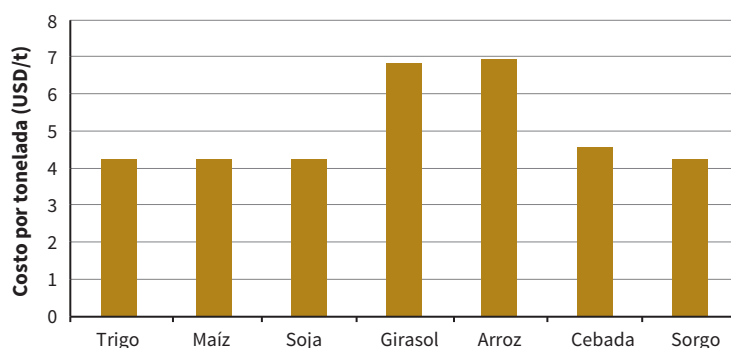


Figura 3.
Costo de almacenamiento (USD) por tonelada para diferentes granos para una operación de 126 silo bolsas/año.



Costo promedio total: 5,0 USD/t

Conclusiones

Se desarrolló una aplicación para calcular el costo de embolsado de granos en silo bolsas, basada en una configuración de equipo de embolsado típico para Argentina, el cual incluyó 1 embolsadora, 1 carro tolva autodescargable, 1 extractora y 2 tractores. El costo decreció desde 5,9 USD/t para 15 bolsas/año a 5,0 USD/t para 500 bolsas/año. El costo no cambia sustancialmente a medida que aumenta el número de bolsas, y más allá de las 100 bolsas por año permanece casi constante. Esto es debido a que la proporción de costos fijos es muy baja respecto de los costos variables. Para una operación de embolsado de tamaño medio (126 bolsas/año), las bolsas representan el 60,0% del costo total,

la mano de obra el 13,0% y el combustible el 24,0%. Por otra parte, los intereses, el costo de mantenimiento y la amortización de la maquinaria solo representan el 3,0% del total. El costo de almacenamiento por tonelada es variable según el tipo de grano, variando entre 4,2 USD/t a 4,6 USD/t (para trigo, maíz, soja y cebada) a 6,9 USD/t (para girasol o arroz).

Esta aplicación puede ser utilizada para que los usuarios de silo bolsa puedan calcular su propio costo de embolsado, basados en su propia estructura de costos, modalidad de uso de la maquinaria, precios relativos de combustible, mano de obra, etc.

Referencias

- Bartosik R; Rodríguez J; de la Torre D. y Cardoso L. 2009. AireAr: a new software for sizing aeration fans. En: CIGR Section V International Symposium, 1 - 4 de septiembre, Rosario, Argentina.
- Bartosik R. 2012. An inside look at the silobag system, pp. 117 – 128. En: Navarro S.; Banks H.J.; Jayas D.S.; Bell C.H.; Noyes R.T.; Ferizli A.G.; Emekci M.; Isikber A.A. y Alagusundaram K. (Eds.). Proceedings of the 9th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products, 15 - 19 de octubre, Antalya, Turquía.
- Buzzato P.; Berruto R.; Cardoso L. y Bartosik R. 2011. Logistics and economics of grain harvest and transport systems with the use of silo bag. ASABE Paper N.º 1100019. ASABE Annual International Meeting, 7 - 10 de Agosto, Louisville, Kentucky, EEUU.
- Cardoso L.; Bartosik R. y Milanesio D. 2009. Phosphine concentration change during fumigation in hermetic plastic bags (silo - bags). En: Proceedings of the International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. Conference, Technology and Management to Increase the Efficiency in Sustainable Agricultural Systems, 1 - 4 septiembre, Rosario, Argentina.
- Cardoso L.; Bartosik R.; Campabadal C. y de La Torre D. 2012. Air - tightness level in hermetic plastic bags (silo - bags) for different storage conditions, pp. 583 - 589. En: Proc. of 9th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 15 - 19 de octubre, Antalya, Turquía.
- Ghida Daza C.; Alvarado P.; Castignani H.; Caviglia J.; D'Angelo M.; Engler P.; Giorgetti M.; Iorio C.; y Sanchez C. 2009. Indicadores económicos para la gestión de empresas agropecuarias. Bases metodológicas. Estudios Socioeconómicos de la Sustentabilidad de los Sistemas de Producción y Recursos Naturales. Ediciones INTA, N° 11. ISSN1851 - 6955.

7

Miscelánea

Secado con aire a baja temperatura de granos de maíz almacenado en silo bolsas

Cristiano Casini¹
Ricardo Accietto²
Mauricio Santa Juliana¹

Resumen

En las últimas campañas agrícolas, Argentina produjo entre 89,0 y 95,0 millones de toneladas de cereales y oleaginosas, de las cuales entre 40,0 y 43,0 millones se almacenaron en silo bolsas. Se estima que, de esas bolsas, un 12,0% presenta algún tipo de inconveniente en la calidad de los granos debido a fallas en el empleo de la tecnología. Dentro de los problemas más importantes se encuentra el almacenamiento de granos con un contenido de humedad (CH) superior al establecido para un conservación segura. El objetivo de este trabajo es desarrollar y probar un sistema práctico y viable para reducir los niveles de humedad de granos almacenados en silo bolsas, en el orden de 1,0 a 2,0 puntos porcentuales, en un lapso de tiempo donde no se vea comprometida la calidad de los granos. Se almacenó maíz con alto CH en silo bolsa, a la cual se le aplicó un sistema de aireación para secar los granos con un alto caudal de aire a temperatura ambiente. Se tomaron muestras en diversos puntos a lo largo de la bolsa, en sus laterales y a diferentes profundidades dentro del silo bolsa. Sobre esas muestras se determinó el CH de los granos y peso hectolítrico.

En general se detectó una disminución en los valores de humedad y un leve incremento en el peso hectolítrico. Por los resultados obtenidos, la aireación en silo bolsa es posible en términos de eficiencia, especialmente para productos de alto

¹INTA EEA Manfredi (Córdoba), Argentina.

²Fac. Ciencias Agrarias – UNC (Córdoba), Argentina.

valor económico, como ser poroto, maní, maíz pisingallo, semillas, arroz, garbanzo, cebada cervecera, etc.

Palabras clave: silo bolsa, granos húmedos, secado a baja temperatura, aireación, Argentina.

Introducción

Según un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la mayoría de los granos comestibles cosechados en las zonas cálidas se pierde debido a los inadecuados sistemas de manejo, almacenaje y técnicas de procesamiento. Se estima que la pérdida global alcanza entre un 10,0% - 30,0%, y en algunas regiones del mundo puede llegar hasta un 50,0% de la producción.

En Argentina se estima que, del total de los silos bolsa instalados cada año, aproximadamente un 46,0% se encuentran en perfecto estado, un 42,0% tienen inconvenientes menores y un 12,0% presentan algún problema que potencialmente podría afectar la calidad del grano. Entre las principales causas de las pérdidas en este sistema de almacenaje se cita la excesiva humedad del grano. El almacenaje de grano húmedo se da sobre todo cuando el silo bolsa se usa a campo; puede producirse por diversos motivos: cosecha del grano húmedo para reducir los niveles de pérdidas de grano durante esta labor, para realizar liberación temprana de lotes, y con mayor frecuencia, la imposibilidad de disminuir la humedad de grano a campo debido a las condiciones climáticas. A la cosecha de grano húmedo se suma el hecho de que, generalmente, los productores no cuentan con instalaciones para secar el grano previamente al embolsado.

Durante el almacenaje, el alto contenido de humedad (CH) de los granos provoca inevitablemente una mayor actividad metabólica de microorganismos y del propio grano. Esto, durante el almacenaje produce el deterioro de diferentes parámetros de calidad. El secado del grano previo al almacenaje (o de manera rápida durante el almacenaje), permite que el grano pueda ser almacenado con un bajo riesgo de deterioro, principalmente, por una baja actividad de los hongos del almacenaje.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar un sistema de secado con aire natural instalado en un silo bolsa de maíz con CH superior al establecido como el de humedad de almacenamiento seguro (14,5%).

Materiales y métodos

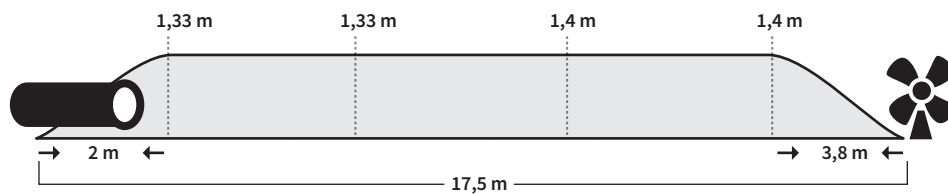
Para este trabajo se emplearon 46,7 toneladas de maíz con un CH promedio de 15,8%, provenientes de la cosecha 2010/2011. Este grano fue almacenado en un silo bolsa de 2,7 m de diámetro, ocupando una extensión total de 17,5 m. Para la realización del ensayo se dejaron ambos extremos de la bolsa libres, con 4,0 metros de plástico remanente en cada caso. En uno de los extremos del silo bolsa se colocó un aireador, y en el otro extremo un tubo de admisión de aire (Figura 1).

Se utilizó un aireador centrífugo de 15,0 HP de potencia (2850 RPM), la instalación del mismo se realizó para que funcione aspirando (succionando) aire del silo bolsa. En la bri-

da de admisión se adosó un túnel metálico de forma similar al que posee el silo armado. Esto realizado fue a los efectos de conducir mejor el aire hacia la admisión, evitando que el aireador succione el plástico dentro del ventilador, además de permitir mayor homogeneidad en la distribución del aire dentro del silo bolsa. Dicho túnel fue diseñado de manera tal de presentar un ángulo inferior a 30° para evitar turbulencias durante el pasaje de aire; posee 2,5 m de largo en su base, una altura mayor de 1,4 m y una altura menor (en la unión con la brida) de 0,8 m; el diámetro en la admisión es de 0,6 m y la altura desde la base al centro de la admisión es de 0,5 m.

Figura 1.

ESQUEMA DE MONTAJE DEL SISTEMA DE AIREACIÓN EN EL SILO BOLSA



Para hacer un uso eficiente del sistema, se incorporó un controlador de aireación (marca Novus modelo N322RHT), cuya función fue encender o apagar el aireador de acuerdo a las condiciones de humedad relativa y temperatura ambiente. Fue programado para encender el ventilador solo cuando la humedad relativa del ambiente fuera igual o inferior al 60,0% y no se estableció un rango de corte por temperatura. El dispositivo tenía además un reloj contador, donde se registraron las horas reales de funcionamiento del ventilador.

En el otro extremo del silo bolsa se colocó un tubo, de 0,6 m de diámetro y 1,0 m de largo, para la entrada de aire (admisión) dentro del silo bolsa. Dicho tubo tenía una altura de 0,15 m del suelo, en el extremo que está afuera de la bolsa, y una altura de 0,2 m dentro de la bolsa, para evitar la entrada de agua, roedores e insectos al interior de la bolsa.

El ensayo se inició el día 24 de noviembre de 2011 y se dio por finalizado el día 05 de enero de 2012, es decir un total de 1014 horas (43 días). En dicho período el ventilador funcionó efectivamente unas 387 horas (equivalente a 16 días), registrándose durante ese lapso de tiempo los siguientes caudales de aire:

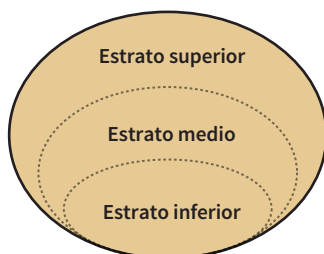
- Caudal de aire (admisión) = 45,8 m³/minuto; caudal específico = 1,0 m³/min/t.
- Caudal de aire (salida) = 54,7 m³/minuto; caudal específico = 1,1 m³/min/t.
- Velocidad aparente en el interior del silo = 10,6 m/min ó 0,2 m/segundo.

Se establecieron sobre el silo bolsa un total de 8 puntos de muestreo, distribuidos en ambos lados de la bolsa, denominados para este ensayo lado Izquierdo y lado Derecho. En cada uno de estos puntos se extrajeron muestras previamente al inicio del ensayo (denominado muestreo inicial), el día 24 de noviembre de 2011. Posteriormente, se extrajeron muestras a los 22 días, 27 días, 29 días y 43 días desde inicio del almacenaje. En este momento se dio por finalizado el proceso de aireación y se retiraron los equipos, sellándose inmediatamente el silo bolsa. Posteriormente el día 23 de febrero, 92 días después del inicio

(y 49 desde finalizando del proceso de aireación) se realizó la sexta y última extracción de muestras, para ver posibles efectos de estabilización de la humedad dentro del silo bolsa. Cada uno de los 6 muestreos que se realizó sobre los 8 puntos demarcados en el silo bolsa. En cada punto se realizaron 3 extracciones mediante calador sonda. Dichas extracciones se dividieron en estrato superior, medio e inferior, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2.

CORTE ESQUEMÁTICO TRANSVERSAL DEL SILO BOLSA, CON LOS ESTRATOS DE MUESTREO POR PUNTO



Sobre cada muestra se determinó CH, en estufa por triplicado según normativa ASAE. También se determinó por triplicado el peso hectolítrico y la temperatura del grano mediante el uso de un equipo de capacitancia (Dickey John, modelo GAC 500). El valor de peso hectolítrico también se determinó por el método de la balanza de Shopper.

Resultados y discusión

Se observó en los 8 puntos de muestreo, y dentro de cada punto en los 3 estratos que los componían (superior, medio e inferior), una baja en la humedad de los granos, desde el inicio hasta la finalización del ensayo (a los 43 días). Esa baja fue del siguiente orden:

- **Sector superior:** el CH al final del proceso de aireación disminuyó, con respecto al CH encontrado al inicio de la aireación, en 2,9 puntos porcentuales (promedio de 3 repeticiones por punto) en los 8 puntos de muestreo.

Para el mismo sector la humedad en el muestreo final fue de 2,8 puntos porcentuales menos con respecto al CH inicial, es decir, una humedad muy similar a cuando se terminó el proceso de aireación.

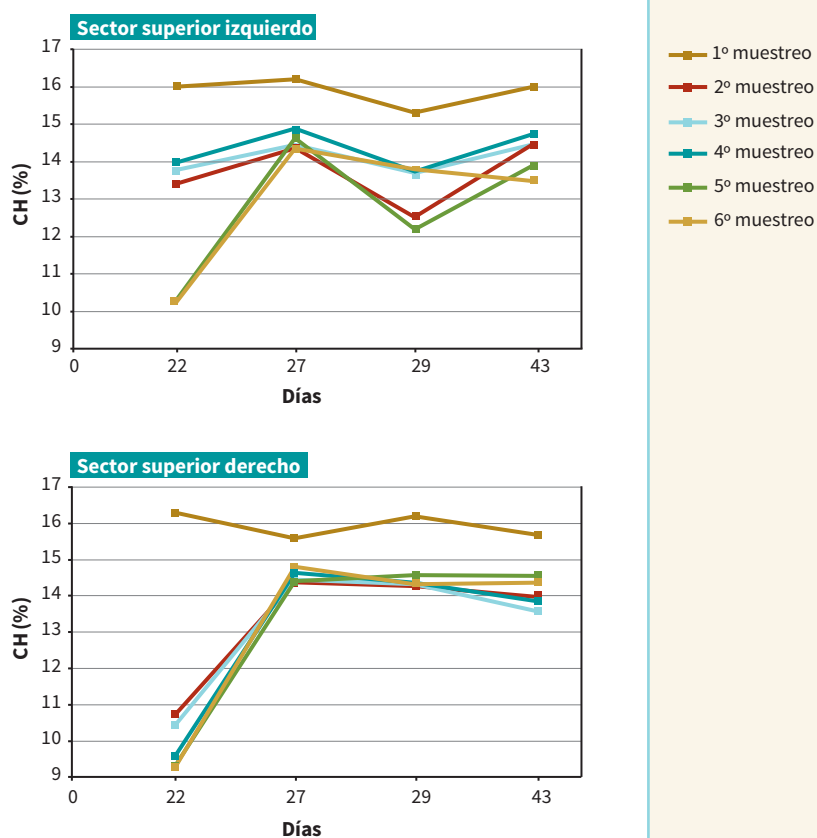
- **Sector medio:** en este sector el CH al final del proceso de aireación (05/01/2012) disminuyó 1,6 puntos porcentuales con respecto al CH encontrado al inicio de la aireación.

Para este sector no se observó un cambio en el CH de los granos posterior al fin de la aireación, ya que la diferencia entre el muestreo final y el CH inicial es similar a la que posee este con el quinto muestreo, es decir, 1,6 puntos porcentuales. (Figura 4).

- **Sector inferior:** el CH al final del proceso de aireación (05/01/2012) disminuyó 1,8 puntos porcentuales con respecto al valor de humedad encontrado al inicio de la aireación.

Figura 3.

Contenido de humedad del grano (CH, %) en el sector superior para ambos lados del silo bolsa.



Para este sector se observó un cambio en el CH de los granos posterior al quinto muestreo, ya que la diferencia entre este y el valor de humedad inicial es de 1,2 puntos porcentuales (Figura 5). Por otra parte existe una diferencia de 0,6 puntos porcentuales entre el quinto y el sexto muestreo.

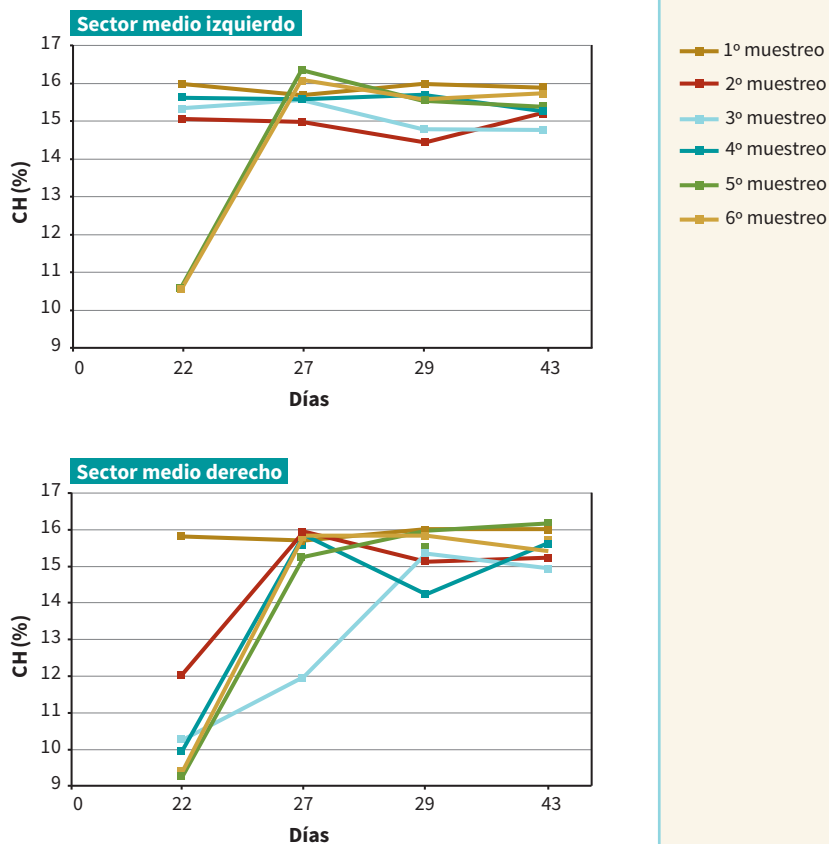
En los puntos adyacentes a la admisión de aire dentro del silo bolsa (punto 1 lado Derecho y lado Izquierdo) y sus 3 estratos correspondientes (superior, medio e inferior), se observó una fuerte baja en CH del grano. En el sector superior del punto 1 (ambos lados) la baja de la humedad es en promedio de 6,4 puntos porcentuales, entre el día 23 de noviembre de 2011 y el día 05 de enero de 2012. Para el estrato medio de dichos puntos, la baja en el CH es del orden de los 5,9 puntos porcentuales y en el sector inferior se observó un baja en el CH de 5,0 puntos para el mismo período.

No obstante se observa una leve tendencia a la estabilización del CH de la masa de granos en algunos sectores de muestreo, requiriéndose investigaciones con mayores períodos de tiempo para poder determinar la presencia y magnitud de ese efecto en silo bolsas.

A continuación se detallan las Figuras 6 y 7, donde se grafican las condiciones de humedad relativa del ambiente (HR) y de temperatura registrados en el lugar de emplaza-

Figura 4.

Contenido de humedad (CH, %) del grano en el sector medio para ambos lados del silo bolsa.



miento del silo bolsa durante el período del ensayo. Las condiciones ambientales se caracterizaron por una fuerte sequía y altas temperaturas, donde solo se registró la caída de 72 mm de agua durante el período de aireación.

Con respecto al peso hectolítrico, la otra variable objeto de estudio, en general se observó un incremento en dicho parámetro para todos los puntos y estratos. Este incremento es mucho mayor para los sectores donde se produjo una baja importante de la humedad, principalmente en el sector 1. Dicho aumento fue del orden de 4,0 puntos porcentuales para el sector 1 Derecho y de 1,7 puntos para el sector 1 Izquierdo. En los restantes puntos el incremento fue (promedio para ambos lados) de 0,6 puntos porcentuales. Las mayores diferencias entre valores de peso hectolítrico se dan en los 3 sectores del punto 1, lado derecho. Dentro del mismo punto, el estrato superior mostró un incremento de 3,3 puntos porcentuales, el estrato medio de 3,0 puntos y el estrato inferior de 4 puntos. Cabe destacar que dicho sector fue el que mostró la mayor baja en el CH final del grano. El punto 1 del lado Izquierdo mostró un incremento de 2,7 puntos porcentuales para el estrato superior, de 1,0 punto para el estrato medio y de 1,4 puntos para el estrato inferior.

Figura 5.

Contenido de humedad (CH, %) de los granos en el sector inferior a ambos lados del silo bolsa.

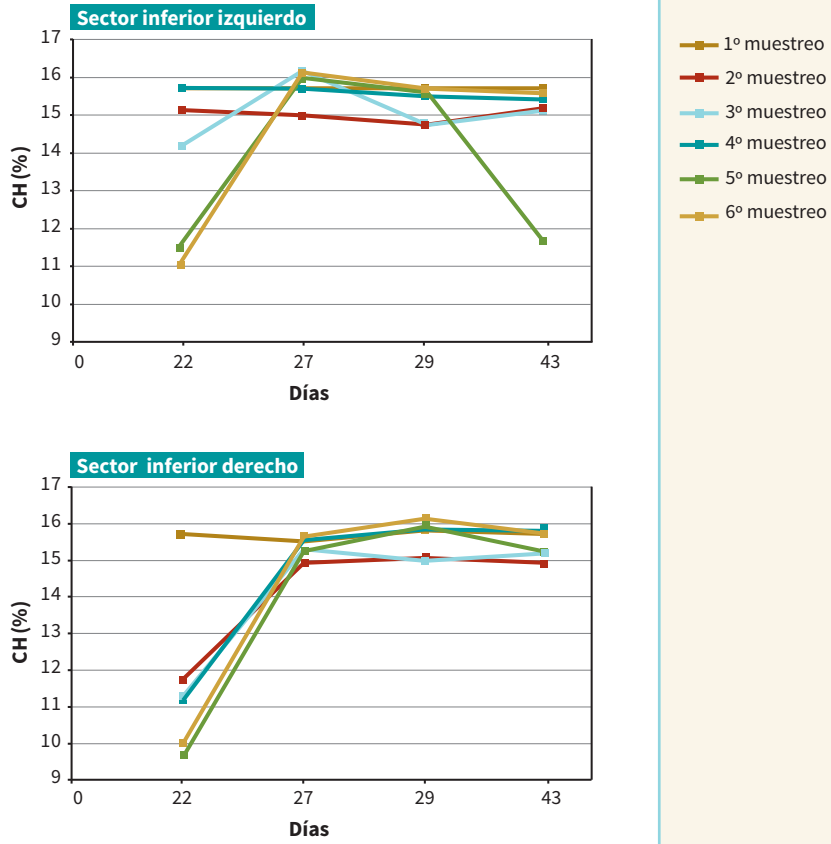


Figura 6.

Temperaturas máximas, mínimas y medias (°C) registradas durante el período del ensayo.

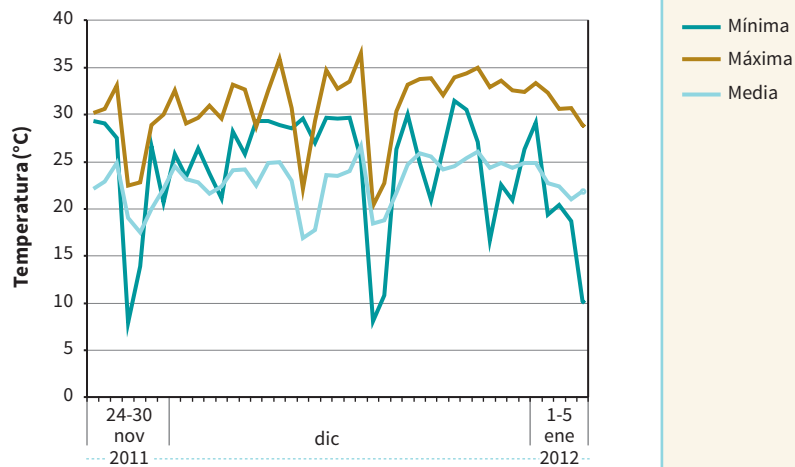


Figura 7.

Humedad relativa (HR, %) del ambiente promedio registrada durante el período del ensayo.

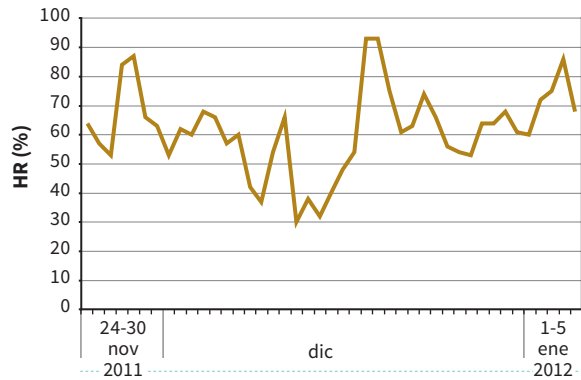


Figura 8.

Evolución del peso hectolítrico (kg/hl) en el sector derecho del silo bolsa.

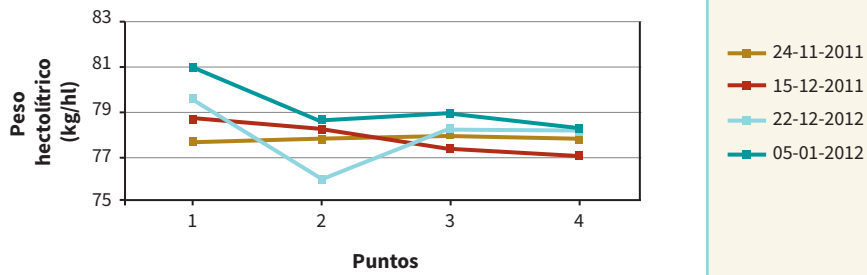
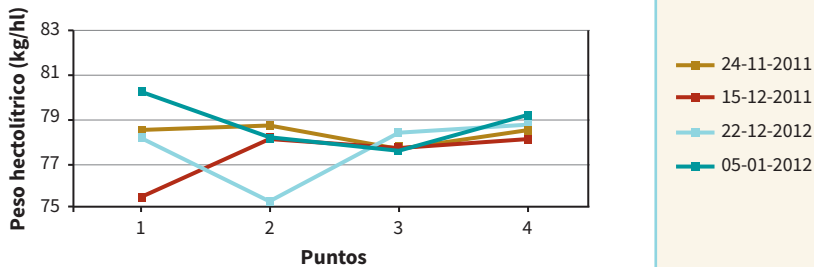


Figura 9.

Evolución del peso hectolítrico (kg/hl) en el sector izquierdo del silo bolsa.



Conclusiones

El caudal específico de aire obtenido en el ensayo varió entre 1,0 - 3,0 m³/min/t, caudales que se encuentran entre los recomendados para el secado con aire natural en silos convencionales.

Para las condiciones de este ensayo, con dicho caudal se pudo lograr reducir el CH de los granos de maíz en toda la masa de granos.

A partir del análisis de los datos de CH se observa una canalización del aire por la parte superior de la bolsa. Como era de esperar, la pérdida de humedad es aún mayor en los sectores aledaños a la admisión de aire dentro de la bolsa.

En base a la información obtenida se observa que el sistema fue eficiente para los propósitos establecidos. También se notó que el tiempo de aireación se podría haber reducido al segundo muestreo, ya que el CH promedio de todos los puntos muestreados fue de 14,3%, cercano a lo establecido como humedad segura de almacenamiento.

El peso hectolítrico también se modificó, incrementándose a medida que se removía la humedad de los granos. En la medición de esta variable también se observa el efecto de canalización del aire dentro de la bolsa.

No se observó, en el período de estudio, un proceso de estabilización de la humedad dentro del silo bolsa. Probablemente, el tiempo entre el fin del proceso de aireación y la toma de la última muestra no fue lo suficientemente extenso como para detectar dicho proceso. No obstante se observa una leve tendencia en algunos sectores de muestreo.

Por los resultados obtenidos, la aireación en silo bolsa es posible en términos de eficiencia, especialmente para productos de alto valor económico, como ser poroto, maní, maíz pisingallo, semillas, arroz, garbanzo, cebada cervecera, etc.

Es necesario profundizar la investigación con el fin de ajustar la metodología utilizada.

Referencias

- Banks H.J.; Annis P.C. y Rigby G.R. 1990. Controlled atmosphere storage of grain: the known and the future, pp. 695 - 707. En: Fleurat - Lessard F. y Ducom P. (Eds.), Proc. 5th Intl. Working Conf. Stored - Prod. Prot., Imprimerie Médocaine, Blanquefort Cedex, Francia.
- Bartosik R.E.; Rodríguez J.C.; Malinarich H.E. y Maier D.E. 2002. "Silobag": evaluation of a new technique for temporary storage of wheat in the field, pp. 1018 - 1023. En: Proceedings of the 8th International Working Conference on Stored Product Protection, York, Inglaterra.
- Bartosik R.E.; Rodríguez J.C.; Malinarich H. y Cardoso L.M. 2009. Almacenaje de maíz, trigo, soja y girasol en bolsas plásticas herméticas, pp. 2 - 14. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.), Almacenamiento de granos en bolsas plásticas, Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Bourne M.C. 1977. Post - harvest food losses - the neglected dimension in increasing the world food supply. New York, Cornell University International Agriculture, 53 p.
- Calderón M. y Barkai - Golan R. 1990. Food preservation by modified atmospheres. CRC Press Boca Ratón, Florida, EE.UU.
- Cardoso L.M.; Bartosik R.E.; Rodríguez J.C. y Ochandio D. 2008 a. Factores que afectan la concentración de dióxido de carbono en el aire intersticial de soja almacenada en bolsas plásticas herméticas, pp. 41 - 46. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y

- Bartosik R. (Eds.), Almacenamiento de granos en bolsas plásticas, Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
- Cardoso L.M.; Bartosik R.E. y Rodríguez J.C. 2008 b. Estudio de la evolución de la humedad de los granos individuales en silo - bolsas de maíz y soja, pp. 23 - 33. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.). Almacenamiento de granos en bolsas plásticas, Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
 - Casini C. 2002. Guía para almacenar grano en bolsas plásticas. Información técnica Proyecto Eficiencia de Cosecha y Poscosecha de Grano. INTA Manfredi, 4 p.
 - Casini C. y Santa Juliana D.M. 2007. Determinación del efecto de la humedad de maíz sobre la concentración de oxígeno y dióxido de carbono en bolsas plásticas, pp. 153 - 160. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.), Almacenamiento de granos en bolsas plásticas, Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
 - Dell'Orto Trivelli H.C. y Arias Velazquez J. 1985. Insectos que dañan los granos y productos almacenados. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Serie Tecnología Poscosecha N°4.
 - Demmers T.G.M.; Burgess L.R.; Short J.L.; Philips V.R.; Clark J.A. y Wathes C.M. 1999. Ammonia emissions from two mechanically ventilated UK livestock buildings. *Atmospheric Environment*, 33(2): 217 - 227.
 - Luque R. y Casini C. 2003. Estudio del efecto de la media sombra sobre la calidad de los granos almacenados en bolsas plásticas, pp. 94 - 98. En: Casini C.; Rodríguez J.C. y Bartosik R. (Eds.), Almacenamiento de granos en bolsas plásticas, Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 180 p.
 - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
 - Tecnologías Agroindustriales - Procesamiento de Cereales. Disponible en: http://www.fao.org/inpho/content/documents/vlibrary/new_else/x5693s/x5693s01.htm: accedido en mayo de 2009.
 - Rodríguez J.C.; Bartosik R.E.; Malinarich H.D.; Exilart J.P. y Nolasco M.E. 2001.
 - Estudio de la calidad de granos de soja con distintas humedades. Manual técnico N° 3 Soja. Eficiencia de Cosecha y Poscosecha, 221 p.
 - Rodríguez J.C. y Bartosik R.E. 2006. Aireación de granos almacenados. Información técnica Proyecto Eficiencia de Cosecha y Poscosecha de Grano, INTA Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
 - Santa Juliana D.M. y Casini C. 2008. Estudio de la concentración de dióxido de carbono y oxígeno en maíz (*Zea mays*) almacenado en bolsas plásticas. *Datos no publicados*.

Estudio del almacenamiento de granos en bolsas plásticas para pequeños agricultores

Cristiano Casini¹
Mauricio Santa Juliana¹
Sebastián Audicio²

Resumen

Durante la etapa de almacenamiento existen una serie de factores que inciden negativamente en la calidad y la cantidad del producto a guardar, entre estos se encuentran los insectos plagas de granos almacenados. En el manejo de granos a gran escala existen una serie de herramientas que son efectivas para mantener el nivel de las poblaciones de las plagas por debajo de un umbral de daño aceptable. Por otra parte, a nivel de pequeños productores, son escasos los métodos eficientes y seguros para el control de insectos, lo cual puede ocasionar pérdidas totales de la producción. Se ha estudiado el almacenamiento de granos en silo bolsa para producciones extensivas. En el interior del silo bolsa se genera una atmósfera modificada (aumento en la concentración de CO₂ y disminución de O₂). En general, el grado de modificación atmosférica está en relación con la humedad y la temperatura del producto a almacenar. Si esta modificación atmosférica es grande, permitirá controlar la actividad de insectos y hongos, ya que estos son organismos aerobios. Sin embargo, en los casos donde se produce esta modificación atmosférica por actividad respiratoria en el granel, generalmente se observa un deterioro del grano (principalmente debido a la actividad de hongos) antes de que la actividad respiratoria se detenga. Una situación donde el grano se encuentre en un ambiente rico en CO₂ y pobre en O₂, sin que esto signifique una pérdida en la calidad del grano, se plantea como una situación ideal de almacenaje. Se establece como objetivo de este trabajo estudiar la evolución de poblaciones de insectos plagas en grano de maíz (*Zea mays*) seco (11,4% de humedad) almacenado en pequeñas bolsas plásticas herméticas de (40,0 kg de capacidad), con un ambiente rico en CO₂, aportado por un biogenerador (material húmedo). El resultado del experimento demostró que este método es eficiente para el almacenamiento de maíz seco, con un buen control de insectos en forma orgánica; esto constituye un método inédito y de bajo costo para productores de muy baja escala.

Palabras clave: bolsa plástica, control de insectos, pequeños agricultores, maíz.

¹INTA EEA Manfredi (Córdoba) Argentina.

²Estudiante FCA – UNC (Córdoba) Argentina.

Introducción

Según un informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) se pierde, debido a los inadecuados sistemas de manejo almacenado y técnicas de procesamiento, entre un 10,0% y un 30,0% de la mayoría de los granos comestibles cosechados en las zonas cálidas. Incluso en algunas regiones del mundo, las pérdidas pueden llegar hasta el 50,0% de la producción. No solo se debe considerar dentro de estos porcentajes el daño físico, ocasionado por la fricción mecánica entre los granos, la trilla o el transporte de los mismos, sino que también se debe tener en cuenta las pérdidas por procesos biológicos que afectan diferentes propiedades de calidad del grano. En este sentido, es importante considerar las condiciones de almacenamiento, ya que pueden causar el deterioro de los granos. Las altas temperaturas y elevada humedad propician el crecimiento de hongos y, en menor medida, el desarrollo de insectos que dañan el grano almacenado. Estas son las causas más comunes e importantes por las cuales se producen pérdidas durante la poscosecha.

Con respecto a los insectos, existen unas 80 especies que son agresivas para los granos. Dependiendo de las especies, los insectos pueden alimentarse de grano entero o restos de grano. Los daños en el grano incluyen pérdida de peso, degradación de nutrientes, deterioro del poder germinativo y disminución del valor comercial. Como ejemplo de lo antepuesto se cita que adultos de *Sitophilus oryzae* (L.) consumen el 26,0% del grano donde se desarrolla, y en el caso de *Sitophilus granarius* (L.) consume el 56,0% (Dell`Orto Trivelli y Arias Velazquez, 1985). Los mismos autores determinaron también, bajo condiciones de laboratorio, que una larva de *Sitophilus oryzae* (L.) consume el 1,6% del peso del grano de trigo a los 9 días y consume el 39,7% a los 72 días. Además del daño por consumo, los insectos generan daños denominados secundarios, estos comprenden el calentamiento y migración de la humedad, la distribución de hongos y otros microorganismos, dado que su actividad incrementa la humedad y mejora las condiciones para que las esporas de los hongos se desarrollen. Actúan también como vía de transporte para micotoxinas. Son además, transmisores de enfermedades que afectan a los seres humanos, como por ejemplo enfermedades de la Tenia, infecciones intestinales como ascariasis, miasis y cantoriasis. También pueden producir dermatitis de los granos, provocada por gorgojos y ácaros que los infectan. A todo esto se debe sumar la contaminación de los granos (por los propios desechos de los insectos o por residuos de insecticidas) y los costos por tratamientos con productos químicos (Yanucci, 1998). En general, el ciclo de vida de estas plagas es, en promedio, de 4 a 8 meses (dependiendo de la especie), y cada hembra pone de 300 a 400 huevos en el germen o en la zona amilácea; el ciclo de huevo a adulto es de 35 días aproximadamente, dependiendo de las condiciones ambientales. Las temperaturas óptimas para su desarrollo están entre los 22,0 °C y 34,0 °C, lo cual hace que sean cosmopolitas y de rápida difusión. Estas características de los insectos hacen que su control, para que resulte efectivo, implique la aplicación serie de prácticas en forma de un manejo integrado. A nivel de pequeños agricultores el manejo debe ser adaptado a la escala y a los problemas típicos que el sistema de poscosecha ofrece. En muchos lugares el diseño y los materiales utilizados para el almacenaje de granos varían de acuerdo a los recursos locales. Esto, en la mayoría de los casos, no permite un manejo adecuado para la preservación de la calidad, ni la correcta implementación de medidas de control para las plagas que los afectan.

Como requisito de funcionalidad, las estructuras de almacenaje deben presentar un diseño que facilite los controles y sobre todo que mantenga aislado al producto a almace-

nar. Es importante que no posean rasgaduras o fisuras que sirvan de hábitat a las diferentes clases y estadios de plagas. En tal sentido, la implementación del uso de silo bolsas, para el almacenamiento de granos a gran escala, ha permitido cumplir con estos requisitos, ya que la bolsa actúa como una barrera física a la entrada de los insectos. Además, durante el almacenaje se genera una automodificación de la atmósfera intergranaria en el interior de la misma, generando condiciones no propicias para el desarrollo de insectos y de hongos (Casini, 2002). Sumado a esto, está el hecho de que un silo bolsa solo se utiliza una vez, por lo tanto, no se constituyen como reservorios de focos de infestación de plagas. Estas bolsas están construidas con polietileno de baja densidad, de 235 μm de espesor (aproximadamente) conformada por 3 capas y fabricada por el proceso de extrusado simple. La capa exterior es blanca y tiene aditivos, filtros de radiación UV y dióxido de titanio para reflejar los rayos solares. La capa intermedia es neutra y la interior tiene un aditivo (negro de humo) que es protector de los rayos UV y evita la penetración de la luz. La composición de la bolsa hace que sea impermeable al pasaje de agua y tiene un alto nivel de hermeticidad a los gases. Esta característica hace que la composición de los gases dentro del granel varíe. El grado de dicha modificación depende de factores tales como humedad y temperatura, ambos factores condicionantes de la respiración de los componentes bióticos del granel (granos, hongos, bacterias, levaduras e insectos). El contenido de humedad (CH) de los granos provoca, indefectiblemente, una mayor actividad metabólica, generación de calor, mayor respiración y mayor producción de CO_2 . Con respecto a la temperatura, incrementos en la misma generan también aumentos en la respiración. Cuando estos procesos ocurren en el interior de los silo bolsas, se generan cambios en las concentraciones de los gases que atenúan el deterioro de los granos por ausencia de O_2 , mejorando su conservación por reducción de los procesos de oxidación (Hall, 1980). A su vez, al variar las concentraciones de los gases de la atmósfera que rodea a los granos, se genera un control orgánico de hongos e insectos, ya que estos son los primeros que sufren el exceso de CO_2 y falta de O_2 , controlándose huevos, luego las larvas, los adultos y finalmente las pupas (Navarro y Donahaye, 1993). Dada la hermeticidad del sistema, generalmente no se usan insecticidas para el control de insectos y el riesgo de desarrollo de micotoxinas es muy bajo si se mantiene la bolsa intacta.

El uso de sistemas herméticos a baja escala se plantea como una alternativa viable para mejorar la eficiencia de almacenaje con una baja demanda de recursos.

Por tal motivo, el siguiente trabajo tiene como objetivo estudiar un sistema de almacenamiento seguro de granos de maíz con un CH, para un almacenamiento seguro, inferior al 14,0%, en bolsas plásticas herméticas de 40,0 kg de capacidad, como sistema adaptable a pequeños productores. En este sistema se incorpora maíz húmedo (con un CH del 20,0%) y plantas de sorgo verde cortapisado, colocados en pequeñas bolsas con perforaciones en toda su área (bolsas cribadas) para provocar una mayor concentración de CO_2 en el interior de la bolsa de 40,0 kg, con el fin controlar naturalmente insectos.

Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental Agropecuaria INTA Manfredi, provincia de Córdoba.

Para el ensayo se utilizó maíz (Pionner 31Y05R) procedente de campo, el cual poseía al momento de ser almacenado un CH promedio de los granos de 11,4%, y una temperatura del orden de los 23,2 °C. El ensayo se emplazó en una habitación cerrada a los efectos de mantener un ambiente estable entre los 18,0 °C y 25,0 °C (favorable para el desarrollo de los insectos).

El ensayo comenzó en agosto de 2009, y se dio por concluido en octubre del mismo año, a los 64 días de comenzado. La temperatura al final del ensayo fue de 21,6 °C en promedio, valor que se encuentra entre los límites óptimos para el desarrollo de los insectos, dependiendo de la especie, estadio de desarrollo de la misma y CH del grano.

Para este ensayo se utilizaron bolsas del mismo tipo que los silo bolsas convencionales, (polietileno de baja densidad, de 235 µm de espesor) de 55,0 cm de ancho por 130,0 cm de alto.

A los efectos de aumentar la concentración de CO₂ en el interior de las bolsas se utilizaron pequeñas bolsas elaboradas del mismo material con el que se realizaron las bolsas de 40,0 kg de capacidad. Estas bolsas más pequeñas se realizaron en 2 dimensiones, para el caso del tratamiento con maíz húmedo las medidas fueron 13,0 cm por 65,0 cm con un volumen aproximado de 2000 cm³, y para las del tratamiento con sorgo cortapicado las medidas fueron 22,0 cm por 70,0 cm, con un volumen aproximado de 6000 cm³, denominadas, en ambos casos, bolsas cribadas (a los efectos de diferenciarlas de las bolsas grandes). A las bolsas cribadas se les realizaron 4 líneas de perforaciones de 3 mm de diámetro aproximadamente, distanciadas entre sí a 45 mm, con la finalidad de asegurar la difusión de gases hacia los granos de maíz almacenados con 11,4% de humedad. Dentro de estas bolsas se colocaron materiales generadores de CO₂.

Para analizar el efecto de la automodificación de la atmósfera intergranaria en los insectos que comúnmente son causales de pérdidas en los granos almacenados, se utilizaron insectos de la especie *Sitophilus zeamais* M. (Gorgojo del maíz), orden Coleóptera, familia Curculionidae. Este insecto tiene una gran capacidad de vuelo e infesta los cereales desde el campo. Ataca todos los cereales, siendo extraordinariamente destructivo. Se considera a esta especie una plaga primaria porque los adultos son capaces de perforar los granos.

Se colocaron 15 insectos junto con 0,08 kg de maíz, en pequeñas bolsas de tela de material denominado “voile”, con un entramado que permitía el intercambio gaseoso con la atmósfera intergranaria circundante, reteniendo los insectos dentro de la bolsa.

Las bolsas plásticas se ubicaron en posición vertical y se les colocó en su interior la bolsa cribada, ubicado en posición central, a los fines de la difusión de los gases dentro del material almacenado sea lo más homogénea posible. Se colocó además, en cada una de las bolsas que conformaban las diferentes repeticiones de los tratamientos una sola bolsita de “voile” conteniendo los insectos antes mencionados. Se llenaron las bolsas de plástico con 40,0 kg de maíz seco (11,4% de humedad) y se procedió a cerrarlas mediante un proceso de termosellado.

Las mediciones de O₂ y CO₂ se realizaron con un analizador de gases (PBI Dan Sensor). Las muestras de concentración de gases de la atmósfera intergranaria se obtienen perforando la bolsa plástica mediante el empleo de una aguja hipodérmica. Se establecieron 2 puntos de muestreo por bolsa, una en la parte inferior y la otra en la parte superior de cada bolsa. Las mediciones se realizaron en el horario del medio día, durante un periodo de 60 días.

Los tratamientos propuestos fueron los siguientes:

- **Tratamiento I-Maíz:** este tratamiento estaba constituido por 6 bolsas grandes (3 repeticiones para 30 días y 3 para 60 días) cada una de las repeticiones contenía 40,0 kg de maíz seco (11,4%) más una bolsa cribada con 1,6 kg. de maíz húmedo (20,0%) y una bolsa con 0,08 kg de maíz más 15 insectos. Este tratamiento se identificó como *I-Maíz (30)* para el caso de las repeticiones analizadas a los 30 días y *I-Maíz (60)* para los 60 días.
- **Tratamiento II-Sorgo:** este tratamiento es similar al anterior a excepción de que la bolsa cribada era de 6000 cm³ y contenía 1,6 kg de sorgo azucarado cortapicado. Este tratamiento se identificó como *II-Sorgo (30)* para el caso de las repeticiones analizadas a los 30 días y *II-Sorgo (60)* para los 60 días.
- **Tratamiento Testigo:** consta solamente de maíz seco, al cual se le agregó solamente una bolsa con 0,075 kg de maíz con los insectos. Este tratamiento se realizó a los efectos de constatar si la modificación de la atmósfera que producía el grano seco afectaba la población de insectos. Este tratamiento se identificó como *Testigo (30)* para el caso de las repeticiones analizadas a los 30 días y *Testigo (60)* para los 60 días.

Cada uno de los tratamientos constaba de 3 repeticiones que se analizarían al cabo de los 30 días de iniciado el ensayo, y otras 3 repeticiones que se analizarían a los 60 días con el propósito de determinar en valores aproximados, 30 o 60 días, el tiempo necesario para que la exposición a las concentraciones alcanzadas de CO₂ y O₂ fueran letales, o no, para los insectos colocados en las pequeñas bolsas.

Resultados y discusión

Al cabo de 30 días de iniciado el ensayo se procedió a la apertura de las 3 repeticiones de los 3 tratamientos denominados *I-Maíz (30)*, *II-Sorgo (30)* y *Testigo (30)*, se realizó un conteo de los insectos (vivos, muertos y faltantes) colocados en el interior de las pequeñas bolsas de voile. En todos los tratamientos no se encontraron insectos vivos, a excepción del *Testigo* donde se encontraron 19 insectos (promedio de las 3 repeticiones) es decir un 26,0% de los individuos con respecto a la situación inicial de 15, como se observa en la Figura 1.

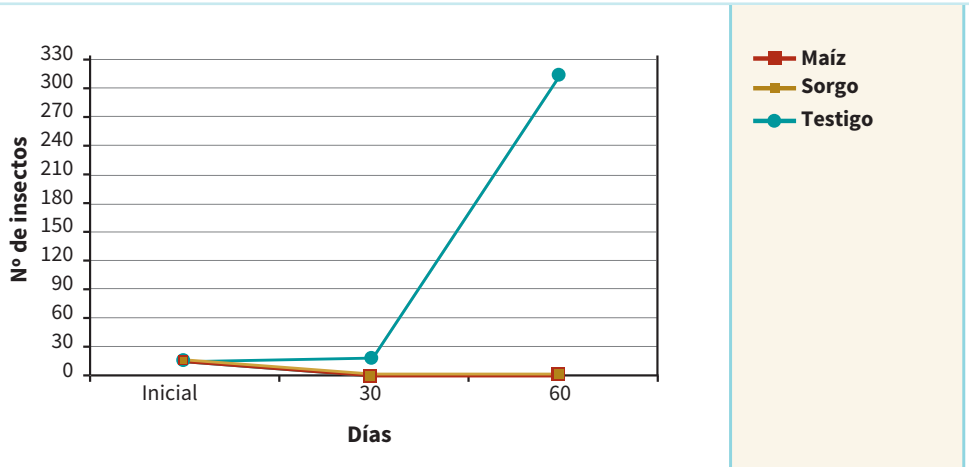
En la misma figura se observa que, al cabo de los 60 días, la misma situación que a los 30 días, donde solamente en el tratamiento *Testigo* la población de insectos se incrementó considerablemente superando el número inicial de insectos en un 363,0% (es decir 70 insectos adultos vivos) mientras que en los tratamientos *I-Maíz (60)* y *II-Sorgo (60)* no se observaron insectos vivos.

El maíz de las bolsas donde se colocaron los insectos fue guardado posteriormente al conteo de los insectos adultos, en cámara a 26,0 °C durante 50 días, para observar la posible emergencia de larvas ocultas en los granos. Solo en grano proveniente del *Testigo* se observó una posterior aparición de insectos, en los tratamientos *I-Maíz (30)* y *(60)*, *II-Sorgo (30)* y *(60)* no se observaron insectos durante el almacenamiento posterior de los granos en cámara.

En la situación de este ensayo, la humedad de los granos fue, en promedio, de 11,4%, y la temperatura promedio de los granos en los diferentes tratamientos fue de 20,5 °C du-

Figura 1.

Evolución de la población de insectos.



rante el transcurso del ensayo (mínimo de 17,2 °C y máximo de 26,6 °C, Figuras 2 y 3). Estos valores se encuentran dentro del óptimo para el normal desarrollo de esta especie, sobre la base de estos datos podemos estimar empíricamente que la humedad relativa del ambiente intergranario fue, aproximadamente, del 60,0%, lo cual refleja una situación óptima desde el punto de vista de los factores físicos que inciden en el desarrollo de los insectos. Esto permite inferir que el control de los mismos se debió exclusivamente a la modificación de la composición de la atmósfera intergranaria.

Como se observa en las Figuras 4 y 5, en todos los tratamientos, excepto el *Testigo* las concentraciones de O_2 y CO_2 variaron abruptamente. En la Figura 4 se observa que la concentración de O_2 cae abruptamente para los tratamientos *I-Maíz (30)* y *II-Sorgo (30)*. En un lapso de tiempo de aproximadamente 6 días, las concentraciones se estabilizan en un valor promedio de 0,5% para *I-Maíz (30)*, y de 0,3% en el tratamiento *II-Sorgo (30)*. En cambio, en el *Testigo (30)* no hubo una variación considerable de la concentración de O_2 ,

Figura 2.

Evolución de la temperatura (°C) para I-Maíz (30), II-Sorgo (30) y Testigo (30).

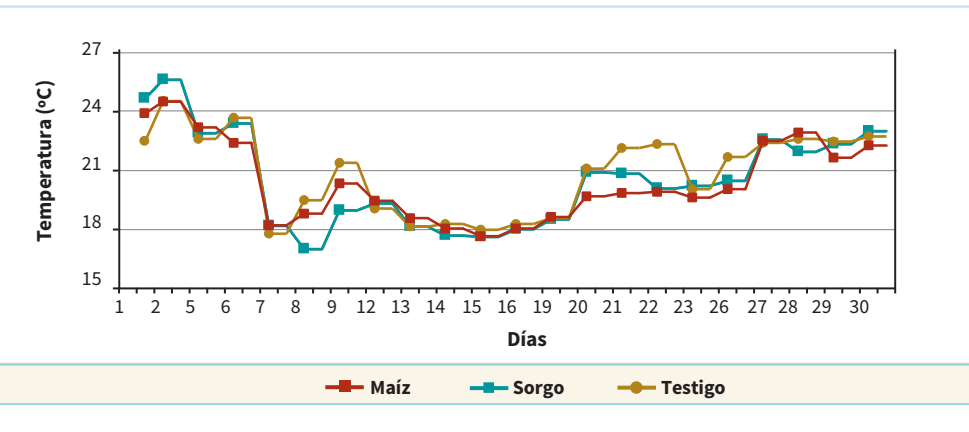
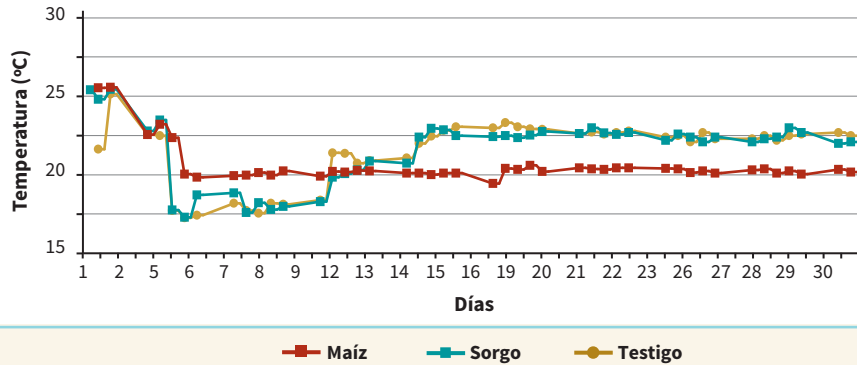


Figura 3.
Evolución de la temperatura (°C) para I-Maíz (60), II-Sorgo (60) y Testigo (60).



disminuyendo solamente a un valor promedio de 17,7% desde el sexto día en adelante, durante todo el periodo de ensayo.

La Figura 5 muestra que el tratamiento *I-Maíz (60)*, en un lapso de tiempo de aproximadamente 6 días, se estabilizó en un valor promedio de 1,2% de O₂, y de 0,3% de O₂ en el tratamiento *II-Sorgo (60)*. En cambio, en el *Testigo (60)* la concentración de O₂ disminuyó solamente a un valor promedio de 17,7% desde el sexto día en adelante, durante todo el periodo de ensayo.

Con respecto a la concentración de CO₂, la misma mostró para los 3 tratamientos, un comportamiento inverso a lo que ocurrió con la concentración de O₂, como se observa en la Figura 6.

Figura 4.
Evolución de la concentración de O₂ en los 3 tratamientos a 30 días.

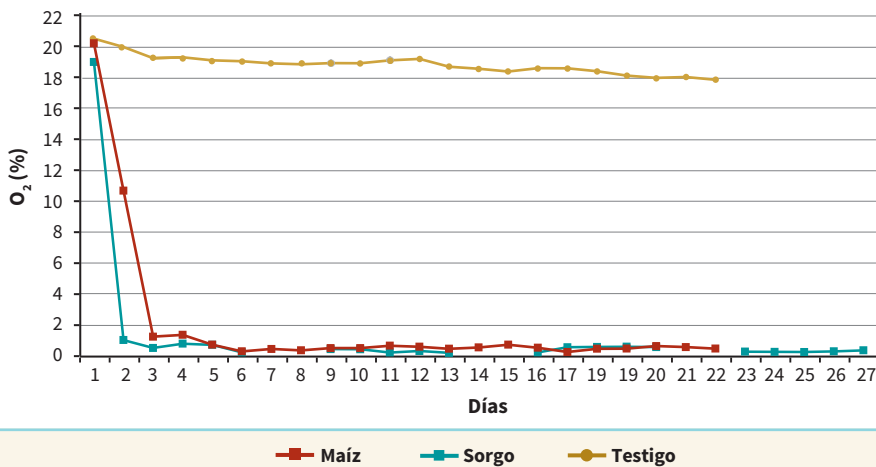


Figura 5.
Evolución de la concentración de O₂ para I-Maíz (60); II-Sorgo (60) y Testigo (60).

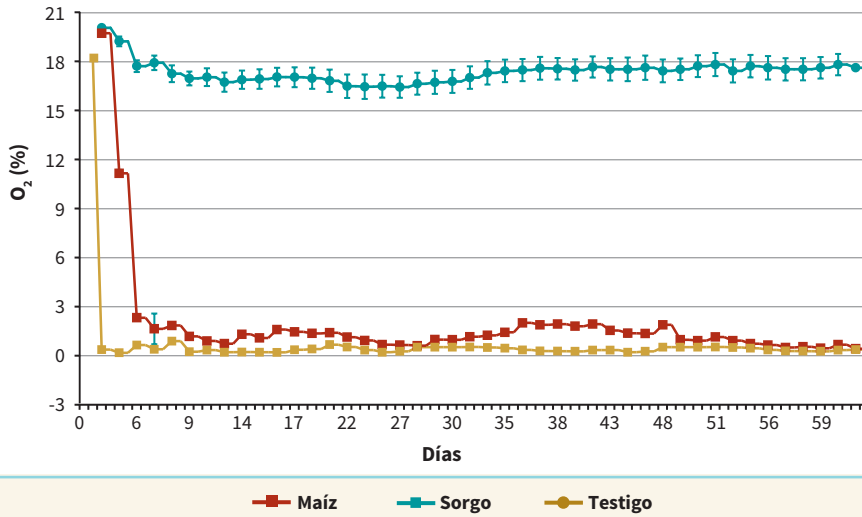
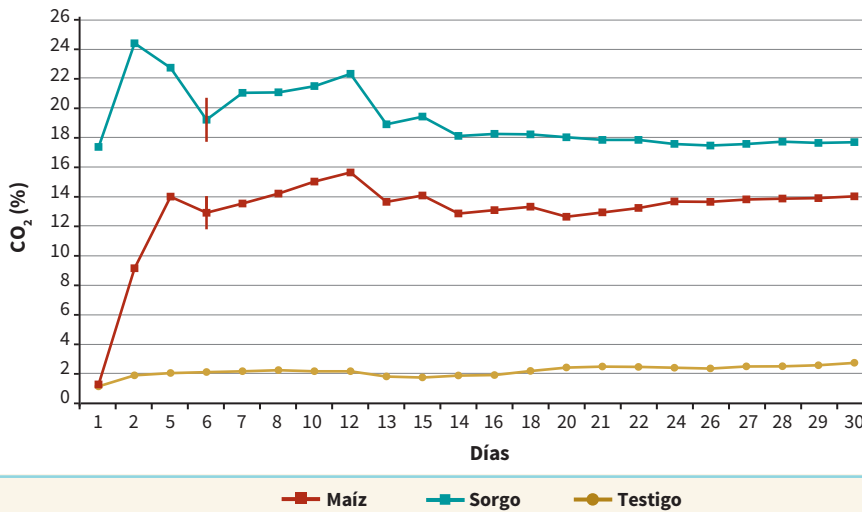


Figura 6.
Evolución de la concentración de CO₂ en los 3 tratamientos a 30 días.

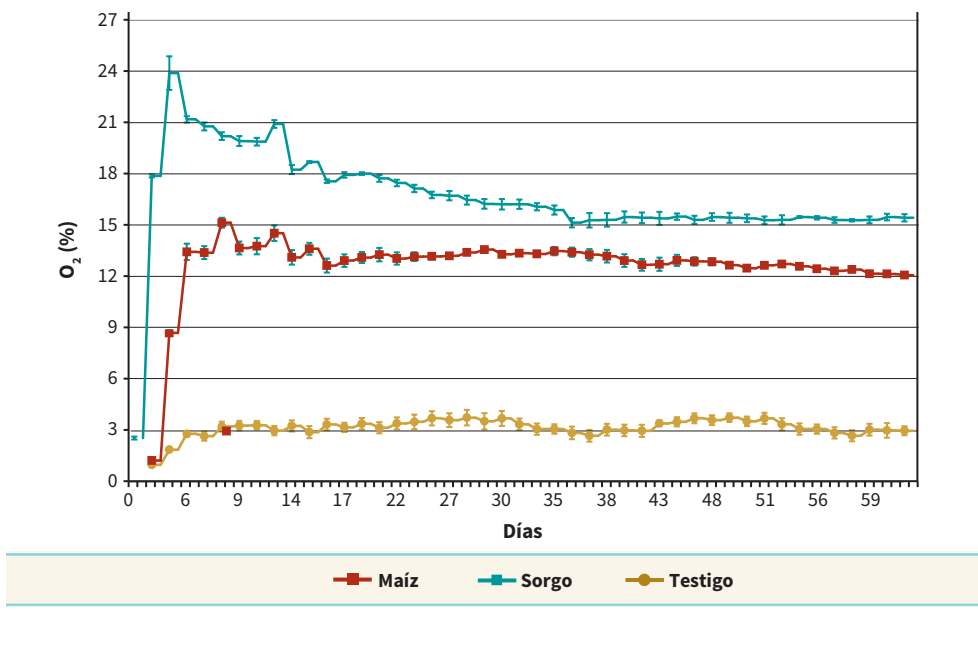


Para los tratamientos *I-Maíz (30)* y *II-Sorgo (30)* se observó un fuerte aumento de la concentración de CO₂ en un lapso muy corto de tiempo, con un valor promedio de 13,8% para *I-Maíz (30)* y de 19,2% para el tratamiento *II-Sorgo (30)*, desde el sexto día en adelante. Para el caso del *Testigo* la concentración se mantuvo alrededor del 2,2% desde el sexto día hasta finalizado el ensayo.

En la Figura 7 se observa para los tratamientos *I-Maíz (60)* y *II-Sorgo (60)* una alta producción de CO₂ en un lapso muy corto de tiempo, con un valor promedio de 13,1% para *I-*

Figura 7.

Evolución de la concentración de CO₂ para I-Maíz (60), II-Sorgo (60) y Testigo (60).



Maíz (60) y de 16,8% para el tratamiento II-Sorgo (60) desde el sexto día en adelante hasta el momento de finalizado el ensayo. Para el caso del Testigo la concentración se mantuvo alrededor del 3,3% desde el sexto día hasta finalizado el ensayo.

Los niveles de O₂ y CO₂ en los diferentes tratamientos, que determinaron la muerte de los insectos en el interior de las bolsas, conciden con los datos reportados en ensayos similares (Casini y Santa Juliana, 2007) que observaron un control total en silo bolsas de 2,7 m de diámetro a concentraciones de 23,4% de CO₂ y 0,3% de O₂, mientras que a concentraciones de 5,9% de O₂ y 10,5% de CO₂ los mismos autores detectaron insectos vivos, luego de un lapso de 90 días de colocados los insectos en el interior de la bolsa.

En otro trabajo, luego de 46 días de embolsado, se observó a concentraciones de CO₂ y de O₂ de 13,7% y 4,8%, respectivamente, se produjo la muerte de todos los insectos de la especie *Sitophilus zeamais* (Santa Juliana y Casini, 2009).

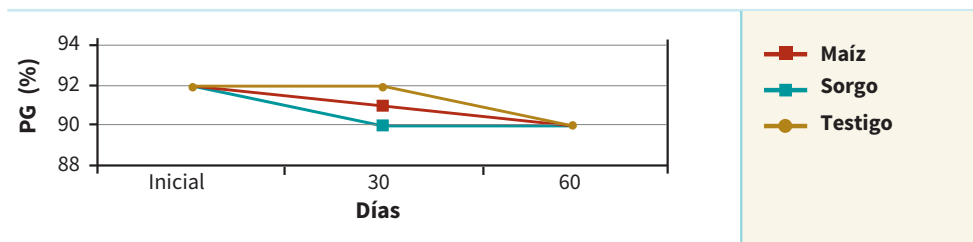
Las causas directas de mortandad de los insectos expuestos a atmósferas modificadas no se han establecido por completo aún. Diversos autores han estudiado los efectos tóxicos que provoca la modificación atmosférica, mencionando que esta actúa sobre la disecación de los insectos, dado que permanecen abiertos los espiráculos y de esta manera los insectos no regulan la pérdida de agua. También actúa sobre el metabolismo energético, por carencia de triglicéridos como substrato (Donahaye, 1991) y acidificación a nivel celular que puede llevar a una interrupción de reacciones vitales (Adler, 1993, 1994). Al respecto Navarro y Friedlander (1975) encontraron que con el aumento de la concentración de CO₂ se incrementaban los niveles de lactato en la hemolinfa. A su vez detectaron que los niveles de lactato aumentaban rápidamente a medida que el nivel de O₂ descendía a valores cercanos al 3,0%.

En otro estudio se determinó que bajo los efectos de la anoxia (baja concentración de O_2) se reducen los niveles de glucosa, y cuando se combinan anoxia e hipercarbia (alta concentración de CO_2) los niveles de citrato se reducen (Friedlander y Navarro, 1979 a, b). Otra consecuencia del efecto de la anoxia e hipercarbia es la inhibición del ciclo de Krebs. Al respecto de este tema Calderón y Barkai - Golan (1990) mencionan que el efecto combinado de anoxia e hipercarbia es sinérgico, matando en primer lugar los huevos, luego las larvas, los adultos y finalmente las pupas. Estas últimas comienzan a controlarse con una concentración de CO_2 del 15,0% (Banks, 1990).

La efectividad del control de insectos mediante atmósferas modificadas depende de varios factores, algunos ya han sido mencionados, como ser la temperatura, la humedad relativa del ambiente intergranario y la concentración de gases de la atmósfera. Otros, como la especie, estadio de la plaga, y el tiempo de exposición son igualmente importantes. Respecto del tiempo de exposición se debe remarcar la importancia de la hermeticidad del sistema de almacenamiento, no solo para lograr una concentración mínima de CO_2 necesaria para el control de todos los estadios, sino también para mantener esa concentración en el tiempo, y así aumentar la efectividad del control.

Otro efecto beneficioso del incremento de CO_2 es que se reduce la respiración de los granos cuando este alcanza valores del 7,0% y puede detenerla al llegar a 12,0% (Reimbert y Reimbert). Esta reducción en la respiración no afectó el poder germinativo de los granos (Figura 8), esta variable es muy sensible a cualquier efecto adverso durante el almacenamiento, manteniendo dicho parámetro en valores casi constantes desde el inicio hasta finalizado el ensayo.

Figura 8.
Evolución del poder germinativo (PG, %) desde el inicio del ensayo hasta los 60 días.



Conclusiones

La incorporación de bolsas cribadas que contenían material húmedo genera un aumento de la concentración de CO_2 y una disminución del O_2 que componen la atmósfera intergranaria, fueron efectivos para un control absoluto y de manera orgánica de los insectos plaga. En un plazo muy corto de tiempo se modificó sustancialmente la concentración de CO_2 y O_2 , y la misma se mantuvo por un plazo de tiempo prolongado aumentando la efectividad del control.

La incorporación de forraje de sorgo cortapicado para modificar la concentración de CO_2 y O_2 fue efectiva, y resulta una alternativa económica. Además se denota la posibili-

dad de utilizar otro tipo de material capaz de modificar la concentración de CO₂ de acuerdo a la disponibilidad de cada zona, a nivel de pequeños productores.

Para lograr una concentración de gases efectiva y tiempo de exposición mínimo, es necesario asegurar una alta hermeticidad en el almacenamiento, como la obtenida en este trabajo mediante el uso del polietileno de baja densidad.

Este método resultó ser eficiente, ecológico, y mantiene, durante el almacenamiento, a los granos de maíz con calidad sin afectar su poder germinativo. Esto adquiere especial relevancia si se tiene en cuenta que la mayoría de este maíz es utilizado por las pequeñas familias rurales para el consumo humano directo.

Referencias

- Adler C. 1993. Zur Wirkung modifizierter Atmosphären auf Vorratsschädlinge in Getreide am Beispiel des Kornkäfers *Sitophilus granarius* (L). Effects of modified atmospheres on stored product pests in grain as represented by the granary weevil *Sitophilus granaries* (L). PhD Dissertation. Fachbereich Biologie, Freie Universität Berlin, Shaker Verlag, Aachen, 146 p.
- Adler C. 1994. Carbon dioxide - more rapidly impairing the glycolytic energy production than nitrogen, pp. 7 - 10. En: Highley E.; Wright E.J.; Banks H.J. y Champ B.R. (Eds.), Proc. 6th intl. Working Conf. stored - Prod. Prot., CAB International, Wallingford, United Kingdom.
- Banks H.J.; Annis P.C. y Rigby G.R. 1990. Controlled atmosphere storage of grain: the known and the future, 695 - 707 pp. En: Fleurat - Lessard F. y Ducom P. (Eds.), Proc. 5th. Intl. Working Conf. Stored - Prod. Prot., Imprimerie Médocaine, Blanquefort Cedex, Francia.
- Calderón M.; Barkai - Golan R. 1990. Food Preservation by Modified Atmospheres, CRC Press Boca Raton, Florida, EE.UU.
- Casini C. 2002. Guía para almacenar grano en bolsas plásticas. Información técnica Proyecto Eficiencia de cosecha y poscosecha de grano. INTA Manfredi, 4 p.
- Casini C. y Santa Juliana D.M. 2007. Determinación del efecto de la humedad de maíz sobre la concentración de oxígeno y dióxido de carbono en bolsas plásticas, pp. 153 - 160. Almacenamiento de granos en bolsas plásticas. Resultados de investigación, Ediciones INTA, Córdoba, Argentina.
- Casini, C.; Santa Juliana D.M. 2009. Estudio de la concentración de dióxido de carbono y oxígeno en maíz (*Zea mays*) almacenado en bolsas plásticas, 252 - 253 pp. En: Libro de Resúmenes del X Congreso de Ingeniería Rural y II del Mercosur. Área Temática tecnología de Poscosecha y Agroindustria, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Dell'Orto Trivelli H. y Arias Velazquez C.J. 1985. Insectos que dañan los granos y productos almacenados. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Serie Tecnología Poscosecha número 4.

- Donahaye E. 1991. The potential for stored - product insects to develop resistance to modified atmospheres, 989 - 997 pp. En: Fleurat - Lessard F. y Ducom P. (Eds.), Proc. 5th Intl. Working Conf. Stored - Prod. Prot., Imprimerie Médocaine, blanquefort Cedex, Francia.
- Friedlander A. y Navarro S. 1979 a. The Effect of Controlled Atmospheres on Carbohydrate Metabolism in the Tissue of *Ephestia cautella* (Walker) Pupae. *Insect Biochem.*, 9: 79 - 83 pp.
- Friedlander A. y Navarro S. 1979 b. Triglyceride Metabolism in *Ephestia cautella* (Walker) Pupae Exposed to Carbon Dioxide. *Experientia*, 35: 1424 - 1425.
- Hall D.W. 1980. Manipulación y almacenamiento de granos alimenticios en las zonas tropicales y subtropicales. FAO Agricultural development Paper N°. 90. Roma, Italia, pp.199 - 250.
- Navarro S. y Frielander A. 1975. The effect of carbon dioxide anaesthesia on the lactate and pyruvate levels in the hemolymph of *Ephestia cautella* (Walker) pupae. *Comp. Biochem. Physiol.*, 5B: 187 - 189.
- Navarro S. y Donahaye E.J. 1993. Controlled atmosphere and fumigation in grain storages. Caspit Press Ltd., Jerusalem, 560 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Tecnologías Agroindustriales - Procesamiento de Cereales. Disponible en: http://www.fao.org/inpho/content/documents/vlibrary/new_else/x5693s/x5693s01.htm: Accedido en mayo de 2009.
- Reimbert M. y Reimbert A. 1979. Silos. Teoría y práctica. Cálculo, funcionamiento, realizaciones. América, Buenos Aires, Argentina, 464 p.
- Yanucci D. 1998. Evolución de las plagas en Argentina. Evolución del control de plagas de granos almacenados en Argentina. Gráfica Mantova s.a., Buenos Aires, pp.15 - 31.

Una mirada interior al sistema de silo bolsa

Ricardo Bartosik¹

Resumen

El silo bolsa es un tipo de almacenamiento hermético ampliamente adoptado. Este trabajo resume los resultados del efecto del almacenamiento en silo bolsa en la calidad comercial del maíz, soja, trigo, girasol, cebada cervecera, canola y poroto. También se discute el efecto de la atmósfera modificada en la población de insectos y hongos almacenados, y se elaboran recomendaciones para las condiciones apropiadas de almacenamiento.

Cuando el grano seco es almacenado en silo bolsas, la concentración de CO₂ generalmente oscila entre el 3,0% y 10,0% y la de O₂ entre 10,0%, y 18,0%. El grado de modificación de la atmósfera intersticial se incrementa con el contenido de humedad del grano (CH) y la temperatura, siendo el rango de concentración típica de gases para grano húmedo de 15,0% - 25,0% de CO₂ y de 2,0% - 5,0% de O₂.

Existen pocos informes sobre la presencia de insectos en silo bolsas. El análisis de las variables sensibles para el desarrollo de insectos indica que en el silo bolsa se producen condiciones desfavorables para su desarrollo. En consecuencia, el almacenamiento en silo bolsas, bajo las condiciones climáticas analizadas, ayuda a mantener el grano sin desarrollo de poblaciones de insectos.

Cuando el grano es almacenado en silo bolsas a un CH que pueda permitir el desarrollo de hongos, la actividad de los hongos es menor comparada con aquella desarrollada bajo condiciones atmosféricas normales de almacenamiento. Además, la temperatura del grano dentro del silo bolsa es mayormente afectada por la temperatura ambiente. En este sentido, los silo bolsas tienen una tasa alta de intercambio de calor con el aire y el suelo (doble proporción superficie/volumen que los silos metálicos), por lo tanto no se observan daños por calor, aún cuando se almacena grano húmedo.

Los resultados generales indican que el grano seco (humedad relativa de equilibrio por debajo del 67,0%) puede ser almacenado en silo bolsas por más de 6 meses sin pérdida de calidad (medida como porcentaje de granos dañados por hongos, peso hectolítrico, poder germinativo, acidez de la materia grasa, parámetros nu-

¹INTA EEA Balcarce, (Buenos Aires), Argentina.

tricionales y organolépticos, entre otros). Cuando el CH se incrementa, la calidad comercial puede ser mantenida por 3 a 6 meses durante la época fría del año (otoño tardío, invierno y primavera temprana), y por menos de 3 meses en verano. En todos los casos, el mantenimiento de la hermeticidad de la bolsa es el factor clave para un almacenamiento exitoso. Se destaca como innovación tecnológica un sistema de monitoreo basado en la medición de concentración de CO₂, que permite un mejor control de las condiciones de almacenamiento y una adecuada gestión del grano almacenado en silo bolsas.

Palabras clave: almacenamiento hermético, atmósferas modificadas, almacenamiento, calidad, cereal, oleaginosas.

Introducción

El silo bolsa es un sistema de almacenamiento hermético que consiste en una cubierta plástica, con la forma de un tubo, de 60,0 m de largo y 2,7 m de diámetro. La cubierta de plástica está hecha de 3 capas (blanca por fuera y negra por dentro) con un espesor de 235 µm.

Cada bolsa puede almacenar aproximadamente 200,0 toneladas de grano y con la maquinaria disponible es muy fácil de llenar (más de 200,0 t/h de capacidad; Figura 1). La nueva generación de cosechadoras, de gran capacidad de trabajo, encuentra en el sistema de silo bolsas un socio ideal. Esto se debe a que la capacidad de carga de la máquina embolsadora está básicamente limitada por la capacidad de transporte entre la cosechadora y el lugar donde se llena la bolsa. Varias empresas también han desarrollado maquinaria para descargar el silo bolsa (Figura 1), transfiriendo el grano directamente de la bolsa al camión o tolva autodescargable, con una capacidad superior a las 180,0 t/h.

En Argentina el silo bolsa se desarrolló para almacenar granos secos. Desde mediados de 1990, cuando fue introducido, el sistema de silo bolsa fue adoptado rápidamente por el sector agrícola e industrial. Durante los últimos 5 años, cada año más del 40,0% de la producción total del país es almacenada en silo bolsas (cerca de 40,0 millones de toneladas en el año 2011).

Como consecuencia de la exitosa experiencia en Argentina, el sistema de silo bolsa está siendo adoptado por más de 40 países en todo el mundo, desde países con clima cálido (p. ej. Sudán) hasta países con clima frío (p. ej. Rusia).



Figura 1.
Maquinaria utilizada para el llenado y la descarga del silo bolsa.

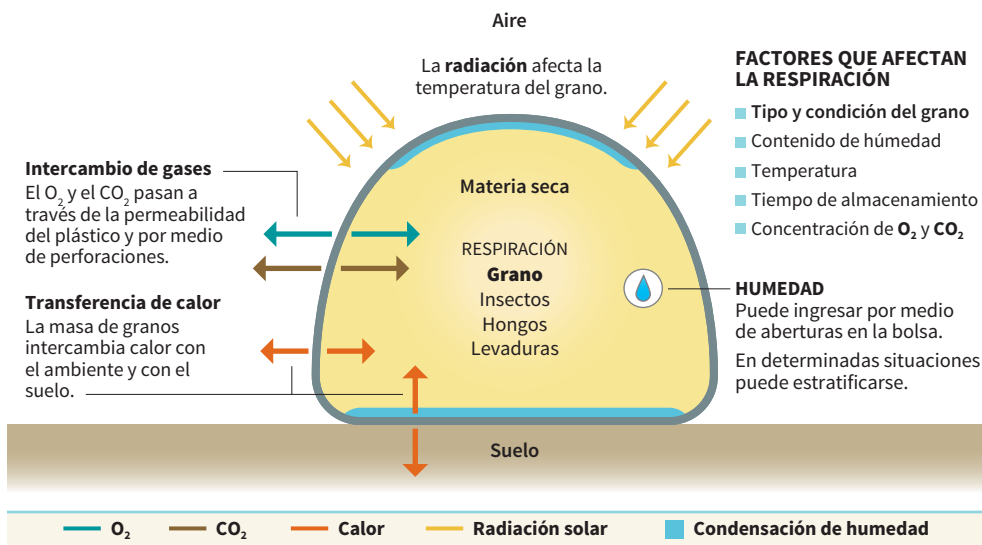
Ambiente intergranario y relaciones

La Figura 2 muestra un diagrama de los principales factores involucrados en el ecosistema del silo bolsa y la relación entre ellos. Basado en este modelo, la respiración de los granos, insectos, hongos y otros microorganismos presentes en el ecosistema de los granos consumen O_2 y generan CO_2 , calor y agua. El proceso de respiración también consume las reservas (energía) de los granos (almidón, aceite y proteínas), lo que puede ser cuantificado como pérdida de materia seca (PMS).

Figura 2.

DIAGRAMA DE LA SECCIÓN DE SILO BOLSA

Se representan los principales factores que influyen el ecosistema del grano, la relación entre ellos y con el medio ambiente externo



La respiración del grano es afectada por el tipo y condición del grano, el contenido de humedad (CH), la temperatura, el tiempo de almacenamiento y las concentraciones de O_2 y CO_2 . Estos últimos 2 factores marcan la diferencia entre la tasa de respiración de los granos en estructuras comunes de almacenamiento (silos y celdas) y estructuras herméticas (silo bolsa).

La temperatura del grano, en un momento dado, depende de la temperatura inicial del grano al momento del embolsado (este efecto es menos importante a medida que se prolonga el periodo de almacenamiento), de la radiación solar, del calor liberado en el proceso de respiración, y de la transferencia de calor con el aire y el suelo en contacto con la bolsa. El CH del grano depende del CH inicial del grano, del ingreso de humedad desde el exterior (luego de una lluvia, a través de roturas o mal sellado del silo bolsa) y de la humedad liberada en el proceso de respiración. Además, dada la diferencia de temperatura entre el día y la noche, se puede producir transferencia de humedad desde una capa de granos hacia otra. Si la magnitud de este proceso es importante, algunos sectores localizados de grano (normalmente la capa superior o inferior) pueden resultar con mayor CH que el promedio del silo bolsa.

Para cualquier momento particular, la concentración de CO₂ y O₂ en el silo bolsa depende del balance entre la respiración (consumo de O₂ y generación de CO₂), la entrada de O₂ exterior al sistema y la pérdida de CO₂ al aire ambiente. El movimiento de gases desde y hacia el silo bolsa depende de la presión diferencial parcial del gas y de la permeabilidad del sistema (a través de aberturas en la cobertura de plástico, o a través de la permeabilidad natural a los gases del material plástico).

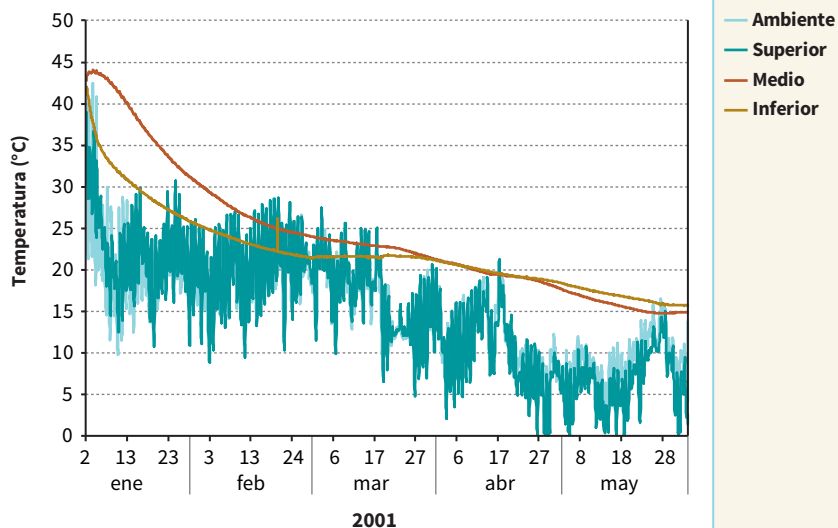
Efectos de la temperatura ambiente

Bartosik et al. (2008 a) indicaron que la temperatura del grano en la superficie (lindante con el plástico del silo bolsa) muestra el patrón característico de la evolución diaria de la temperatura del aire ambiente, que alcanza su máximo al mediodía y el mínimo temprano en la mañana (Figura 3). La oscilación de la temperatura diaria disminuye con la profundidad del grano, siendo imperceptible a 0,7 m de profundidad. Además, se demostró que la temperatura promedio del grano en el silo bolsa sigue el patrón de la temperatura promedio ambiente a lo largo de la estación del año.

En un experimento de campo, se llenaron silo bolsas con trigo durante el verano con temperatura del grano cercana a los 40,0 °C. El silo bolsa fue capaz de disipar el calor en el grano al aire ambiente y al suelo en un par de meses, reduciendo la temperatura del grano a menos de 17,0 °C para principios de mayo (Figura 3). Por un lado, esto se puede explicar a través de la relación volumen/superficie, la cual es sustancialmente menor para silo bolsas (0,7 para silo bolsa de 200,0 toneladas) que para silos con similar capacidad de almacenamiento (1,3 para un silo de 7,0 m de diámetro y 7,0 m de altura, con 200,0 toneladas de capacidad). Por otro lado, la soja y el maíz, cosechados durante el otoño y el invierno, fueron capaces de mantener la temperatura por debajo de los 17,0 °C hasta prin-

Figura 3.

Patrón de temperatura (°C) ambiental y de diferentes profundidades de grano (estrato superior, medio e inferior) durante el tiempo de almacenamiento de trigo en silo bolsas (desde enero hasta junio).



cipios de noviembre. Resultados similares fueron reportados por Barreto et al. (2012), que simularon los efectos de las condiciones ambientales en la temperatura de silo bolsas con trigo en diferentes regiones de Argentina.

Efecto del contenido de humedad del grano

Dado que el silo bolsa está hecho de una cobertura de plástico hermética, no se debería experimentar variaciones de humedad durante el almacenamiento, a menos que agua de lluvia penetre en la bolsa a través de orificios en la misma. Gaston et al. (2009) mencionaron que la diferencia de temperatura entre la capa superior y el resto de la bolsa causó una migración de la humedad del centro de la masa de grano a la capa superior, y en una menor magnitud, a la capa inferior. La migración de humedad puede provocar que el CH aumente en determinadas capas de grano, incrementando el riesgo de descomposición del grano (y el deterioro de la calidad) en determinadas áreas del silo bolsa. Hasta la actualidad no está clara la magnitud del proceso de estratificación de la humedad durante el almacenamiento en silo bolsa. Gaston et al. (2009) consideraron que el CH del grano, la temperatura del grano, la magnitud de la fluctuación de la temperatura y el tiempo afectan la magnitud de la estratificación del CH.

Darby y Caddick (2007) reportaron estratificación de la humedad durante el almacenado de cebada seca ($\leq 11,0\%$ CH) bajo condiciones de Australia y en silo bolsas sin aberturas. Esta estratificación incrementó el CH en la capa periférica a un $13,0\%$ durante el invierno, pero se mantuvo seco durante el verano con temperaturas por encima de los $30,0$ °C, lo que indica que el grano podría ser almacenado en perfectas condiciones hasta por 6 meses. Por otro lado, Ochandio et al. (2009) no encontraron estratificación de CH en silo bolsas de cebada con $12,0\%$ CH, incluso luego de 1 año de almacenamiento en Argentina.

Respiración de los componentes biológicos

El grano, los insectos, hongos y otros microorganismos respiran, consumiendo componentes del grano y O_2 del ambiente intersticial, y liberando CO_2 , agua y calor.

El tipo de grano, el CH, la temperatura, el tiempo de almacenamiento y las concentraciones de O_2 y CO_2 afectan la tasa de respiración. La mayoría de los factores que influyen en la respiración en los silo bolsas pueden ser modelados. Sin embargo, no existen aún correlaciones disponibles para predecir la tasa de respiración de los granos almacenados bajo condiciones de hermeticidad (entornos con O_2 reducido). Con el objetivo de mejorar el modelado del almacenamiento bajo atmósferas modificadas y controladas es necesario generar adecuadas correlaciones para predecir la respiración en entornos con O_2 reducido.

Permeabilidad

La transferencia de gases entre el interior y el exterior del silo bolsa depende de la diferencia de presión parcial de cada gas y la permeabilidad efectiva del silo bolsa a los gases (permeabilidad de la capa de plástico y perforaciones).

La permeabilidad de la capa de plástico puede ser medida o estimada en base a las características del material plástico (la mayoría de los silo bolsas están hechos de mate-

riales similares y tienen similar espesor). Por otra parte, la permeabilidad por perforaciones es más difícil de estimar dado que el tamaño, forma, lugar y número de perforaciones difiere substancialmente de bolsa a bolsa.

Cubierta de plástico

La permeabilidad del silo bolsa depende del espesor y de la composición del material, ambos determinados por el proceso de fabricación. En general, el silo bolsa está hecho de 3 capas de plástico de 230 μm a 250 μm de espesor, blanco por fuera y negro por dentro. Las capas de plástico son una mezcla de polietileno de alta densidad (HDPE) y de baja densidad (LDPE). La capa de plástico tiene una permeabilidad diferencial al O_2 y al CO_2 . Para un silo bolsa con un espesor promedio de 240 μm , Abalone et al. (2011) estimaron que la permeabilidad al O_2 fue de $4,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$ y al CO_2 fue de $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} \text{ m}^2 \text{ at}^{-1}$.

Perforaciones

Las perforaciones en el plástico incrementan la tasa de intercambio de gases entre el interior y el exterior. Fueron realizadas simulaciones por Abalone et al. (2011) con el objetivo de explorar el efecto del daño estructural del silo bolsa. Se pudo demostrar que aún una pequeña perforación puede cambiar significativamente la evolución de la composición del gas, de 1,0 punto porcentual para una perforación de 1 mm de diámetro por metro lineal de silo bolsa, a más de 5,0 puntos porcentuales para una perforación de 10 mm de diámetro.

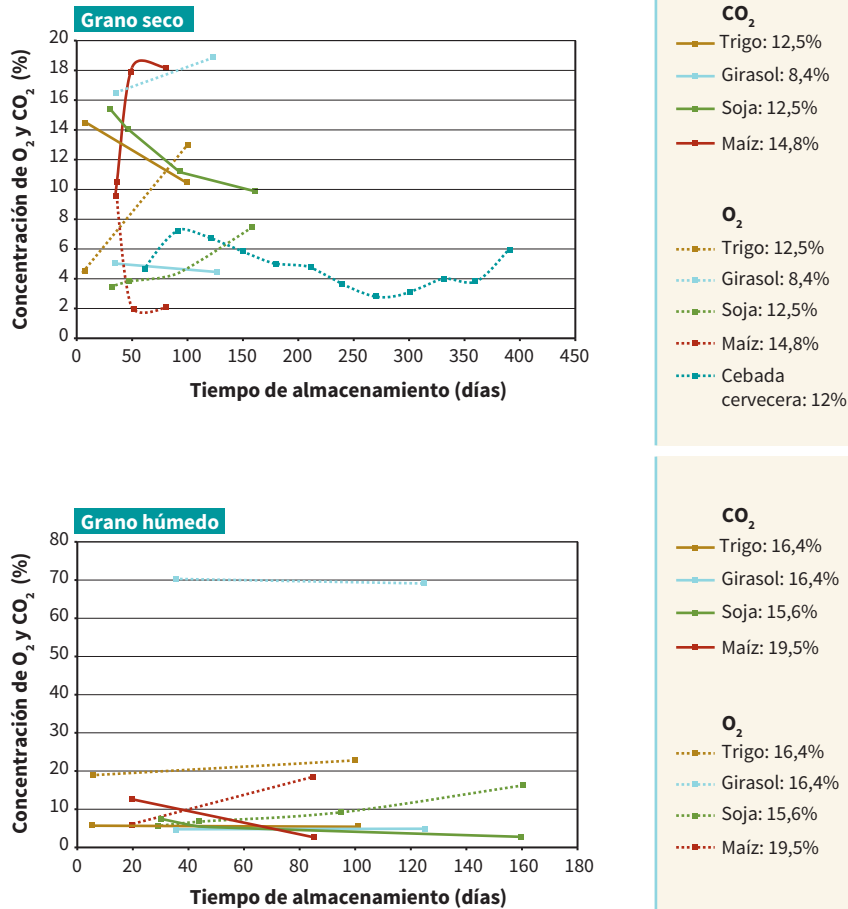
También fue investigado el efecto de un número de perforaciones en la composición de los gases. Un silo bolsa hermético (sin perforaciones) que almacena trigo a 13,0% CH y 25,0 °C alcanza una concentración de CO_2 de 6,5% y una concentración de O_2 de 12,0%. Una perforación de 3 mm de diámetro por metro de silo bolsa reduce la concentración de CO_2 a 4,5% e incrementa la de O_2 a 15,0%, mientras que 5 perforaciones por metro reducen la concentración de CO_2 a 1,5% e incrementan la concentración de O_2 a 19,5% (Abalone et al., 2011).

Concentración de oxígeno y dióxido de carbono

La concentración de CO_2 y O_2 en cualquier momento es el resultado de la tasa de respiración (consumo de O_2 y generación de CO_2) y de la tasa de intercambio de gases con el exterior (entrada de O_2 y salida de CO_2). Los datos de la concentración de CO_2 y O_2 fueron medidos a lo largo del tiempo para diferentes granos y condiciones de almacenamiento (Figura 4). Usualmente, para granos secos, la concentración de O_2 se equilibra entre 10,0% - 18,0%, mientras que la concentración de CO_2 se equilibra entre 3,0% - 10,0%. Para granos húmedos (humedad relativa de equilibrio mayor a 67,0%) la concentración de O_2 disminuye a 2,0% - 5,0%, mientras que la de CO_2 aumenta a 15,0% - 25,0%. El grado de modificación de la atmósfera intergranaria está directamente relacionado al CH. En algunos casos, con granos excepcionalmente húmedos, la concentración de CO_2 puede alcanzar valores tan altos como 70,0% (O_2 cercano al 0,0%).

Figura 4.

Concentración de O₂ y CO₂ durante el almacenamiento en silo bolsa de grano seco y húmedo.
Adaptado de Bartosik et al., 2008.

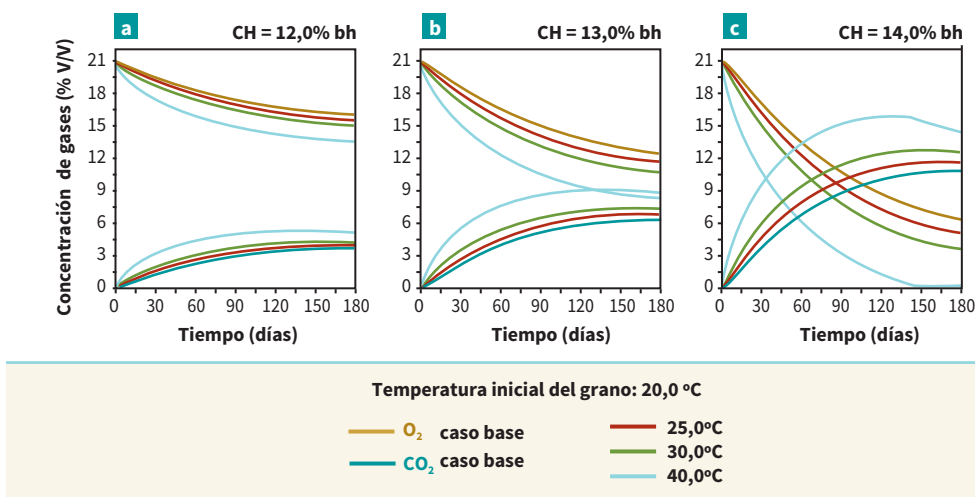


El silo bolsa puede actuar como un sistema típico de atmósfera modificada, cuando el grano está suficientemente húmedo como para tener una actividad biológica que pueda consumir O₂ a una tasa mayor a la de su entrada desde el exterior, a través del plástico. En esta circunstancia, la concentración de O₂ disminuirá por debajo del límite en el cual la respiración aeróbica comienza a ser limitada. Esta observación concuerda con el estudio realizado por Darby y Caddick (2007) en su reporte comprensivo sobre silo bolsas en Australia.

La temperatura tiene también un efecto positivo en la actividad biológica, pero la interacción con el CH muestra que el efecto de la temperatura es mayor cuando grano es almacenado húmedo, que cuando se almacena grano seco (Figura 5). Esto podría significar que el grano seco no mantendría una actividad biológica significativamente diferente en invierno que en verano, pero almacenar grano húmedo puede ser sustancialmente más desafiante (afectado por la actividad biológica) en verano que en invierno.

Figura 5.

Evolución predicha de las concentraciones de O_2 y CO_2 desde el verano al invierno para diferentes temperaturas iniciales de almacenamiento del grano. Fuente: Abalone et al., 2011 (con autorización).



Efecto en la calidad

Trigo

El almacenamiento de trigo seco (12,5% CH durante 6 meses, a partir de principios de enero) en un silo bolsa no afectó el peso hectolítrico, así como tampoco los parámetros de calidad panadera (volumen de panificación, contenido de gluten, fuerza de la masa, etc.). Cuando trigo con 16,4% CH fue embolsado en enero, la temperatura promedio del grano fue de 42,0 °C. La combinación de alto CH y alta temperatura resultó en una disminución sustancial de la mayoría de los parámetros de calidad evaluados. El peso hectolítrico disminuyó de 78,7 a 77,3 kg/hl, sin embargo esta disminución no cambió el grado comercial del trigo. Además, todos los parámetros de calidad panadera resultaron afectados negativamente, lo que indica que el almacenaje de trigo húmedo en silo bolsas no es conveniente si su destino final es molinería.

Maíz

El grano embolsado a 14,8% CH resultó con un peso hectolítrico ligeramente mayor luego de 150 días de almacenamiento, mientras el porcentaje de grano dañado aumentó en 1,3 puntos porcentuales (el porcentaje inicial de grano dañado fue mayor al 3,0%). Las muestras de maíz húmedo (19,5% CH) resultaron con una reducción en el peso hectolítrico de 2,0 kg/hl y un sustancial incremento de una fracción de maíz dañado (de 4,4 puntos porcentuales).

Soja

Por un lado, la soja almacenada por un plazo de 150 días a 12,5% CH no modificó el peso hectolítrico ni el porcentaje de aceite de las muestras. Por otro lado, el índice

de acidez del aceite y el poder germinativo fueron ligeramente afectados. Las muestras de soja húmeda (15,6% CH) no resultaron afectadas en el peso hectolítrico ni en el porcentaje de aceite, pero resultaron con un importante incremento en el índice de acidez de aceite (aumentó de 1,7% a 2,3%) y se observó una rápida reducción en el poder germinativo.

Cebada

La cebada maltera almacenada seca (por debajo de 12,0% CH), por un periodo de almacenamiento de 6 a 12 meses, no resultó con efectos negativos en la germinación (el poder germinativo permaneció siempre por encima de 98,0%). En un estudio en el que se incluyeron 56 silo bolsas, de las cuales, solamente 2 resultaron con valores de poder germinativo del 94,0% y 1 con valores de 86,0%. El contenido proteico generalmente no cambió durante el almacenamiento, siendo la caída mas grande observada de 1 punto porcentual luego de 6 meses de almacenamiento (Ochandio et al., 2009; Cardoso et al., 2010; Massigoge et al., 2011).

Girasol

Cuando el girasol fue almacenado a 8,4% CH no se observó reducción en la composición del aceite, mientras que el índice de acidez del aceite se incrementó levemente, de 0,9% a 1,4%. Este incremento no afectó la calidad de comercialización del girasol, dado que el límite para el índice de acidez del aceite en la norma de calidad argentina es de 1,5% hasta el 31 de agosto, y de 2,0% del 31 de agosto en adelante. Por lo tanto, el almacenaje de girasol seco (por debajo de 11,0% CH) es una práctica segura, dado que los parámetros industriales de calidad no fueron afectados luego de 150 días de almacenamiento. El almacenamiento de girasol húmedo (16,4%) resultó en una reducción de la cantidad del aceite en 1,3 puntos porcentuales (de 47,0% a 45,7%) luego de 150 días de almacenamiento, y un incremento sustancial en el índice de acidez del aceite (0,9% a 3,9%). El almacenamiento de girasol húmedo, por lo tanto, resulta con consecuencias negativas en la calidad del aceite.

Canola

Se pudo observar que, a pesar del tamaño y las características de las semillas de canola, fue posible realizar sin problemas las operaciones de embolsado y extracción de esta oleaginosa, con un CH de 6,0%. La humedad relativa en el aire intersticial se mantuvo por debajo de 50,0% a lo largo de todo el periodo de almacenamiento. También se mantuvieron inalterables, a lo largo de todo el periodo de almacenamiento, el CH, la cantidad materias extrañas y el contenido de materia grasa. La acidez de la materia grasa aumentó durante el almacenamiento en 0,7% puntos, alcanzando un valor final de 1,4%, lo cual no representó una pérdida de la calidad comercial (Ochandio et al., 2010).

Semillas

Cuando las semillas son almacenadas con bajo CH (humedad relativa de equilibrio por debajo de 67,0%) no se observó una reducción sustancial en el poder germinativo del

trigo (Bartosik et al., 2008 a) y de la cebada (Ochandio et al., 2009; Cardoso et al., 2010; Massigoge et al., 2010). En el caso de la soja se observó que, cuando los valores de poder germinativo al inicio del embolsado fueron bajos, existió una sustancial disminución en los parámetros durante el almacenamiento, aún con CH tan bajos como 12,5% (Bartosik et al., 2008 a). Datos adicionales mostraron que, cuando la semilla se almacenó seca (hasta con 12,5% de CH) y con alto poder germinativo inicial (p. ej. mayor a 95,0%), la viabilidad de la semilla de soja no cambió durante el almacenamiento. Sin embargo, cuando las semillas fueron almacenadas con un CH mayor al 12,5%, aumentó el número de muestras en las cuales se observó una reducción en el poder germinativo.

Hongos y micotoxinas

En el ecosistema del granel, las condiciones abióticas más importantes que influyen en el crecimiento de hongos y la producción de micotoxinas son: el potencial agua (a_w ; también expresado como humedad relativa), la temperatura y la composición gaseosa. Las especies de hongos involucradas en el deterioro de los granos almacenados son necesariamente aerobias, pero pueden crecer bajo condiciones de bajos niveles de O_2 , y algunas especies pueden tolerar altos niveles de CO_2 . Además, se ha informado sobre atmósferas modificadas que tienen un efecto de control en la producción de micotoxinas, tanto en alta concentración de CO_2 como en baja concentración de O_2 (Chulze, 2010).

Pacin et al., (2009) encontraron maíz almacenado en silo bolsas contaminado con fumonisinas. Los niveles de contaminación registrados sugieren que la contaminación con hongos y fumonisinas depende más de la condición del grano al momento de su entrada al silo bolsa que la duración del almacenamiento.

Castellari et al. (2010) identificaron 2 potenciales productores de aflatoxinas (*Aspergillus flavus* y *A. parasiticus*) y un potencial productor de fumonisinas (*F. verticillioides*) en maíz almacenado en silo bolsas, con CH desde 14,0% a más de 20,0%; sin embargo, no fueron testeados los niveles de toxinas.

La mayoría de las especies de hongos presentes en los granos no pueden desarrollarse en ambientes con humedad relativa por debajo de 65,0% - 67,0%, lo que corresponde a un CH de equilibrio de 14,0% en trigo y en maíz, 12,5% en soja y 8,0% - 9,0% en girasol. Bajo estas condiciones de almacenamiento en silo bolsa la actividad de los hongos básicamente se detiene, y por consiguiente, la producción de micotoxinas.

Cuando se almacena grano a un CH que podría permitir el crecimiento de hongos (humedad relativa de equilibrio mayor a 67,0%), la actividad de hongos y la producción de micotoxinas pueden ser afectadas por la composición de la atmósfera. Si el grano está húmedo, la actividad microbiana podría agotar el O_2 bastante rápido (en pocas horas), previniendo el daño por hongos y la producción de micotoxinas. Sin embargo, si el grano está ligeramente húmedo, la modificación de la atmósfera intersticial podría ser bastante lenta, y serían necesarios muchos días (quizás meses) para alcanzar el nivel requerido para la supresión de hongos. Bajo estas condiciones de almacenamiento es posible la producción de micotoxinas. Además, si el grano está húmedo (alta actividad biológica), pero el silo bolsa tiene un bajo nivel de hermeticidad (p. ej. mal sellado en el cierre, perforaciones, etc.), el O_2 entrará desde el exterior permitiendo el desarrollo de hongos y la producción de micotoxinas. La relación entre el CH del grano, el efecto de

la actividad biológica, las concentraciones de CO₂ y O₂ resultantes y como esto afecta la producción de micotoxinas, todavía no han sido completamente entendidos para condiciones típicas de almacenamiento en silo bolsas y son necesarias más investigaciones sobre el tema.

Insectos en silo bolsas

Hay pocos estudios sobre la infestación de insectos en granos almacenados en silo bolsas. Massigoge et al. (2010) informaron que fueron observados insectos en 10 silo bolsas con cebada, de un total de 56 bolsas monitoreadas. La industria de molienda de trigo, que utiliza silo bolsas para almacenar trigo seco, manifiesta que la presencia de insectos es más frecuente durante el verano y en silo bolsas que fueron llenados con granos provenientes de silos convencionales (no ingresan directamente del campo).

Condiciones que afectan el desarrollo de insectos en silo bolsas

Las razones por las cuales el desarrollo de insectos en silo bolsas es limitado pueden ser: 1) la mayoría de los silo bolsas son llenados con grano que proviene directamente del campo. La presencia de insectos en el cultivo es variable, dependiendo de las condiciones ambientales en el momento de la cosecha (temperatura, humedad relativa), la proximidad a las estructuras de almacenaje, etc., aunque la mayoría de las veces el grano que proviene del campo está libre de insectos. Además, durante las operaciones de cosecha el grano pasa a través de la cosechadora, luego a un camión o tolva y posteriormente a la máquina embolsadora. Esto supone un riesgo reduciendo de infestación comparado con los granos almacenados en los acopios. 2) El silo bolsa en sí está libre de insectos, en comparación con los silos convencionales que pueden estar infestados antes de la cosecha. 3) Una vez que el grano es almacenado en silo bolsa, la cobertura de plástico actúa como una barrera física, previniendo la entrada de insectos. 4) La temperatura del grano dentro del silo bolsa sigue el patrón de la temperatura promedio del ambiente a lo largo del año. En consecuencia, en climas fríos, durante el otoño y el invierno, la temperatura del grano desciende por debajo del rango para actividad de los insectos (15,0 °C - 17,0 °C), reduciendo sustancialmente su desarrollo. 5) Cuando el grano es almacenado con CH por encima del límite para actividad de hongos, la concentración de O₂ disminuye rápidamente por debajo de 2,0% y la concentración de CO₂ puede aumentar por encima de 20,0%, creando un ambiente letal para los insectos.

Basado en estas consideraciones, la situación más crítica que podría facilitar el desarrollo de insectos en silo bolsas es cuando se almacena grano previamente infestado, el grano es almacenado durante el verano (temperatura del grano entre 25,0 °C - 30,0 °C) y el grano está muy seco como para crear una atmósfera letal para los insectos.

Fumigación con fosfina

La fumigación de silo bolsas con fosfina ha sido exitosamente implementada cuando se requiere un control de insectos. Cardoso et al. (2009) mostraron que aplicando una dosis de 1,0 g de PH₃ (3,0 g de fosforo de aluminio) por tonelada (en forma de pastillas de fosforo de aluminio y distribuidas cada 5,0 m a lo largo del silo bolsa) fue suficiente para

mantener 200 ppm durante 5 días en casi toda la masa de grano. El punto crítico fue el extremo de cierre de la bolsa, donde una reapiación luego de 3 - 4 días fue recomendada. En un estudio similar, usando una dosis de fosfina de $1,5 \text{ g m}^{-3}$ en trigo, Ridley et al. (2011) encontraron un control de todos los estadios de *Rhizopertha dominica* en todas las secciones de los silo bolsas fumigados.

Monitoreo de la calidad del grano (monitoreo de CO₂)

La respiración de los componentes bióticos de la masa de granos (hongos, insectos y grano) incrementa la concentración de CO₂ y disminuye la concentración de O₂. Por lo tanto, el grado de modificación de la composición gaseosa del aire intersticial puede ser relacionado a la actividad biológica dentro del silo bolsa. Sobre esta base, la medición de la composición gaseosa del aire intergranario puede ser usada como una herramienta de monitoreo para detectar precozmente problemas de descomposición en la masa de granos (Bartosik et al., 2008 b). El INTA desarrolló una tecnología de monitoreo de CO₂ junto con una empresa privada (Silcheck). El sistema requiere que un operario entrenado mida la composición de CO₂ en la atmósfera intersticial con un medidor portátil, cada 6,0 m a lo largo de la bolsa, perforando la cobertura de plástico con una aguja (esta operación requiere menos de 10 minutos para toda la bolsa). Luego la información es subida a un servidor donde los datos son automáticamente analizados y procesados, elaborando un índice de riesgo de almacenamiento sectorizado (Figura 7) y un índice de riesgo general para el silo bolsa. Las condiciones de almacenamiento del silo bolsa pueden ser monitoreadas por Internet. En el caso de que se detecten condiciones inseguras de almacenamiento, un informe automático es enviado al dueño del silo bolsa por correo electrónico, fax o mensaje de texto.

Figura 6. Concentración de CO₂ durante el almacenamiento en un silo bolsa sin problemas (CH de mayor que 13,5%) y 2 silo bolsas con grano de soja (13,5% CH o menos) con sectores en descomposición por roturas en la base de la bolsa. Fuente: Bartosik et al., 2008.

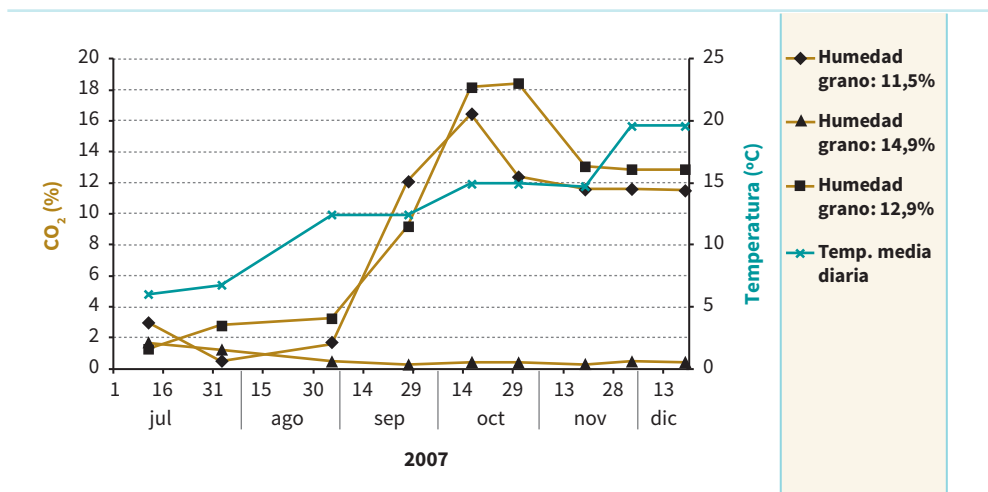




Figura 7. Monitoreo de CO₂ (arriba) y reporte de Internet (abajo) con información visual representado en una escala de colores el índice de riesgo de almacenamiento.

Recomendaciones para un exitoso almacenamiento en silo bolsas

Los resultados generales indican que el grano seco (humedad relativa de equilibrio por debajo de 67,0%) puede ser almacenado en silo bolsas por más de 6 meses sin perder la calidad del grano (medido como porcentaje de grano dañando por hongos, peso hectolítrico, poder germinativo, acidez de la grasa, parámetros nutricionales y organolépticos, entre otros). Cuando el CH del grano aumenta, la calidad comercial se puede mantener de 3 a 6 meses en invierno, y de pocas semanas a 3 meses en verano.

Si el silo bolsa contiene grano seco no se crea un ambiente letal para los insectos. Sin embargo, las bajas temperaturas de invierno en climas templados afecta el desarrollo de los mismos. Almacenar el grano con un CH que permita la actividad de hongos puede crear un ambiente letal para los insectos, pero el tiempo de almacenaje es limitado por el deterioro sobre la calidad del grano que produce la actividad de los hongos. La fumigación de los silo bolsas con fosfina es una metodología simple y efectiva para el control de insectos.

La elección del lugar donde se ubicará el silo bolsa es un factor clave. El lugar que se elija debe estar alto y con una leve pendiente para evitar la acumulación de agua de lluvia que puede, potencialmente, entrar al silo bolsa a través de perforaciones. Se debería realizar un alisado y nivelado en el lugar donde se ubicará el silo bolsa. El suelo no debe tener materiales que puedan dañar la parte inferior del silo bolsa durante las operaciones de llenado (como piedras, residuos de cultivos, tallos de malezas, etc.). Además, se deben evitar los lugares cercanos a árboles, dado que la caída de ramas puede dañar al silo bolsa. Mantener un alto nivel de hermeticidad es un factor clave para el éxito del almacenaje. Se deben tomar medidas para mantener la integridad de la cobertura de plástico durante

las operaciones de llenado y durante el almacenaje. Es también crítico hacer un buen sellado en el extremo de la bolsa. El termosellado parece ser la técnica más apropiada para cerrar la bolsa, asegurando un alto nivel de hermeticidad.

Ubicar los silo bolsas de a pares, dejando un camino abierto para las operaciones de descarga antes del siguiente par de silo bolsas. Con esta configuración, cualquier silo bolsa puede ser descargado en todo momento (por ejemplo, cuando un problema de descomposición fue detectado a través del monitoreo con CO₂), sin la necesidad de tener que descargar otra bolsa para acceder al silo bolsa objetivo.

Instalar un cerco perimetral para mantener los animales alejados, sean salvajes o domésticos (p. ej.: perros y gatos). Los cercos pueden ser permanentes, o cercos eléctricos, como los que se usan para el ganado. Los hilos de los cercos eléctricos se deben colocar a diferentes alturas, de acuerdo con el tipo de animales que existan en el lugar.

Algunos animales, como pájaros y roedores, no pueden ser controlados con cercos. Por lo tanto, se debe implementar un monitoreo y control de roedores. Mantener la limpieza, el césped corto y la aplicación de herbicidas en el área donde se ubican los silo bolsas ayudará también a prevenir la actividad de animales en dicho sector.

Los silo bolsas se deben inspeccionar periódicamente. Cualquier perforación debe ser sellada apropiada e inmediatamente. Evitar el calado excesivo silo bolsa, dado que los parches generalmente se despegan. Es conveniente tomar muestras de grano para control de calidad en el momento del llenado de las bolsas. El monitoreo de las condiciones de almacenamiento del grano se debe realizar midiendo las concentraciones de CO₂, ya que esta metodología no afecta la integridad física de la bolsa y provee una indicación confiable del estado de conservación de los granos.

Referencias

- Abalone R.; Gastón A.; Cardoso L.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2011. Gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo - bag. Part II: model sensitivity and effect of grain storage conditions". *Journal of Stored Products Research*, 47(4): 268 - 275.
- Bartosik R.; Rodríguez J. y Cardoso L. 2008 a. Storage of corn, wheat soybean and sunflower in hermetic plastic bags. En: *Proc. Int. Grain Quality and Technology Congress*, 15 -18 de Julio, Chicago, EE.UU.
- Bartosik R.; Cardoso M.L. y Rodríguez J. 2008 b. Early detection of spoiled grain stored in hermetic plastic bags (silo-bags) using CO₂ monitoring, pp. 550 - 554. En: *Proceedings of the 8th International Conference Controlled Atmospheres and Fumigation of Stored Products*, 21 - 26 de septiembre, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China.
- Barreto A.; Abalone R.; Gastón A. y Bartosik R. 2012. Computer simulation of gas concentration in the interstitial atmosphere of a wheat silo bag for typical agricultural areas of Argentina. En: *9th International Conference on Controlled Atmospheres and Fumigation on Stored Products*, 15 - 19 de octubre, Antalya, Turquía.

- Cardoso L.; Ochandio D.; de la Torre D.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2010. Storage of quality malting barley in hermetic plastic bags. En: International Working Conference on Stored Product Protection, 27 junio - 2 de julio de 2010, Estoril, Portugal.
- Cardoso L.; Bartosik R. y Milanesio D. 2009. Phosphine concentration change during fumigation in hermetic plastic bags (silo - bags). En: Proceedings of the International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. Conference, Technology and Management to Increase the Efficiency in Sustainable Agricultural Systems, 1 - 4 septiembre, Rosario, Argentina.
- Castellari C.; Marcos Valle F.; Mutti J.; Cardoso L. y Bartosik R. 2010. Toxigenic fungi in corn (maize) stored in hermetic plastic bags. En: 501 - 504, Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection, 27 de junio - 2 de julio, Estoril, Portugal. Julius - Kühn - Archiv, Bundesforschungsanstalt für Kulturpflanzen, Berlín, 1077 p.
- Darby J. y Caddick L. 2007. Review of the harvest bag technology under Australian conditions. CSIRO Entomology. Technical report N° 105. Disponible en: <http://www.csiro.au/resources/HarvestBagReport.html>. Accedido en junio de 2009.
- Gastón A.; Abalone R.; Bartosik R. y Rodríguez J. 2009. Mathematical modeling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silo bags). *Biosystems Eng.*, 104: 72 - 85.
- Massigoge J.; Cardoso L.; Bartosik R.; Rodríguez J. y Ochandio D. 2010. Almacenamiento de cebada cervecera en silos bolsa. En: Actas del IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola, 25 - 29 de julio, Vitoria, ES, Brasil.
- Ridley A.; Burrill P.; Cook C. y Daghil G. 2011. Phosphine fumigation of silo bags. *Journal of Stored Products Research*, 47(4): 349 - 356.
- Ochandio D.; Cardoso L.; Bartosik R.; de la Torre D.; Rodríguez J. y Massigoge J. 2010. Storage of canola in hermetic plastic bags, pp. 325-332. En: Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection, 27 de junio al 2 de julio de 2010, Estoril, Portugal. Julius-Kühn-Archiv, Bundesforschungsanstalt für Kulturpflanzen, Berlín, 1077 p.
- Ochandio D.; Rodríguez J.; Rada E.; Cardoso L. y Bartosik R. 2009. Almacenamiento de cebada cervecera en bolsas plásticas herméticas, pp. 238. En: Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Pacin A.; Ciancio Bovier E.; González H.; Whitechurch E.; Martínez E. y Resnik S. 2009. Fungal and fumonisins contamination in Argentine maize (*Zea mays* L.) silo bags. *J. Agric. Food Chem.*, 57: 2778 - 2781.

Este libro se terminó de imprimir
en la ciudad de Buenos Aires
en el mes de octubre de 2014

La única SILOBOLSA®
es PLASTAR.

SILOBOLSA®
PLASTAR

GRUPO KPR

*Silobolsa es una marca registrada de Plastar San Luis S.A.

CALIDAD
+
INNOVACIÓN TECNOLÓGICA
+
SERVICIO

COSECHA PROTEGIDA

SILOBOLSA® PLASTAR

50 AÑOS DE INVESTIGACIÓN
APLICADA A LA INDUSTRIA
DEL PLÁSTICO CON DISTRIBUCIÓN
EN TODO EL PAÍS.

LA CAJA FUERTE DEL CAMPO ARGENTINO



APLICA A PLASTAR SAN LUIS S.A.

Buenos Aires | (54-11) 4459-5577
Sunchales | Tel/Fax (03493) 45-2077/079
Facebook | /SilobolsaPlastar

WWW.SILOBOLSA.COM
0800-222-PLASTAR (7527)
silobolsa@plastargroup.com



El segundo libro de Almacenamiento de Granos en Silo Bolsas: Resultados de investigación 2009 – 2013 ofrece información generada luego de la presentación del primer libro de Silo Bolsas (2008), como así también rescata los trabajos destacados del primer libro. Los nuevos trabajos abarcan pautas de almacenamiento de diversos granos, modelado del ecosistema del silo bolsa, estudios logísticos y económicos, posibilidades de monitoreo, control de plagas y bases del entendimiento de la problemática de hongos y micotoxinas de los granos almacenados en silo bolsa.

A esta información se le agregan los conceptos fundamentales, como la implementación de Buenas Prácticas de manejo, para hacer del almacenamiento en silo bolsa una tecnología segura y eficiente, contribuyendo de esta manera a reducir las pérdidas de poscosecha, incrementar la eficiencia de manejo, mejorar la logística e incrementar la calidad y sanidad de los granos. En el marco del décimo año de vigencia del Convenio de Asistencia INTA - Empresas Fabricantes de Bolsas Plásticas, esta publicación es un claro ejemplo del potencial que pueden desarrollar las instituciones públicas y las privadas cuando cooperan para alcanzar objetivos comunes.



Ministerio de
Agricultura, Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación

SILOBOLSA®
PLASTAR

IpesaSilo 
Embolsa más