

61
Tel.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALGUNAS CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS EN LA
CONSERVACIÓN DE GRANOS ALIMENTICIOS**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA MECANICA)**

PRESENTA :

Omar Moisés Galicia Ávila

**Director de tesis:
Dr. Baltasar Mena Iniesta**



México D.F

1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**A mis padres,
a quienes les debo todo.**

Agradecimientos.

A la UNAM por todo el conocimiento y cultura que me ha brindado a lo largo de mis estudios.

Al PUAL por el apoyo recibido.

Al Instituto de Investigaciones en materiales por todas las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.

A fundación UNAM por las múltiples becas que me ha otorgado y que han servido para la conclusión de mis estudios.

A Baltasar Mena por toda la ayuda que me ha brindado, por las horas dedicadas a este trabajo y por sus invaluable consejos.

A Edgar, Gustavo y a todos mis compañeros del laboratorio de reología.

Introducción	3
Antecedentes	5
La economía agropecuaria en México	5
El sol como fuente de energía	7
Pérdidas poscosecha debido al mal manejo de grano desde el agricultor hasta el centro de distribución	10
Descripción del sistema de acopio y distribución de granos.	10
Cosecha	11
El sistema de poscosecha	12
Una infraestructura deficiente	13
Pérdidas poscosecha: un problema fundamental	15
Magnitud	15
Consecuencias	16
El desalentador panorama actual	16
Propuestas tecnológicas.	17
Conservación de granos	22
Factores que afectan la calidad de los granos	22
Humedad de los granos	23
Humedad de equilibrio	24
Daño físico	25
Plagas de los granos	25
Insectos de los granos almacenados	27
Secado de granos	28
Secado dentro del silo (In bin drying)	29
Flujo de aire para el secado	32
Resistencia de los granos al flujo de aire	33
El proceso de secado	36
Aireación de los granos	36
Beneficios de la aireación	41
Balance de energía para la aireación	42
Diseño del colector solar	44
Radiación solar sobre planos	44
Radiación y la constante solar	44
Posición del sol relativa a un plano sobre la superficie terrestre	45
Radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal	46
Radiación solar disponible	47
Medición de la radiación solar	47
Radiación sobre superficies inclinadas	48
Características ópticas de los colectores	49
Superficies selectivas	49
Transmisión de la radiación a través de cristales	50
Radiación total absorbida por el colector	52

Superficies selectivas	49
Transmisión de la radiación a través de cristales	50
Radiación total absorbida por el colector	52
Transferencia de calor en el colector	53
Balance de energía en un colector plano	53
Coeficiente total de pérdidas de calor	53
Energía útil del colector	55
Consideraciones de diseño para el colector del silo	57
Cálculo del colector	58
<i>Caracterización del secado en el silo</i>	61
Caracterización teórica	61
Estudio de casos	63
Costos	69
<i>Experimentación</i>	72
Materiales y equipo	72
Instrumentación	73
Metodología	74
Resultados	77
<i>Conclusiones</i>	87
<i>Bibliografía y Referencias</i>	89

Introducción

México ha sido tradicionalmente un productor de maíz, ya que éste es base de la alimentación de las familias y sustento del campesino. La falta de organización en la producción agrícola y la ausencia de un esquema agrario efectivo y moderno, pone en riesgo lo que hasta hace poco era uno de los pilares de nuestra economía productiva: el cultivo y la comercialización del maíz.

El cese del paternalismo gubernamental junto con la pretensión de reconcentrar la tierra, al parecer no sólo no está cumpliendo con su objetivo sino que podría arrastrar al país hacia una peor crisis rural y una creciente dependencia del extranjero. Es vital tratar de encontrar soluciones económicas, tecnológicas y políticas que sean eficaces para tratar de salvar al agro nacional.

Los problemas que actualmente padece la economía del maíz son consecuencia directa de sistemas ineficientes y mal planeados de posproducción, sistema que tiene pérdidas cuantiosas en cantidad y calidad desde la cosecha hasta que el producto finalmente llega al consumidor. Estas mermas ocurren principalmente durante el acondicionamiento del grano previo al almacenamiento y durante este último, ya que los sistemas de almacenaje no cubren las necesidades actuales.

La pérdidas poscosecha en el país y en el mundo son cuantiosas. Si consideramos la cantidad de granos que se pierde anualmente nos damos cuenta de la cantidad de dinero y recursos perdidos. Si las pérdidas poscosecha pudieran reducirse, no solamente habría un ahorro económico, sino que también lograríamos reducir las importaciones de granos y gran parte de los problemas del agro nacional podrían ser resueltos.

Entre las pérdidas poscosecha podemos contar las pérdidas por daños mecánicos, las pérdidas por infestaciones y por consecuencia pérdidas en la calidad final del producto. Las más significativas son las pérdidas por infestación debidas a insectos y hongos.

Gran parte de las pérdidas por infestaciones se deben a la humedad excesiva del grano y a los inadecuados sistemas de almacenamiento; además este problema es agravado por las condiciones climáticas de nuestro país. Es por ello que se deben destinar grandes recursos económicos para mantener la humedad de los granos en un estado óptimo para ser almacenados.

La mayoría de los granos son cosechados cuando tienen alrededor del 20 al 30% de humedad, y la humedad requerida para un almacenamiento seguro varía del 10 al 13%, lo cual indica que si tomamos en cuenta la producción mundial de granos, habrá que evaporar millones de toneladas de agua cada año. Esta enorme cantidad de agua, tendrá que ser removida por medio de secadores mecánicos que utilizan combustibles fósiles; combustibles que además de ser cada vez más costosos y contaminantes su disponibilidad será menor en años subsecuentes.

Una solución técnica favorable al problema de conservación de granos alimenticios es el silo solar hexagonal, diseñado por el Dr. Baltasar Mena en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Este tipo de silo minimiza las pérdidas de grano debidas a daños mecánicos, reduce los costos de construcción y cuenta con un sistema solar de aireación y conservación de grano, el cual permite preservar al producto en óptimas condiciones y libre de cualquier plaga de una manera económica y ecológicamente aconsejable.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la viabilidad del silo solar hexagonal como una solución al problema del almacenamiento de granos en México. Se analizan sus ventajas y desventajas y se dan algunas alternativas para mejorar el sistema de almacenamiento.

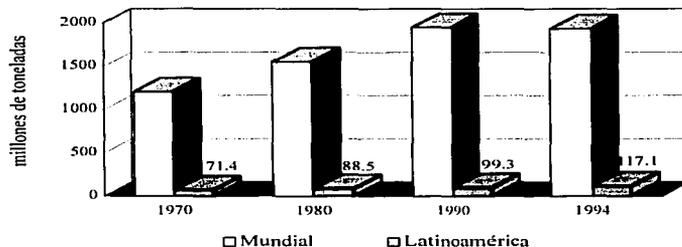
El sistema solar de conservación y aireación de grano es rediseñado, presentando además algunos aspectos sobre la operación del silo en diferentes condiciones climáticas y finalmente el costo comparado con un sistema de secado industrial.

Antecedentes

La economía agropecuaria en México

Aunque la población agrícola en los países latinoamericanos representa un alto porcentaje, y la base de su dieta son los cereales (maíz y trigo). Su producción de cereales no alcanza el 10% de la producción mundial, renglón en el que son muy superiores países desarrollados como los Estados Unidos, Rusia y Canadá (ver gráfica 1).

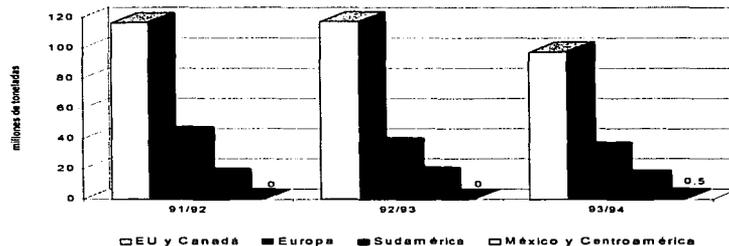
Gráfica 1.- Producción de cereales en Latinoamérica.



Fuente: Web FAO <http://apps.fao.org/cgi-bin/nph-db.pl>

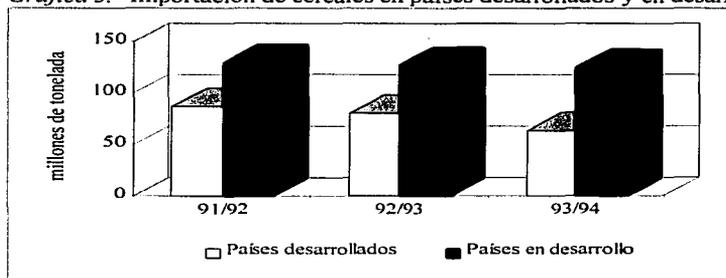
Hasta los años 70, la actividad agropecuaria representaba un generador de divisas para nuestro país, pero al entrar en la década de los 80 México se ha convertido en país importador, con balanza comercial negativa en ese renglón, lo cual se generaliza también en Latinoamérica (ver gráficas 2 a 4).

Gráfica 2.- Exportación de cereales.



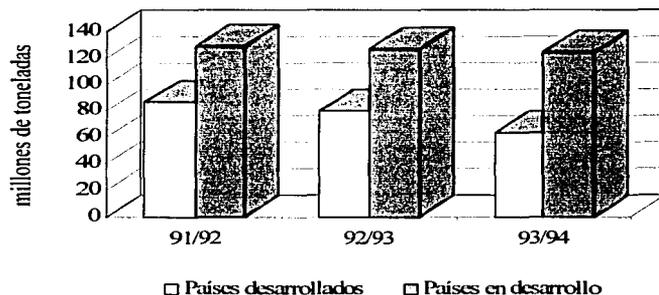
Fuente: Web FAO <http://apps.fao.org/cgi-bin/nph-db.pl>

Gráfica 3.- Importación de cereales en países desarrollados y en desarrollo.



Fuente : Web FAO <http://apps.fao.org/cgi-bin/nph-db.pl>

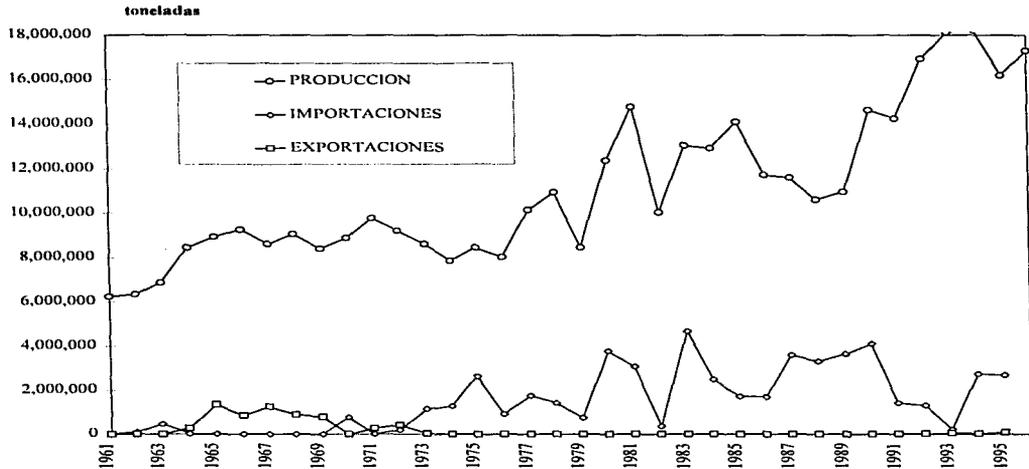
Gráfica 4.- Importación de cereales en Latinoamérica.



Fuente : Web FAO <http://apps.fao.org/cgi-bin/nph-db.pl>

En México, la situación es clara: el grano que más se consume y produce por mucho es el maíz. Sin embargo a pesar de que la producción se ha incrementado más o menos sostenidamente en las últimas tres décadas, las importaciones de maíz también lo han hecho (ver gráfica 5). Mientras, las exportaciones alguna vez generadoras de divisas ahora no son más que un recuerdo que al parecer nunca volverá.

Gráfica 5.- Producción e intercambio comercial de maíz en México (1961-1995).



Fuente: Web FAO <http://apps.fao.org/cgi-bin/nph-db.pl>

Aunque otros sectores productivos se fortalecen ante el descuido de la agricultura, México difícilmente volverá a conocer la autosuficiencia alimentaria. Ésta debería ser un objetivo prioritario en la política económica de cualquier país, pues es una forma de buscar su soberanía.

Los aspectos ilustrados anteriormente, darán una mejor idea de lo que las pérdidas poscosecha pueden significar. Las pérdidas poscosecha son importantes si consideramos que una gran parte de la producción y de las importaciones de granos se pierden, además de agravar los problemas ya enunciados. De ello hablaremos en el siguiente capítulo.

El sol como fuente de energía

Desde hace algunos años la investigación y el desarrollo de tecnologías que hacen uso de la energía solar se ha acrecentado. Los problemas energéticos actuales hacen que la energía solar sea una fuente viable para algunas aplicaciones.

Casi toda la energía proviene de la combustión de combustibles fósiles. Estos combustibles, además de no ser una fuente renovable de energía, contaminan el medio ambiente.

El excesivo crecimiento demográfico y las crecientes necesidades del mundo moderno, hacen que cada vez el consumo energético sea mayor.

La energía obtenida por medios convencionales, es energía que se obtiene con un alto costo contaminante, y a pesar de que las tecnologías se han mejorado, no es posible que la energía proveniente de los combustibles fósiles sea totalmente limpia.

Incluso la energía nuclear que no contamina el aire no es totalmente limpia debido a que genera desechos que son difíciles de manejar y de alto riesgo.

Es por ello que la energía solar se vislumbra como una fuente atractiva de energía, y si toda la energía proveniente del sol se pudiera aprovechar, ésta bastaría para satisfacer todas las necesidades energéticas actuales de la humanidad¹.

Todos los países del mundo reciben energía solar. La cantidad varía desde algunos cientos de horas por año en los países del norte y en la parte más baja de Sudamérica, hasta cuatro mil horas por año en partes situadas más al centro del planeta.

La energía solar, es una fuente de energía limpia, segura y gratuita. Sin embargo, también tiene sus desventajas: No está disponible en todo momento que se requiera, no se puede almacenar, y es de difícil conversión.

Las tecnologías actuales de conversión de energía solar a eléctrica aún son ineficientes y pasarán algunos años antes de que podamos obtener una cantidad importante de energía eléctrica proveniente del sol.

A pesar de todo ello, la energía solar es atractiva cuando no se requiere una cantidad muy grande de energía, y desde hace unos años es usada para calentar agua, acondicionar interiores y para cocinar.

La energía solar puede ser usada de manera efectiva para secar algunos productos alimenticios. En México, tradicionalmente los granos se secan con ayuda de la energía solar aunque no se use ningún tipo de secador para este propósito. El secado simplemente se lleva a cabo sobre alguna lona o tela colocada a la intemperie.

Se han llevado a cabo numerosos trabajos en los cuales se usa la energía solar para secar granos, en la mayoría de éstos se considera que el grano tiene que ser secado en una capa delgada de grano, y el tiempo de secado considerado en algunos varía desde unas cuantas horas hasta unos días secando diferentes cantidades de grano desde 200 kg de maíz hasta 3 toneladas.

En ninguno de estos trabajos se ha estudiado la posibilidad de secar una cantidad grande de grano dentro del silo, y en muchos de ellos no se han considerado aspectos que son muy importantes para conservar el grano en condiciones adecuadas; como son la temperatura máxima a la que el aire puede secar el grano sin dañarlo o el gasto recomendado para secar el grano, además de no considerar el tiempo óptimo de secado para evitar que el grano sea atacado por hongos o el tiempos adecuado de secado para lograr que el área requerida por los colectores sea mínima.

En este trabajo, se analizarán las posibilidades de mantener el grano en condiciones óptimas en un silo hexagonal usando energía solar para el sistema de aireación y conservación . Se considerarán los elementos necesarios para mantener el grano en condiciones óptimas ya sea para el consumo humano o como semilla.

Pérdidas poscosecha debido al mal manejo de grano desde el agricultor hasta el centro de distribución

En México el sistema de distribución de granos es ineficiente y obsoleto. Esto implica que existan grandes pérdidas de granos en todo el proceso que se lleva a cabo desde que el grano es cosechado, hasta que es entregado en los puntos de consumo final.

Para entender a fondo el problema y la situación actual es necesario hacer una breve descripción del sistema de distribución del grano en México.

Descripción del sistema de acopio y distribución de granos.

Una vez que el grano es cosechado por el agricultor, el agricultor procede a secarlo como lo ha hecho tradicionalmente, esto es poniéndolo en el suelo y dejándolo secar al sol. Una vez que el grano está seco procede a guardarlo en costales para comercializarlo, generalmente, en México el agricultor pequeño guarda un 30% de su producción para autoconsumo.

El exponer el grano al sol y dejar que así se seque, es inadecuado, ya que el grano se ensucia y está expuesto a toda clase de insectos y aves. El grano que está encostalado a veces pasa algún tiempo en malas condiciones de almacenamiento lo que provoca que se desarrollen larvas de gorgojos y otras plagas.

El campesino, transporta su cosecha hasta los centros de acopio. En estos centros de acopio, los encargados del centro abren los costales y hacen el recuento del grano. Es común, que en esta operación se haga un descuento al precio del maíz, debido a que el maíz tiene una humedad mayor a la que establece la norma y al campesino le paguen menos por su cosecha.

Ahora bien, en estos centros de acopio el almacenaje es totalmente inadecuado, ya que el maíz se coloca sobre el suelo en bodegas que la mayoría de las veces son inapropiadas. Estas bodegas o cuartos carecen de un sistema de ventilación y muchas veces no protegen al grano de la intemperie, provocando que se desarrollen toda clase plagas como gusanos, gorgojos etc. Además de los roedores que toman ventaja de esta situación.

En estos centros de acopio, se tienen grandes pérdidas debido a las plagas, pero además de las pérdidas cuantificables en cantidad de grano, existen las pérdidas en la calidad del mismo dando como resultado que muchas veces no sirva para el consumo humano, teniendo como consecuencia que el grano destinado para ello tenga que ser importado.

A continuación, el maíz tiene que ser transportado hasta los puntos de consumo, que generalmente son centros urbanos o industriales. El maíz sufre grandes daños mecánicos debido al continuo proceso de carga y descarga, además es común que el grano permanezca mucho tiempo en el transporte y sufra un gran deterioro.

Una vez que el maíz ha llegado a los almacenes de A.N.D.S.A, el maíz es cargado en los silos, causando un gran deterioro mecánico, y existen grandes mermas por pulverización y fricción del grano con las paredes del silo.

A continuación se hace una descripción detallada del sistema de distribución del grano y pérdidas en cada una de las etapas.

Cosecha

Para comprender la problemática del sistema de cosecha, hay que tener una idea acerca de la organización del campo.

En México existen múltiples formas de tenencia de la tierra, pero las siguientes son las más extendidas:

- 1.- Comunidad
- 2.- Ejido
- 3.- Otras (Propiedad , Rentistas, etc.)

La comunidad y el ejido son dos modalidades básicas, esto es, 29,951 unidades que agrupan a 3,022,340 productores que detentan el 52% del territorio nacional: 1,028,768 Km². Considerando exclusivamente a ejidatarios y comuneros, en principio pueden hacerse los siguientes tres conjuntos, basados en la clasificación de CEPAL sobre ejidatarios y comuneros para 1990:

- 1.- Productores de autoconsumo
- 2.- Productores diversificados
- 3.- Productores comerciales.

Los productores orientados al autoconsumo son minifundistas con prácticas mágico-religiosas alrededor de la agricultura, con utilaje indocolonial y con poco uso de agroquímicos, y cuya producción se destina al autoconsumo humano y productivo y parcialmente al mercado (35%). Siembran con el temporal en sistema de milpa (maíz y frijol, intercalados), en algún momento de marzo a mayo y cosechan según se haya sembrado, de agosto a septiembre.

Para guardar la producción cuentan con graneros o con parte de la casa destinada para tal efecto. Los graneros pueden ser cónicos o cuadrangulares, en alto o al ras del suelo. Se guarda primero el clote sin hojas y después nada más se conserva el grano. De todas formas, hasta ahora no han logrado superar los dos problemas básicos del guardado de la cosecha en los graneros tradicionales: **las ratas** que devoran parte de la misma, y los **hongos** y **los insectos** que lo carcomen (chahuistle y gorgojos entre otros muchos).

Estos productores conservan parte de la cosecha y lanzan al mercado el resto al saber de los problemas del almacenamiento del maíz. Si siembran 3 ha (en promedio los ejidatarios y comuneros cosechan 3.6 ha) pueden cosechar hasta 2.5 ton (800 kg/ha).

Si consumen al año entre la familia y los animales 1.6 ton, pueden vender el remanente para comprar lo que necesiten y no producen. Venden generalmente más del remanente porque no pueden comprar todo lo que necesitan y, según el clima, venden desde un tercio a una cuarta parte de la cosecha y cuando se les acaba el maíz, tienen que volver a comprarlo en el mercado, pagando un sobreprecio.

En su sistema, su racionalidad no es hacia la producción para la venta y ganar así dinero, sino solamente obtener lo que necesitan para alimentarse y, como no pueden resolver sus problemas de almacenamiento, venden parte de su maíz en el mercado, mismo en el que comprarán, a lo largo del año, el maíz que necesitan.

Los diversificados siembran también café aparte de maíz y frijol. El maíz es alimento humano y el café es producto de venta. A pesar de su diversificación y de sembrar además del maíz algún cultivo comercial (vainilla, tabaco, frutas) su nivel económico es sólo un poco superior a los tradicionales.

Los campesinos abiertos al comercio generalmente no siembran maíz, sólo el necesario para el autoconsumo.

De manera global la agricultura maicera es predominantemente minifundista, dado que el 70% de los predios maiceros son menores de 5 ha y, para el maíz temporalero menos del 15% de la cosecha del ciclo fuerte (primavera-verano) se obtiene en predios mayores de 10 ha.

El sistema de poscosecha

Considerando que tradicionalmente en México la producción de maíz la llevan a cabo los pequeños productores de escasos recursos, el manejo que ellos le dan en sus campos posteriormente se reflejará en la calidad del grano, que se comercializa en los centros urbanos de consumo y de industrialización.

El sistema poscosecha puede explicarse, a *grosso modo*, a partir de la existencia de dos formas de producción: la de autoconsumo (rural) y la comercial anteriormente descritas.

La cosecha es secada de forma natural, casi siempre se desgrana en forma manual y finalmente se limpia antes de ser guardada. En el desarrollo de esta secuencia el maíz se infesta y siempre será siempre de baja calidad y por lo tanto de bajo precio, lo que finalmente se traducirá en un pago miserable al campesino por su producto, castigado por el deterioro y las impurezas.

El sistema comercial sustenta su base en agricultores que no solamente buscan reducir pérdidas en las etapas posteriores a la producción del grano, sino que pretenden obtener beneficios en cada una de ellas, a través de mejoras en el acondicionamiento (limpieza y secado), comercialización y transporte. Este sector antes dominado por instituciones estatales, ahora se conforma primordialmente por tres grupos, en orden de importancia:

- Privado
- Paraestatal (ANDSA)
- Oficial (Boruconsa)

En la tabla 1 se da una idea de las profundas diferencias entre las dos modalidades del sistema poscosecha.

Tabla 1.- Diferencias generales entre los sistemas poscosecha rural y comercial.

Sistema rural	Sistema comercial
Semilla tradicional	Semillas mejoradas
Poco uso del riego y fertilizantes	Acceso al riego y fertilizantes
Tierra marginal, laderas de fuertes pendientes, de bajos rendimientos	Tierras generalmente de buena calidad, mayor rendimiento y diversificación.
Sin acceso a créditos	Crédito accesible
Almacenes rústicos, poca protección contra plagas	Acceso a silos y bodegas
necesitan apoyo gubernamental por falta de competitividad.	Acceso a apoyos del gobierno y adaptación a los cambios de mercado

Fuente: elaboración propia, basada en Moreno E., *El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*, PUAL, 1995, pp. 234.

Una infraestructura deficiente

Hay quienes afirman que las cosechas mexicanas son suficientemente sanas, limpias y secas como para permitir su almacenamiento seguro, sin peligro de verse invadidas por plagas. Sin embargo pensar de tal forma significaría ignorar primero un problema real que es la pérdida de calidad de los granos casi automática desde su cosecha y segundo la importancia del acondicionamiento.

Después de su cosecha los granos deben de acondicionarse. Se entiende por acondicionamiento al conjunto de operaciones mecánicas y químicas al cual son sometidos los granos desde su cosecha hasta el momento de almacenarse. Incluye principalmente limpieza (de impurezas, granos rotos, insectos, etc...) y secado pero también medidas preventivas como la aplicación de insecticidas. El acondicionamiento adecuado evitaría pérdidas pero puede resultar **incosteable** si se manejan bajos volúmenes de grano, mismos que manejan la mayoría de los productores.

En general se puede decir que la infraestructura que sustenta al sistema poscosecha mexicano es insuficiente en cantidad y en calidad, para almacenar todos los granos que se producen y menos para los que se importan. Esto conlleva a acciones emergentes como la renta de bodegas, generalmente inadecuadas para el almacenaje de granos, o el montaje provisional de estructuras a la intemperie, en las que en el mejor de los casos se cubren los granos con lonas. Estas medidas sólo resuelven temporalmente el problema sin atacar sus raíces. Además los almacenes están en mal estado, muchas veces requieren grandes inversiones para su operación sin que esto resulte en la buena calidad del grano.

Ante el avance del TLC y el incremento de las importaciones la insuficiencia de capacidad se agravará. La falta de espacio se observa desde los centros de acopio que reciben provisionalmente el grano para trasladarlo a las grandes bodegas, y vistos como "instalaciones rústicas con pocas facilidades de descarga, acondicionamiento y almacenaje"². La reducida capacidad de estos centros resulta, durante la época de cosecha, en su rápida saturación y la necesidad de implementar acopios a la intemperie por largos períodos.

No existe un organismo central que determine y difunda todas aquellas prácticas y recursos a tenerse en cuenta para almacenar granos en México. La mayoría de los almacenes por lo general sólo cumplen funciones de compraventa, sin que necesariamente mantengan las condiciones adecuadas de conservación. Las bodegas tecnificadas son minoría y casi siempre utilizadas por el sistema comercial privado, encabezado por ANDSA (véase tabla 2).

Tabla 2.- Empresas almacenadoras mexicanas y su participación.

Empresa	Volumen almacenado (% del total)
ANDSA	62 %
Almacenadora S.A.	10.5 %
Monterrey	7.8 %
SOMEX	2.8 %
Otras (Sertín, Vector, Prime, etc...)	16.9 %

Fuente: Elaboración propia con base en Torres F. *El sistema poscosecha y la alimentación nacional*, en "El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas", PUAL, México, 1995, pp.199

Otra dificultad en México es la heterogeneidad de los sistemas de almacenamiento acorde con los agroclimas regionales y los recursos, pueden ser desde silos cónicos, bodega plana de cientos de toneladas de capacidad hasta los del medio rural: troje, cuescomate, zincalote que generalmente no rebasan capacidades de 3 ton.

A lo anterior se suma la dificultad de preservar productos de calidad heterogénea en un mismo almacén, cuando se reciben granos con diferentes daños, diferentes humedades, diferentes grados de infestación, lo que merma inevitablemente la calidad del conjunto.

Finalmente, el sistema de transporte mexicano de granos sufre carencias en su disponibilidad y funcionamiento. Es un sistema complicado, mal planeado, en el que ocurre con frecuencia el llamado "turismo de granos" (las cosechas pueden llegar a recorrer grandes distancias sin objetivo fijo). Es insuficiente en capacidad por lo que provoca inmovilizaciones de granos del campesino, de centros de acopio, de bodegas y en puertos, agudizándose este déficit al final de cada ciclo agrícola. Muchas veces es obsoleto, presentando problemas de carga y descarga, causando daños físicos al maíz, es lento y absorbe mucha mano de obra. Así, los costos generados directamente por el transporte se estiman en 10% y las mermas de un 10%.

Otro problema es la accesibilidad del transporte, dada la existencia de comunidades y municipios enteros que por su ubicación geográfica sufren desabasto de alimentos y dependen de intermediarios a los que se les debe pagar mayor precio.

En el plano internacional, tampoco existe una red capaz de movilizar eficientemente los crecientes volúmenes de importación provenientes en su mayoría de los EU. Por lo que "a partir de unos cuantos puntos fronterizos (Nuevo Laredo, Piedras Negras, Cd. Juárez) así como de 4 o 5 puertos (Veracruz, Tuxpan, Manzanillo, Guaymas) se puede ejercer sobre México un gran control estratégico en materia de alimentos"³.

En breve, un sistema de transporte carente como el nuestro es sinónimo de incompetencia e improvisación.

Pérdidas poscosecha: un problema fundamental

Magnitud

Estimaciones hechas por la FAO sobre las pérdidas poscosecha señalan que, en términos generales, se pierde un 5% de la cosecha mundial de granos antes de llegar al consumidor. Sin embargo, la magnitud de las mermas varía de país a país, dependiendo en gran medida de sus condiciones geográficas y tecnológicas. En algunos países de Asia, América Latina y África, las pérdidas son del orden del 30% de la cosecha anual.

En 1974, una encuesta realizada a nivel nacional estimó pérdidas del 30% por prácticas deficientes de almacenamiento, y en años recientes los programas ligados a la alimentación han estimado conservadoramente mermas del 10% de las cosechas a causa de deficiencias en las prácticas poscosecha, sin embargo siguen siendo del orden del 20-30% e incluso del 60% en zonas del trópico húmedo⁴.

ANDSA (Almacenes Nacionales de Depósito) sólo reporta un 2% de mermas en el volumen que maneja. La FAO estima por su parte para México pérdidas de entre 10 y 25%.

Podemos hacer una breve estimación del valor y las magnitudes reales de las pérdidas en lo que respecta al maíz y otros granos en México.

Consideremos la producción de granos en 1994 y siendo optimistas un 15% de pérdidas.

Grano	Producción (miles de toneladas)	Valor (millones de pesos)	Pérdidas (millones de pesos)
Maíz	21311	13852	2078
Trigo	4262	2727	409
Arroz	376	206	31
Sorgo	3708	1483	222
Total	31015	18268	2740

Sumando las importaciones que sumaron 173 millones de dólares que equivalen a 1072 millones de pesos de los cuales se perdieron 160 millones de pesos. **Se perdió un total de 2900 millones de pesos.**

Podemos decir que si se hubieran evitado las pérdidas poscosecha podríamos haber ahorrado el dinero suficiente para reducir a cero las importaciones y seríamos un país autosuficiente en granos.

Consecuencias

“Las pérdidas agrícolas afectan, directa e indirectamente, a los diversos entes económicos y sociales que conforman la población”⁵. Sus efectos los resienten más quienes menos recursos tienen, particularmente los productores temporeros del medio rural, y en menor grado la industria procesadora de alimentos. Los deméritos en cantidad y calidad afectan la competitividad y la comercialización de los granos básicos, situación especialmente grave, dadas las nuevas circunstancias de apertura de la agricultura mexicana y la recesión que hoy enfrenta la economía ante la devaluación monetaria.

Desde la década pasada se importan alrededor del 30% de las necesidades de consumo humano de granos y cereales, valor semejante al de las pérdidas, por lo que de eliminarse se solucionaría parte del problema alimentario interno así como la dependencia externa.

Las pérdidas poscosecha, cuyos montos ponen en riesgo la seguridad alimentaria de los países pobres, pueden solucionarse de manera relativamente sencilla, si existe la suficiente voluntad política entre el gobierno para apoyar los avances técnicos generados y mejorar las grandes deficiencias en la infraestructura del manejo de granos.

“Es más rentable proteger lo cosechado que invertir en costosas infraestructuras para incrementar la producción agrícola”⁶. Entonces el problema central a resolver en el sistema poscosecha, es hallar propuestas eficaces para eliminar o al menos reducir las pérdidas de producto, preservando hasta donde sea posible su calidad.

Estas propuestas, si es que se logran materializar, representarían instrumentos de enormes beneficios a todos los niveles.

El desalentador panorama actual

La desventaja competitiva de México es una realidad en la mayoría de nuestros más importantes productos agropecuarios. Esto obedece, en primer lugar, a la brecha tecnológica de México respecto a los países del norte evidente en términos de cosecha/ha y productividad/trabajador, a nuestra inferior provisión de recursos naturales y a las diferencias en las políticas agropecuarias de fomento, caracterizado en EU y Canadá por la canalización de enormes apoyos y subsidios al sector primario.

La situación de las regiones de pequeños productores de maíz es desesperada. Estas regiones se han visto inundadas de maíz proveniente del extranjero, el cual se vende a través de Conasupo. Su efecto en la disminución de precios es real, pero esto tiene diferentes consecuencias en el caso de los

productores que en el de los consumidores, como las siguientes: la pérdida de maíces criollos por la caída de la actividad agrícola; en el mismo sentido, pérdidas de superficie destinadas a la agricultura debido a la erosión de los suelos ante el abandono de labores culturales que mínimamente sostienen su fertilidad y humedad

La inmensa mayoría del sector social agrario son campesinos temporaleros, donde lo más relevante que tienen en común entre ellos es la profunda miseria de vida y la falta de perspectiva de cambio.

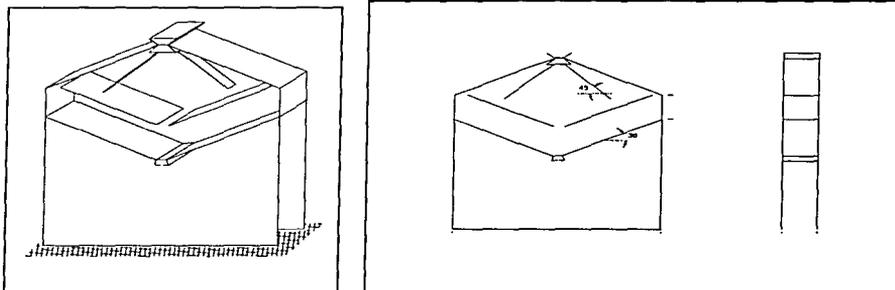
Los campesinos pobres no tienen ninguna posibilidad de competencia ante la apertura comercial del maíz, como agricultores (800 kg/ha frente a 8-9 mil de otras partes), ni siquiera de autoconsumo ya que sale más barato comprar el maíz que producirlo.

Propuestas tecnológicas.

Como hemos hablado a lo largo de este capítulo el sistema de poscosecha de nuestro país sufre enormes deficiencias y es urgente encontrar soluciones tecnológicas adecuadas a la situación particular de México. El silo solar hexagonal puede ser un opción tecnológica viable para resolver algunos de los problemas acerca del acondicionamiento y conservación de granos.

Uno de los principales problemas es el diseño y construcción de silos, tema que se discutirá brevemente. A pesar de que existe un gran número de silos con formas geométricamente diversas, la mayor parte son de tipo vertical. Este tipo de geometría acarrea problemas tales como la aparición de esfuerzos dinámicos "secundarios" durante el vaciado, la distribución no uniforme de esfuerzos en las paredes, destrucción del grano debido a la fricción, compactación irregular de los materiales dentro del silo en el proceso de llenado, y la dificultad en el diseño de la tobera de descarga, sólo por nombrar algunos. En el silo hexagonal los granos fluyen al interior del silo a través del alimentador, el cual distribuye el flujo en dos canales simétricos, ambos a 45° con respecto a la horizontal (ver figura).

Perspectiva simple del silo hexagonal.



La sección transversal hexagonal está dividida en dos secciones interiores, por medio de dos placas transversales. La inclinación de las paredes del fondo del silo y las placas es de 30° con respecto a la horizontal, ya que este ángulo es similar a los ángulos de reposo de los granos más comúnmente almacenados en silos.

Esta inclinación tiene como propósito reducir los esfuerzos dinámicos responsables de las fracturas en las paredes del silo, además de obtener un flujo homogéneo y de baja fricción, y tratar de eliminar la compactación y formación de polvo, evitándose de esta manera daños al material. En el llenado, el grano se acomoda de manera natural y sin compactarse demasiado, lo cual es completamente deseable. Además se evita el riesgo de explosión a causa de la formación de tamo (maíz pulverizado), accidente común en silos convencionales.

Aunque en la literatura no existe una cuantificación de las pérdidas debidas a la pulverización y compactación del grano, es evidente que éstas son cuantiosas y por medio de este sistema pueden eliminarse. De nada sirve invertir en semillas mejoradas y en especies resistentes al ataque de plagas, si el grano se daña por fricción y choques.

La estructura, formada por una o varias celdas del tipo antes descrito, se encuentra soportada por medio de paredes laterales. La altura de la estructura es tal, que permite el paso de transportes terrestres por la parte inferior para recibir los granos durante el vaciado.

Además, el costo total de un silo hexagonal de gran capacidad, es considerablemente menor que el de un silo vertical de similar capacidad. Esto es debido, en gran parte, al sistema de construcción a base de losas de concreto, el cual permite abatir costos de construcción considerablemente.

El principal problema que pretende remediar el silo solar hexagonal es la conservación de los granos cosechados, para lo cual el silo está dotado de un sistema de secado solar y de aireación. Gracias a dicho sistema y a su estructura, el silo protege al producto de todas las causas de deterioro, que son en términos breves la intemperie y las plagas. El proyecto, está orientado a la obtención de una estructura con tendencia bioclimática, que por su diseño mantenga a muy bajo costo energético las condiciones adecuadas del microclima interior del silo para la excelente conservación del grano.

Por otro lado, el nuevo sistema de almacenamiento de granos mediante energía solar, abate los costos de maquinaria de secado y aireación de grano; no utiliza combustible alguno, no perjudica la ecología del ambiente, permite un control absoluto de la calidad del grano almacenado y no requiere mantenimiento.

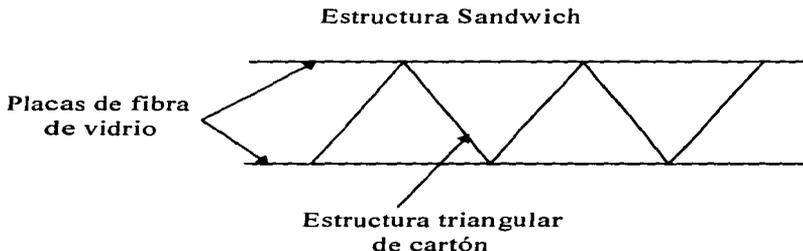
Dada la organización del campo mexicano, que en su mayoría cuenta con pequeños y medianos productores (comunitarios y ejidatarios), se detectó la necesidad de dichos productores de contar con silos almacenadores de mediana capacidad (2 a 3 toneladas) para sus cosechas de granos. Este silo pequeño sería de bajo costo al ser construido con materiales ligeros, baratos y disponibles en la región en donde se utilice. Al ser hermético sería eficiente en la protección contra plagas y el clima. Esto resolvería el problema de los pequeños agricultores del almacenamiento de sus cosechas y gracias a su versatilidad de transporte facilitaría las tareas de acopio y eliminaría completamente el encostado de los granos.

Se ha llegado a un diseño de tamaño y capacidad óptimo. El diseño final es un silo excelente para transportarse, de costo muy pequeño debido a que está fabricado en placas compuestas de fibra de vidrio, los materiales a base de desechos como la fibra de henequén pueden ser incorporados a la parte superior del silo (techo) y a las paredes laterales, ya que estas partes no están sometidas a ningún esfuerzo. (ver figura 1)

Los costos de fabricación de este tipo de silo serían mínimos, ya que una estructura de fibra de vidrio es muy resistente y ligera, además los moldes de fabricación pueden ser utilizados cientos de veces y se pueden fabricar muchos en serie. Como la fibra de vidrio es lisa, se evita al grado máximo la fricción en las paredes del silo.

Su estructura tubular de acero provee estabilidad y resistencia, además este tipo de tubo es totalmente comercial y de costo muy bajo. Las uniones se pueden sellar fácilmente y no requiere de un ensamblaje complejo.

La fibra de vidrio está reforzada por medio de una estructura tipo sandwich, esta estructura interior de la fibra de vidrio lo hace resistente y ligero, además de ser resistente a la intemperie y al ataque de todo tipo de infestaciones. Tanto la fibra de vidrio como las tapas superiores tienen muy buenas características térmicas, aislando el maíz del frío y el calor excesivo. Se puede limpiar fácilmente y el polvo generado por el maíz se puede eliminar fácilmente con ayuda de orificios ubicados en la parte inferior del silo.



Es fácil de cargar ya que su altura no es muy grande, y su elevación respecto del suelo permite que el maíz se pueda encostalar si se desea. Además el silo queda fuera del alcance de roedores y rastreros.

Para descargar el silo, solamente se desliza la parte inferior media del silo y el maíz cae por gravedad. Este tipo de silo está diseñado para poder transportarse en cualquier tipo de camión tipo tándem, ya que su tamaño lo permite, cada camión podría cargar desde 6 hasta un total de 9 silos si el camión es grande.

En este caso la posibilidad de ponerle ruedas al silo implicaría un aumento considerable en el costo y eso no lo hace viable económicamente.

En principio, este tipo de silo sería costado por las compañías a las cuales les interese tener un maíz de mejor calidad, incluso CONASUPO podría cambiar el sistema actual gradualmente por este. Los beneficios en la calidad del maíz, lo hacen atractivo económicamente, si se piensa que gran parte de la cosecha no se perderá en almacenes inadecuados.

La compañía le entregaría al campesino el silo en tiempo de cosecha, y una vez que el silo está lleno, un camión de la compañía recogería varios de éstos, agilizando el transporte y evitando que el maíz sufra un deterioro al encostarlo. Además, el agricultor tendría mayores beneficios económicos al tener un producto de mejor calidad.

Los centros de acopio funcionarían diferente: los centros de acopio recogerían los silos llenos y el contenido de éstos podría ser colocado en otro silo fijo de mayor capacidad o simplemente mantendrían el maíz por poco tiempo dentro de los mismos silos, para su distribución o transportación.

Las características del silo son las siguientes:

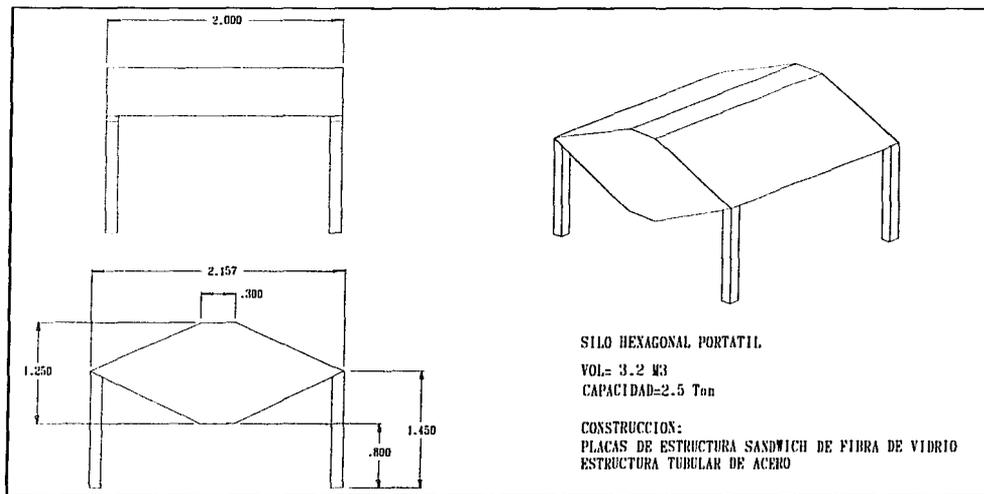
- Elimina el encostado
- Totalmente hermético para conservar el grano con gas inerte
- Forma romboidal para simplificar la construcción
- Tamaño ideal para su transportación en camiones
- Ligerero y resistente
- Capacidad ideal para el campesino promedio
- Barato
- De fácil limpieza
- Fácil de cargar y descargar
- A prueba de roedores
- A prueba de todo tipo de clima
- Buenas características térmicas
- Fricción mínima en las paredes

El costo aproximado de cada silo considerando una producción de 50 silos sería el siguiente:

Parte	Costo
Paredes de fibra de vidrio	300.00
Paredes superiores y laterales de henequén y plástico	200.00
Estructura tubular	60.00
Ensamblaje	30.00
Total	590.00

Al aumentar la producción de rombosilos, su costo bajaría considerablemente.

Figura 1.- Rombosilo portátil



Conservación de granos

Todo almacén debe proteger a los granos de la excesiva humedad, de la intemperie y de las temperaturas favorables al desarrollo de agentes patógenos y de deterioro. Debe ser a prueba de lluvia y plagas, y preferentemente debe contar con un sistema de aireación para el control de la humedad y la temperatura. Además los almacenes más grandes deben ofrecer facilidades de limpieza, transporte y aplicación de medidas protectoras.

El objetivo del almacenamiento es preservar las principales características de calidad de los granos, para mantener sus funcionalidad tecnológica y su valor nutricional y sanitario al nivel más alto posible. Para tal efecto, el grano que se almacena debe de encontrarse en condiciones óptimas: seco, sin materia extraña, ni granos quebrados, y libre de plagas.

Conservar la calidad del grano (dado que no es posible mejorarla) por tiempo indefinido no es posible, según las condiciones iniciales del grano éste se almacenará máximo cierto tiempo. Aunque el grano que se va a guardar se encuentre en buenas condiciones, no debe de ser olvidado en el almacén. A lo largo del almacenamiento el grano debe de ser monitoreado y muestreado para prevenir y detectar cualquier problema.

Factores que afectan la calidad de los granos

Para determinar la calidad de los granos se toman en cuenta diferentes factores, la norma especifica las características que la determinan: humedad, materia extraña, grado de infestación, propiedades sensoriales, etc., aunque se omiten aspectos como la calidad nutricional. La norma del maíz se publicó en el Diario Oficial, segunda sección, el día miércoles 3 de febrero de 1982, con clasificación NOM- FF-34-1982 .

Aún bajo condiciones similares de almacenamiento, los granos y las semillas pueden tener calidades deferentes, ya que ésta depende de causas ocurridas con anterioridad. No se puede esperar que un lote de semillas de alta calidad se comporte igual que un lote de mediana calidad. La calidad de los granos depende de los sig. Factores:

- condiciones climáticas durante el periodo de maduración de la semilla en el campo.
- grado de maduración en el momento de la cosecha
- temperatura
- impurezas
- humedad
- daños mecánicos
- microorganismos
- insectos
- roedores

Todos estos factores contribuyen en menor o mayor medida para determinar la calidad final del producto.

Si las semillas son cosechadas antes o después de su punto de maduración, las semillas no tendrán el vigor suficiente para resistir almacenamiento o porque ya ha comenzado su deterioro

La temperatura es uno de los factores más importantes para determinar la susceptibilidad de los granos a deteriorarse. Las bajas temperaturas inhiben el metabolismo de los granos y por lo tanto éstos no liberan calor o agua. La temperatura determina también la actividad de las plagas; los insectos reducen su actividad a menos de 18°C y son inactivos a menos de 10°C, y los hongos que aunque pueden crecer a temperaturas de 0 a 45°C, pueden controlarse a temperaturas menores de 15°C. De esta forma, si se mantiene baja la temperatura del grano, éste puede mantenerse libre de cualquier plaga.

Las impurezas de los granos, son fragmentos provenientes de la propia planta, como son las hojas, granos rotos, ramas o pueden ser materia extraña como piedras, granos u hojas de otra planta o terrones.

A pesar de que se puede reducir considerablemente la cantidad de materia extraña mejorando los métodos de cosecha, es casi imposible lograr un producto totalmente libre de impurezas. Las impurezas son portadoras de una gran cantidad de microorganismos y facilitan el deterioro de los granos, ya que bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa del aire, tienen un contenido más alto de humedad. Además, las impurezas pueden ocupar el espacio intergranular obstruyendo el paso del aire para el secado o el fumigante.

La materia extraña y la cantidad de granos quebrados reduce mucho la calidad del grano, ya que éste es considerado de menor valor comercial.

Humedad de los granos

La humedad es el factor más importante a considerar en la conservación de los granos, ya sea de la humedad del aire (HR) o del grano (contenido de humedad), ya que la disponibilidad de agua es determinante para el desarrollo de insectos y hongos; principales agentes biológicos del deterioro de los granos.

La humedad determina también el precio de comercialización de los granos, ya que a mayor contenido de humedad el manejo del producto es más difícil. Un alto contenido de humedad propiciará el desarrollo de plagas y también facilitará el daño mecánico de los granos además el producto tendrá una menor vida de anaquel.

La humedad del grano tiene gran influencia en los procesos de colecta, almacenamiento, germinación, etc. y su alteración generalmente resulta perjudicial. Aunque a veces el grano es recolectado a una humedad baja, el producto debe sufrir un secado complementario para

garantizar la seguridad y eficiencia de su almacenamiento, por lo cual, del secado de los granos dependerá la calidad final del producto.

La humedad del grano puede expresarse de dos formas en porcentaje; en base seca y en base húmeda, la base húmeda se usa para la comercialización del grano y la base seca generalmente se usa más en la investigación.

$$\% \text{ humedad}_{b.s.} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de materia seca}} \times 100$$

$$\% \text{ humedad}_{b.h.} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso total}} \times 100$$

Las dos formas de expresar la humedad de los granos se relacionan entre sí:

$$\% \text{ humedad}_{b.h.} = \frac{\% \text{ humedad}_{b.s.}}{\% \text{ humedad}_{b.s.} + 100}$$

Humedad de equilibrio

La afinidad de la materia y el agua se denomina higroscopicidad, los granos de las diversas especies de cereales, oleaginosas y otros son de naturaleza higroscópica; es decir, su contenido de humedad varía de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad relativa del ambiente en el que se encuentran.

El concepto de humedad de equilibrio es útil para saber si en ciertas condiciones de temperatura y humedad relativa del aire el producto ganará o perderá humedad. Cuando la razón de pérdida de humedad es igual a la razón de aumento de humedad, se dice que el producto está en equilibrio con el ambiente. Cuando la humedad del producto está en equilibrio con la del ambiente, se dice que contiene la humedad de equilibrio, o equilibrio higroscópico. Para una dada temperatura, existe una humedad relativa de equilibrio. La relación entre la humedad del producto y la humedad relativa de equilibrio a una temperatura dada se representa en forma de isoterma de equilibrio, que son descritas por una variedad de ecuaciones propuestas por diferentes autores. Algunas isotermas representan mejor que otras el comportamiento real, según el alimento del cual se trate. Para los granos, que son alimentos de baja humedad, las ecuaciones modificada de Henderson y de Chung son las más precisas.

Ecuación modificada de Henderson:

$$1 - \frac{P_v}{P_{vs}} = \exp(-K(T + C)(100M)^N)$$

Ecuación de Chung:

$$M = E - F \ln \left(-(T + C) \ln \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) \right)$$

donde,

P_v : presión de vapor del agua en el aire

P_{vs} : presión de vapor del agua en el aire saturado (o presión de vapor saturado)

T : temperatura

M : contenido de humedad, base seca, decimal.

K, N, C, E y F : constantes que dependen del tipo de grano y de la ecuación.

Daño físico

La fuente más importante de daño físico del grano, es el secado excesivo, aunque también el grano puede sufrir gran daño durante su poscosecha. Una semilla se puede dañar mecánicamente bajo las siguientes circunstancias.

- En la cosechadora, en el momento del desgranado.
- Durante el llenado de centros de acopio y almacenes, ocurriendo el daño durante las sucesivas caídas de los granos desde diversas alturas.
- Por fricción durante la descarga del silo
- Durante el almacenamiento, a granel o en sacos, cuando los granos quedan debajo de una pila de sacos o de un montón a granel y tienden a quebrarse por el peso que soportan.
- Durante el transporte, el daño se produce como consecuencia de la falta de una buena supervisión durante la carga y descarga, sobre todo de camiones y vagones. Los obreros que realizan esta labor debieran estar conscientes de la importancia que tiene el no dañar las semillas y tratar los granos envasados o a granel con el debido cuidado.

Dichos daños se reflejarán en susceptibilidad ala ataque de hongos, ya que los granos dañados se deterioran más fácilmente y contaminan a los demás, se incrementa el número de grano quebrado y además el daño mecánico de los granos forma polvo explosivo (tamo).

Plagas de los granos

Una de las causas más importantes del deterioro de los granos es el ataque debido a agentes biológicos, principalmente microorganismos (hongos), insectos, roedores y pájaros.

La proliferación de cualquiera de estas plagas es resultado de un almacenamiento inadecuado, ya sea porque las instalaciones permiten el acceso de plagas o porque el almacén es inadecuado y no cuenta con un sistema de control ambiental. La acción de estas plagas demerita la calidad del grano y en algunos casos causan la pérdida total del producto.

Actualmente existen técnicas efectivas para combatir a los roedores, pájaros e insectos, pero los hongos aún continúan siendo la causa de mayor deterioro de los granos, ya que éstos producen micotoxinas que no pueden ser eliminadas y resultan en la pérdida total del lote de granos.

Los hongos que merman la calidad de los granos pueden dividirse en dos grupos: los de campo y los de almacén.

Los hongos de campo son los que atacan a la semilla o al grano antes de la colecta durante su desarrollo en la planta. Para crecer requieren una humedad relativa de 90-95%, o un contenido de humedad de 25% b.h. Provocan pérdida de las cualidades del grano, reducen el poder germinativo de las semillas y pueden ocasionar enfermedades de las plantas.

Los hongos de almacén son los que se desarrollan después de la cosecha, requieren de humedades relativas de 60-90%, principalmente son del género *Aspergillus* y *Penicillium* y se pueden adaptar a medios con bajo contenido de humedad (>25%b.h.).

Los factores que alteran el desarrollo de los hongos son varios, humedad, temperatura, impureza de los granos, tiempo de almacenamiento, ataque de insectos y la tasa de oxígeno en la atmósfera de almacenamiento.

El factor más importante para el desarrollo de los hongos es una humedad relativa alta del aire intersticial. Las temperaturas elevadas favorecen su crecimiento (10-35°C). El desarrollo de los hongos se reduce a humedades relativas por debajo del 70% o cuando la temperatura es menor a 10°C. Los hongos requieren para su desarrollo una humedad relativa mayor al 75% ($A_w > 0.75$) y un contenido de humedad mayor al 13%. Las especies más conocidas e involucradas en el ataque de maíz son *Aspergillus glaucus* y *Aspergillus flavus*. Como los hongos pueden incluso crecer en forma exponencial con sólo un incremento de 0.2% de humedad, debe tenerse siempre un control estricto de ella, sabiendo que la humedad no es uniforme ni dentro del grano ni entre los granos y en su determinación siempre se obtienen promedios.

Entre los múltiples daños que producen los hongos el más importante es que producen sustancias tóxicas, conocidas como **micotoxinas**, que en dosis elevadas, son fatales para el hombre y los animales. La producción de micotoxinas depende de la especie del hongo y de las condiciones ambientales. La más común y potencialmente más tóxica es la aflatoxina producida por *Aspergillus flavus*. Otros tóxicos como la ochratoxina de *Aspergillus ochraceus*, la rubratoxina de *Penicillium rubrum* y la haptoxina de *Penicillium visidicatum* también pueden ser producidas.

Para el combate de hongos se pueden tomar algunas de las tres medidas siguientes:

1. Reducción de la humedad relativa y de la humedad del grano.
2. Baja temperatura de almacenamiento.
3. Las dos cosas.

No obstante, existen otras alternativas complementarias:

- Uso de inhibidores químicos si el grano es para la alimentación animal.
- Uso de fungicidas si el maíz es para semilla.

En el almacén pueden aplicarse tratamientos químicos, normalmente con ácidos orgánicos y sus sales, pero en México son de poco uso y de pocos resultados. El más utilizado (en Europa y Estados Unidos) es el ácido propiónico, en maíz con alta humedad destinado al ganado, aunque existen algunas especies resistentes como *Aspergillus flavus*.

Estos inhibidores presentan sin embargo algunos inconvenientes:

- Son corrosivos.
- Reducen el poder germinativo de las semillas.
- Imparten olor y sabor desagradable.

Por lo anterior sólo se aplican en maíz para el ganado, no para consumo humano ni para semilla.

Los fungicidas se aplican a la semilla en el momento de germinar para protegerla de los hongos "de campo", los cuales invaden a las semillas en plantas o en el suelo. Son efectivos para prevenir la infección más que para combatirla cuando ya está establecida. Tienen mayor efectividad a humedades de 14-15%. En el almacén, maíz con 16% de humedad puede ser conservado más de cinco meses gracias al fungicida'.

Insectos de los granos almacenados

Los insectos son una causa de importante del deterioro de los granos debido a los excrementos que dejan en ellos y no por los granos que consumen, convirtiendo al grano inadecuado para el consumo humano. Aún así, los insectos causan importantes daños a los granos reduciendo su calidad. Cuando la población de insectos crece desmesuradamente, se produce un incremento en la temperatura y humedad de los granos. Son portadores de hongos y algunos de ellos forman capullos y telas que hacen que los granos formen un conglomerado y dificulten el paso del aire a través de los granos.

Los insectos que habitan en los granos almacenados son en su mayoría de naturaleza subtropical y no de climas fríos por lo que su temperatura óptima de crecimiento debe estar entre 27°C y 37°C. Al disminuir la temperatura de la masa de granos abajo de 17°C, el desarrollo de la mayoría de las especies es insignificante.

Los límites de temperatura, mínima y óptima, para el desarrollo de las diversas especies de insectos que infestan los granos almacenados se indican en el cuadro siguiente.

Temperaturas, mínimas y óptimas, para el desarrollo de diversas especies de insectos que infestan los granos almacenados

Insectos	Temperatura (°C)	
	Mínima	Óptima
<i>Sitophilus orizae</i>	17	23-21
<i>Oryzaephilus mercator</i>	20	31-34
<i>Oryzaephilus surinamensis</i>	21	31-34
<i>Tribolium confusum</i>	21	30-33
<i>Tribolium castaneum</i>	22	32-35
<i>Lasioderma serricorne</i>	22	32-35
<i>Cryptolestes pusillus</i>	22	28-33
<i>Cryptolestes ferrugineus</i>	23	32-35
<i>Rhyzopertha dominica</i>	23	32-35
<i>Trogoderma granarium</i>	24	33-37

Fuente: Arias Ciro, 1993. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.

En general se puede esperar desarrollo notable de insectos a temperaturas entre 20 y 35°C aunque algunos insectos pueden desarrollarse a bajas temperaturas, como *Sitophilus zeamais* y *Sitophilus granarius*.

Un factor importante a considerar, es el contenido de humedad del grano, ya que los insectos toman de las semillas el agua necesaria para sus procesos vitales, el aumento en el contenido de humedad de los granos, propicia la proliferación de insectos.

Secado de granos

Se entiende por secado de materiales biológicamente activos la remoción de agua a un nivel tal que se mantiene su humedad en equilibrio con el ambiente del almacenamiento, preservando su apariencia y calidad nutritiva así como su viabilidad como semilla. Se le conoce también como acondicionamiento.

El objetivo principal del secado es reducir el contenido de humedad de manera que se evite el deterioro del producto antes de que sea utilizado, mientras se almacena.

Para el secado artificial de granos existen básicamente dos métodos: uno que emplea altas temperaturas (entre 45 y 120°C, o más en algunos casos) y el otro, que emplea bajas temperaturas. El secado a bajas temperaturas (con o sin calentamiento suplementario del aire de secado) es un proceso de gran eficiencia energética, con el cual se obtiene un producto final de óptima calidad cuando se realiza en forma adecuada, ya que la temperatura se incrementa unos pocos grados más arriba de la temperatura ambiente (menos de 10°C). Esta última forma de secado es la que emplea el silo solar hexagonal.

El principal problema que presenta el secado de granos a bajas temperaturas lo constituye el peligro de deterioración del producto debido al largo tiempo que se requiere para el secado. La ventaja es que en el secado a bajas temperaturas el grano puede ser almacenado en el lugar del secado. El secado artificial con altas temperaturas es más rápido; sin embargo, la eficiencia energética es menor.

Una disminución de la calidad por temperaturas elevadas durante el secado se puede observar en algunas características como consistencia, contenido energético, palatabilidad, dureza, color, humedad y contenido de proteínas y aminoácidos, todas las cuales son afectadas. Pero estos daños no son críticos y pueden ser minimizados controlando adecuadamente el proceso.

El secado del maíz en México se efectúa en prácticamente todos los casos al natural, exponiendo el producto al sol. El secado artificial, un proceso costoso, sólo se aplica a parte del sorgo y maíz en Tamaulipas⁸. Es por esto que el silo solar hexagonal constituye una ventajosa opción para secar el grano lejos del alcance de todo tipo de plagas y además en forma económica, eficiente y ecológica.

Secado dentro del silo (In bin drying)

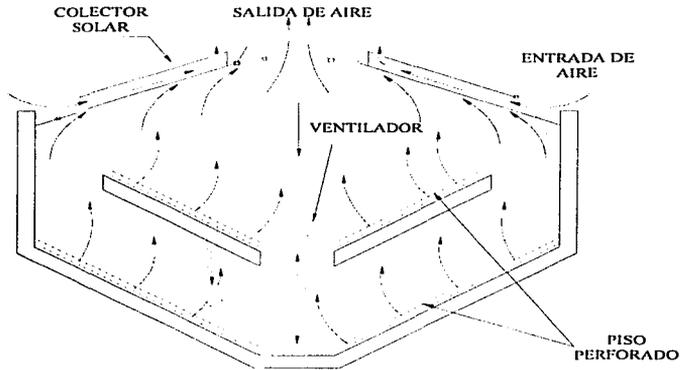
Esta modalidad de secado se lleva a cabo dentro del mismo silo donde se almacena el grano y el método de secado es con bajas temperaturas. Este tipo de silos poseen algunas características especiales que no son necesarias en los silos que se emplean solamente para almacenamiento, como un sistema interno de distribución de aire y ventiladores o compresores para forzar la entrada del aire a través del grano. El sistema de distribución de aire consiste en un piso falso perforado cuyas perforaciones sean al menos el 10% del área para facilitar la distribución uniforme del aire y el ventilador debe proveer la cantidad suficiente de aire para secar toda la masa de granos, sin que se presente deterioro.

El secado a bajas temperaturas es similar al secado natural en el campo. El producto pierde humedad hasta que se establece el equilibrio entre la humedad del aire y la humedad del grano. Como este proceso es lento, al final casi toda la masa de granos queda en equilibrio térmico e higroscópico con las condiciones psicrométricas del ambiente. La diferencia entre los dos tipos de secado lo constituye la forma de mover el aire: en el secado a bajas temperaturas, el aire es forzado a pasar por la masa de granos por medio de un ventilador, mientras que en el campo, el secado se realiza por la acción del viento. Sin embargo es claro que dentro del silo la facilidad del control de las plagas es muy superior a la del campo.

Las condiciones atmosféricas (HR y temperatura) bajo las cuales se realiza el secado determinan la humedad final que puede alcanzar la masa de granos, ya que cada combinación de temperatura y humedad relativa del aire corresponde a un contenido de humedad en equilibrio con el producto y este contenido varía para cada producto. Estos valores se relacionan mediante ecuaciones representadas en isotermas. La temperatura y la humedad relativa del aire cambian durante todo el proceso de secado, por lo que sus valores

promedio determinan el contenido de humedad final. Los ventiladores generalmente calientan el aire de 1 a 2°C, disminuyendo ligeramente su humedad relativa. Para aumentar la temperatura en por lo menos 6°C es necesario utilizar colectores solares u otros medios de calentamiento.

Componentes del silo para el secado.



Como no se pueden controlar las condiciones climatológicas, generalmente el aire de secado no tiene la humedad relativa y temperatura correspondientes al contenido final de humedad deseado, es decir, la humedad relativa de equilibrio del grano puede finalmente ser mayor o menor a la que se quiere obtener. No porque el aire esté seco el grano se sobresecará ni tampoco porque esté húmedo el grano nunca se secará. Se recurre entonces a controlar el tiempo de secado, o bien el gasto de aire.

En unidades de almacenamiento pequeñas, el sistema es muy interesante porque la inversión inicial de capital es menor que la que se requiere para instalar sistemas que emplean altas temperaturas.

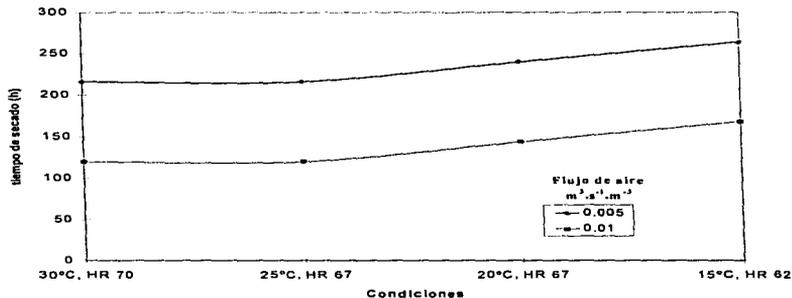
En el secado dentro del silo, la pérdida de humedad es lenta y el producto no está sometido a cambios bruscos, lo que evita las tensiones internas de los granos, además el producto tiene menos movimientos, con lo que se reducen los daños mecánicos y todo esto influye para conservar la calidad del grano, la cual resulta mejor comparada con la que se obtiene después del secado a altas temperaturas.

Una de las grandes limitantes del secado a bajas temperaturas lo constituye la humedad inicial del producto. Cuanto mayor sea ésta, más rápido es su deterioro, sobre todo en las capas superiores, si no se reduce rápidamente dicha humedad hasta un nivel seguro para el almacenamiento. Esto significa que a mayor humedad del producto es necesario aumentar considerablemente la cantidad de aire que se requiere para el secado y, por lo tanto, se necesitan ventiladores con motores más potentes. Humedades superiores al 30% b.s. propician el deterioro en corto tiempo, exigiendo altos flujos del aire de secado, y por lo tanto ventiladores muy poderosos, volviendo el sistema no viable técnica y económicamente.

Este problema puede solucionarse adoptando un sistema de secado combinado, con un pre-secado a altas temperaturas, en secadores convencionales. En este caso, la humedad del producto sería reducida a niveles seguros para el implemento de secado a bajas temperaturas en silos, con energía solar. Tal procedimiento, además de evitar el deterioro del producto, acarreará una economía sustancial de tiempo y de energía convencional.

La temperatura del aire es otro factor que es necesario considerar, ya que el proceso de deterioración también se acelera con el aumento de la temperatura (ver gráfica 5.2). En México, donde predominan climas cálidos, se recomienda la utilización del secado a bajas temperaturas para granos cuyo contenido de humedad es menor del 25% b.h., ya que para humedades superiores se impediría la viabilidad económica del sistema.

Influencia de las condiciones del aire (T y HR) y del flujo de aire en el tiempo de secado de maíz con humedad inicial de 20% b.h.



Como ya se ha mencionado, los hongos son una de las principales causas de deterioro de los granos en los sistemas de secado a bajas temperaturas, por lo que deben de calcularse con sumo cuidado los sistemas del silo secador en climas tropicales. El cuadro 5.1 presenta las especies de hongos más comunes y el contenido de humedad mínimo para su desarrollo en maíz, así como las temperaturas mínimas y óptimas para su desarrollo de hongos. Si el

contenido de humedad no se mantiene bajo los niveles citados en el siguiente cuadro, siempre existirá el peligro del ataque de hongos.

Contenido de humedad mínimo en algunos granos para el desarrollo de hongos de almacén.

Especcie	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Óptima (°C)	Rango de humedad (%)
<i>Aspergillus restrictus</i>	5 - 10	30 - 35	13.5 - 14.5
<i>Aspergillus glaucus</i>	0 - 5	30 - 35	14.0 - 14.5
<i>Aspergillus candidus</i>	10 - 15	45 - 50	15.0 - 15.5
<i>Aspergillus flavus</i>	10 - 15	40 - 45	18.0 - 18.5
<i>Penicillium sp.</i>	-5 - 0	20 - 25	16.5 - 19.0

Fuente: Ariás Ciro. 1993. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile, p.p. 102.

Otro factor que influye en el deterioro de los granos lo constituye el proceso de respiración, ya que se libera energía a través de la oxidación de nutrientes orgánicos y ocurre pérdida de materia seca. Si esa energía no se disipa, los granos se calientan volviendo más propicio al medio para el desarrollo de los hongos. Es importante recordar que el secado a bajas temperaturas es un proceso dinámico y que si la masa de granos se deja en un silo sin ventilación, con alto contenido de humedad, podrá deteriorarse en menos tiempo que el previsto. Sin aireación, los granos se calentarán como resultado de su proceso respiratorio y del de los hongos, acelerando el proceso de deterioración.

Flujo de aire para el secado

Para la buena operación de del sistema de secado es muy importante la elección de un flujo de aire adecuado. Los flujos de aire por debajo del valor adecuado, retardan el proceso de secado y ponen en peligro la calidad del producto. Por otra parte, los flujos superiores al valor adecuado reducen el tiempo de secado, pero ocasionan un aumento del consumo de energía y de los costos de operación, y una mayor inversión de capital inicial. La adición de calor no necesariamente reduce la cantidad de aire necesaria para el secado y, es más, puede causar sobresecado. Aumentar el gasto es un mejor medio para secar el grano más rápidamente y así evitar riesgos de deterioro.

Los flujos de aire que se recomiendan para el secado se llaman generalmente flujos mínimos y se expresan por unidad de volumen de producto. El flujo mínimo de aire depende de los siguientes factores:

- Tipo de producto: en función de su susceptibilidad a la deterioración, facilidad con que los hongos pueden penetrar en su interior y composición química.
- Clima de la región: determina el potencial de secado. Las regiones con altas humedades relativas durante el periodo de secado requieren mayores flujos de aire, con o sin calentamiento suplementario.

- Contenido inicial de humedad: está relacionado directamente con la susceptibilidad del producto al ataque de hongos.

La humedad del maíz se reduce durante un período de tiempo a un nivel seguro antes de que ocurra deterioro. Los flujos requeridos según la humedad del grano se muestran en el siguiente cuadro, en donde también se muestran algunas diferencias entre autores.

Flujos de aire en función de la humedad inicial del grano.

Humedad (% b.h.)	Humedad (% b.s.)	Flujo de aire (m ³ /min.t) ⁹
26	35	3.3
24	32	2.2
22	28	1.4
20	25	1.1

Humedad (% b.h.)	Humedad (%b.s.)	Flujo de aire (m3/min.t) ¹⁰
25	33	5.5
20	25	3.3
18	22	2.2
16	19	1.1

El flujo mínimo de aire requerido es aquel que asegure el secado antes de que el grano sufra deterioro.

También deben considerarse las condiciones climáticas del sitio en donde se realizará el secado. Debe tenerse cuidado sobre todo en zonas húmedas, en donde el aire tiene una humedad relativa superior a 70%. Cuando la humedad relativa debe reducirse, sólo pequeñas cantidades de calor son requeridas, i.e., si la humedad promedio 80% o más, un aumento de 3°C en la temperatura se requiere para secar maíz hasta 15.5% de humedad. Aun cuando la humedad relativa se acerca al 100%, la temperatura del aire sólo necesita aumentarse unos cuantos grados.

Resistencia de los granos al flujo de aire

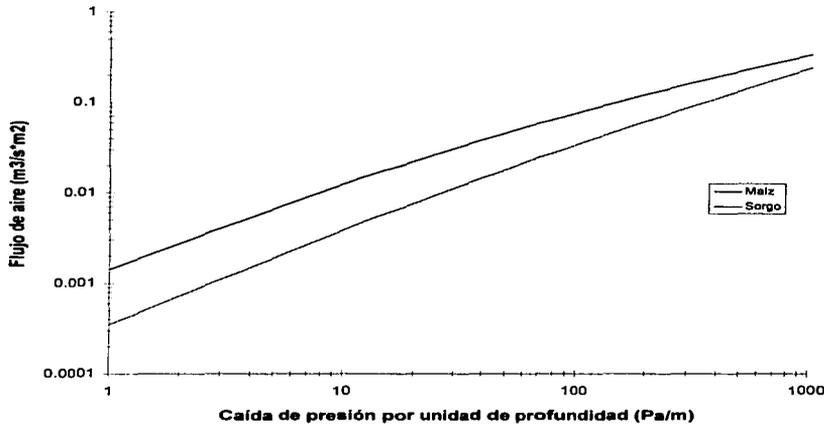
Para escoger un ventilador adecuado para el secado, es necesario determinar la energía mecánica que tiene que transferir el ventilador al aire para vencer la resistencia que presentan los granos. Esta resistencia generalmente se expresa como "presión estática" y depende básicamente de los siguientes factores:

- Tipo de grano.
- Contenido de impurezas y presencia de granos quebrados.
- Relación base/altura del silo.
- Grado de compactación del producto.

En comparación con otros granos, el maíz tiene grandes espacios intergranulares, por lo que ofrece relativa poca resistencia al aire. La presencia de granos quebrados y material fino incrementa la resistencia al flujo de aire. Por lo anterior es indispensable limpiar el grano antes de llenar el silo.

Respecto a la altura del silo, se recomienda que no pase de 10 m , para evitar las presiones estáticas muy altas. En la gráfica se observa la influencia del flujo de aire y la altura de la masa de maíz sobre la presión estática.

Caída de presión para diferentes granos, en función del flujo de aire.



Fuente: Brooker D.B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*, AVI Publishing Co., USA, pp 126.

Es claro que a mayor altura de grano, el ventilador debe vencer una mayor presión estática, y esta también aumenta conforme se incrementa el flujo de aire.

Para determinar la potencia del ventilador se define un parámetro que es el gasto específico de aire Qa que es el gasto por unidad de área de grano.

$$Qa = \frac{G}{Ag} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

Donde G es el gasto de aire en m^3/s y Ag es el área transversal del grano por donde pasa el aire, en m^2 , y se calcula según las dimensiones del silo. Para una celda con relación ancho altura 1:2, Ag se puede escribir en función de la altura del silo hs (en m):

$$Ag = 1.1704hs^2$$

Y el volumen del grano puede escribirse en función de la altura como:

$$Vg = 0.2652hs^3$$

Para determinar el gasto de aire G se utiliza Q ($m^3/min.t$), que es un valor ya establecido.

$$G = 4.417 \times 10^{-6} Q \delta hs^3$$

δ es la densidad del grano en kg/m^3 .

Entonces Qa se obtiene dividiendo las dos ecuaciones anteriores:

$$Qa = \frac{G}{Ag}$$

Qa se utiliza para calcular un valor empírico ΔP relacionado con la presión estática, para maíz:

$$\Delta P = \frac{2.07 \times 10^4 Qa^2}{\ln(1 + 30.4 Qa)} \left(\frac{Pa}{m} \right)$$

Finalmente para obtener la potencia requerida del ventilador:

$$W = \frac{\Delta P G h g}{\eta}$$

Donde hg (generalmente no más de $0.75hs$) es la altura del grano en metros. Y η se refiere a la eficiencia del ventilador. Sin considerar pérdidas en el sistema de distribución de aire.

El mejor método para distribuir aire equitativamente a través de la masa de granos es usar un piso falso perforado. Pero de todas formas debe evitarse llenar el silo con grano acompañado de materia extraña, así como sobrellenar el silo, pues en el primer caso pueden formarse zonas en las que se acumule materia extraña, la cual presentaría mayor resistencia al paso de aire y por lo tanto ni se secaría ni se ventilaría correctamente. Esta situación podría generar focos de desarrollo de hongos e insectos.

El proceso de secado

Cualquiera que sea el método de secado, este se basa en la diferencia entre las presiones de vapor de agua en el ambiente y en el producto: si la presión de vapor del material es mayor que la presión de vapor del ambiente, el agua será removida del material. Inversamente, si la presión de vapor del material es menor que la ambiental, el agua será transferida del ambiente al material.

El grano contiene humedad, y dependiendo de la cantidad de humedad contenida en el aire que rodea al grano, el grano perderá o ganará humedad. La HRE determinará el mínimo contenido de humedad hasta el cual el grano puede ser secado bajo determinadas condiciones de temperatura y humedad relativa. Se obtienen para el maíz las humedades relativas de equilibrio en función de la temperatura y la humedad del aire por medio de la ecuación de Chung.

Aire de secado: el aire tiene dos funciones principales en el secado. Primero, el aire provee el calor necesario para evaporar la humedad del grano, y segundo, el aire sirve como acarreador de dicha humedad. La cantidad de agua que el aire puede remover del grano depende de su humedad relativa, temperatura, gasto, y contenido de humedad del grano.

Cuando el grano es sometido al secado en el silo, el aire se hace pasar a través del grano, estableciéndose una “zona de secado”. Esta última se mueve uniformemente a través de la masa de granos en la misma dirección del flujo de aire. El grano que está directamente en contacto con el aire de secado se seca hasta la humedad de equilibrio con el aire. Pero en algunos casos, debido a la baja humedad relativa del aire el grano puede sobresecarse, problema que presenta comúnmente el grano situado en las entradas de aire. Lo que debe hacerse es controlar la temperatura y humedad relativa del aire que entra, por medio de medidores de humedad y temperatura que corten la entrada de aire cuando este se encuentre o muy caliente o muy seco (en general no más de 50°C ni menos de 30% HR).

Aireación de los granos

La aireación no es una técnica muy reciente, pues desde 1793 ya se tenían noticias de sistemas de aireación dotados de fuelles acondicionados por “molinos de viento”. El desarrollo moderno en aireación empezó después de la segunda guerra mundial, al encontrarse algunos países con sobreproducciones de grano que había que guardar por más de un año. Avances adicionales se llevaron a cabo con el advenimiento del almacén en campo y se incrementaron con el uso del aire caliente para el secado. Hoy es utilizada en todo el mundo, principalmente en los Estados Unidos, los países europeos, Australia, Israel y Argentina. En los países en desarrollo aún se puede considerar como muy reciente el uso de la aireación y como una práctica común el “transilaje”, que tiene el mismo objetivo que la aireación.

En el pasado, periódicamente se movían los granos de un almacén a otro para que el aire pasara por el grano y así mantener la calidad comercial del producto, gracias a la disminución y control de su temperatura eliminando zonas que acumulan calor. El transilaje resuelve parcialmente el problema de exceso y falta de uniformidad de la temperatura, ya que la reducción de la temperatura es pequeña, y son necesarias varias operaciones de transilaje para que ocurra una disminución significativa de la misma. La energía gastada, los daños y pérdidas provocados por el movimiento del producto (quiebre de granos, aumento del número de granos rotos, generación de tamo), el desgaste del equipo, el espacio extra requerido, y el tiempo necesario para ejecutar la operación, son algunos de los factores que ponen en desventaja al transilaje en comparación con la aireación.

El maíz secado artificialmente era mucho más frágil que el que se secaba naturalmente, y su movimiento resultaba en un quebramiento excesivo. Para reducir la manipulación, el movimiento fue reemplazado por la aireación.

Hoy en día la aireación, que mueve el aire a través de la masa de granos, se acepta como una técnica de conservación de la calidad de los granos almacenados. Sin duda, el almacenamiento a granel por un período de tiempo prolongado (más de algunas semanas), es impracticable sin un sistema de aireación bien proyectado y adecuadamente manejado.

En general, en los países en desarrollo, por ser la aireación una técnica que está siendo aplicada desde hace pocos años, hay una concepción del uso del sistema como herramienta para la solución de problemas de calentamiento de los granos; esto es, uso de la aireación como técnica correctiva. Debe comprenderse que la aireación es una técnica de conservación que debe aplicarse como medida preventiva. La aireación ocurre durante el almacenamiento de grano seco, con un contenido de humedad seguro para su almacén. La aireación normalmente no involucra un movimiento suficiente de aire como para secar el grano.

En aireación de granos, los gastos de aire utilizados son muy pequeños y, en consecuencia, el proceso de enfriamiento y uniformación de la temperatura de la masa de granos es bastante lento, exigiendo muchas horas para realizarse plenamente. Además, es importante que el aire del ambiente que va a ser forzado a través de la masa, esté en condiciones adecuadas de temperatura y humedad para que se puedan aprovechar todos los beneficios que la técnica ofrece.

Los principales objetivos de la aireación son disminuir y uniformar la temperatura y mantenerla lo más baja que se pueda, para así propiciar condiciones favorables para la conservación de la calidad del producto durante un período de tiempo prolongado. Se busca también prevenir la migración y condensación de humedad dentro del silo, aunque también se obtienen otros beneficios que se discutirán más adelante.

Las principales consideraciones en el diseño de sistemas de aireación son:

- Flujo de aire requerido
- Selección del ventilador (según la potencia y consumo de energía)
- Distribución del aire

El gasto de aire que se recomienda en la aireación depende del tipo de grano, el tamaño y tipo de almacén y las condiciones climáticas. Los gastos empleados en la aireación son de 10 a 50 veces menores que los empleados para secar el grano. En el sig. cuadro se muestran los gastos utilizados normalmente en los EUA.

Gastos de aire ($m^3/min.t$) recomendados para la aireación de granos en los Estados Unidos.

% Humedad	Tipo de almacén	Estados del norte	Estados del sur
12-15	Plano	0.054 - 0.107	0.071 - 0.107
12-15	Elevado	0.027 - 0.054	0.036 - 0.107

Fuente: Sauer D.B. (editor). 1992. *Storage of cereal grains and their products*. 4a edición, American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota, USA, pp.228.

Humedad % b.h.	clima templado	clima subtropical
13 - 15	0.02 - 0.06	0.05 - 0.10

Fuente: Brooker D.B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*, AVI Publishing Co., USA, pp 401.

En silos se emplea generalmente un flujo de $0.05 m^3/min.t$. Las restricciones de poder del ventilador limitan al maíz a alturas no mayores de 15m. es decir celdas del silo hexagonal de capacidad no mayor a 1000 ton. y flujos máximos de $0.5 m^3/min.t$. Los flujos recomendados van de 0.05 a $0.25 m^3/min.t$.

Cuando el clima es más cálido, normalmente el gasto de aire es mayor. El grano se enfría más rápido a mayor gasto, pero se requiere un considerable aumento de energía. Para la selección del gasto de aire los siguientes puntos deben tomarse en cuenta:

- Es deseable que el grano alcance una temperatura con una diferencia no mayor a $4^{\circ}C$ con respecto al ambiente en un tiempo de 15 a 20 días.
- Un período conveniente de aireación es 10 horas por día.
- El sistema de aireación debe operarse tan pronto como haya grano en el silo, aunque no se haya llenado.
- Debe escogerse el menor gasto de aire posible con el fin de ahorrar energía.

Los requerimientos en caballos de fuerza y la presión estática para la operación del ventilador de aireación de maíz se muestran a continuación. Los datos son válidos para grano limpio.

Caballos de fuerza requeridos y presión estática para la operación del ventilador de aireación de maíz, a diferentes profundidades de grano y flujos de aire.

profundidad de grano (m)	HP requeridos por ton a diferentes flujos de aire			Presión estática (mm de H ₂ O)		
	0.25 m ³ /min.t	0.10 m ³ /min.t	0.05 m ³ /min.t	0.25 m ³ /min.t	0.10 m ³ /min.t	0.05 m ³ /min.t
3 - 4.5	0.0016	0.0008	0.0004	15.2	14.0	13.0
6	0.0020	0.0008	0.0004	17.8	16.5	14.5
7.5	0.0024	0.0012	0.0004	25.4	19.6	16.0

Fuente: Talbot M.T. 1993. *Management of stored grains with aeration*. Circular 1104, Agricultural Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, USA, pp 3.

La humedad relativa promedio del aire generalmente se encuentra por debajo de la HRE (humedad relativa de equilibrio) con el grano a un nivel de humedad seguro para el almacenamiento. Bajo condiciones promedio del clima, el grano puede ser aireado continuamente sin aumento indeseable de humedad, aunque eso debe verificarse para cada localidad.

Los granos deben airearse tan pronto como sean introducidos en el almacén para remover calor de la cosecha o del secado. La temperatura debe ser reducida si es posible a 20°C. El grano cosechado en verano deberá airearse en meses más fríos (otoño-invierno) para reducir su temperatura.

Como el grano es un organismo vivo y además difícilmente se encuentra estéril, siempre habrá calentamiento como consecuencia de la actividad biológica, por lo que siempre será necesaria la aireación periódica.

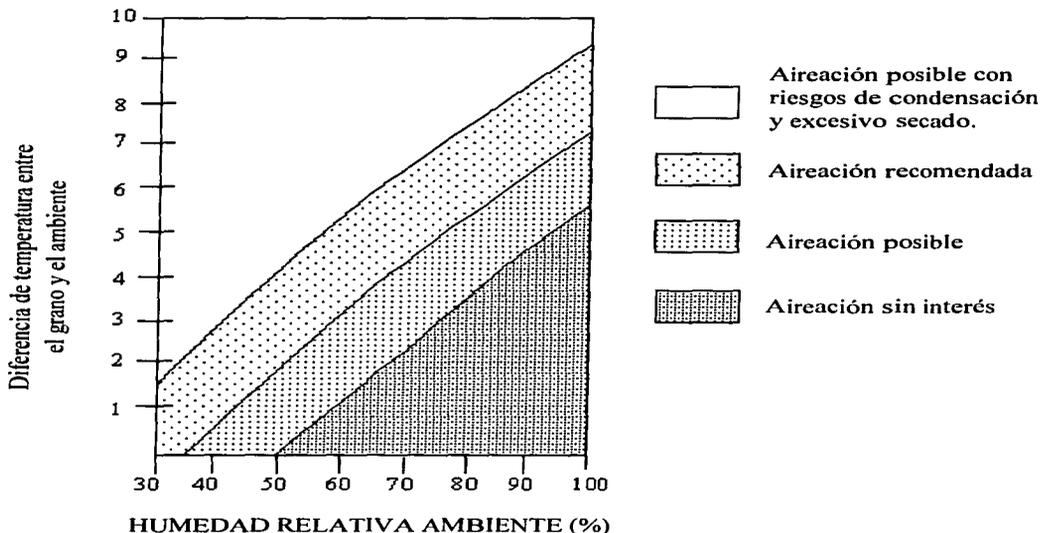
Aire frío y relativamente seco normalmente sigue después de las lluvias. Este es el mejor momento para airear, y si el buen clima continúa durante tiempo suficiente, el grano puede enfriarse a temperaturas por debajo del promedio estacional.

Debe airearse el grano cuando la temperatura del aire ambiental se encuentra al menos 5°C por debajo de la temperatura del grano, y cuando esta excede los 15°C. Es mejor airear el grano con aire que no cause cambios en el contenido de humedad, aunque el flujo de aire utilizado normalmente es suficientemente bajo como para sólo permitir cambios graduales y pequeños en la humedad del grano. Aireación continua con 0.02 a 0.06 m³/min.t de flujo, aún con clima lluvioso, no cambiará apreciablemente el contenido de humedad del grano. Como regla general, ocurrirá leve humedecimiento del grano cuando:

1. el aire exterior es 5°C o más , más frío que el grano.
2. no hay aireación en periodos de alta humedad.

Durante períodos cálidos, debe airearse cuando la temperatura es menor, es decir al caer la noche, o temprano en la mañana. Airear el grano algunas horas cada semana después de haber alcanzado la temperatura deseada, elimina olores indeseables y se recomienda como medida preventiva.

Una guía útil para saber cuándo es conveniente o no airear es la siguiente figura.



Fuente: Arias Ciro, 1993. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile, pp 342, del "Institut Technique des Céréales et des Fourrages", París, Francia.

Si la diferencia de temperatura entre el grano y el ambiente es menor a 3°C, la aireación no tiene caso, y si es mayor a 7°C, puede ocurrir secado o condensación local de humedad. A mayor humedad relativa del aire ambiente, la diferencia de temperatura debe ser mayor para que la aireación sea recomendable.

Beneficios de la aireación

El enfriamiento de la masa de granos es el principal y más ventajoso beneficio de la aireación. Como todos los alimentos, los granos también se benefician del almacén a bajas temperaturas, las que reducen el desarrollo de hongos y pueden inhibir la infestación por insectos.

Si el aire ambiente es adecuado para el proceso (con una temperatura suficientemente baja), el enfriamiento traerá beneficios para la conservación del grano almacenado. Al disminuir la temperatura de los granos, disminuye también la actividad de agua; esto es, disminuye la disponibilidad de agua para actividades biológicas tanto de los granos como de la microflora presente. Asimismo, la disminución de la temperatura retardará o hasta inhibirá (dependiendo de la temperatura alcanzada con el enfriamiento) el desarrollo de los insectos. La temperatura es además un factor que influye en la respiración de los granos; cuanto menor es, menor es la velocidad de respiración y, por lo tanto, menor la producción de calor. Al existir una variedad de hongos de almacén sus temperaturas óptimas varían entre 23°C y 40°C. El calor generado por la respiración de los hongos y otros microorganismos de almacén incrementa la temperatura del grano a medida que estos se desarrollan. Este efecto puede prevenirse con una aireación adecuada.

El calentamiento de los granos en una determinada parte del silo puede deberse al ataque de insectos o al crecimiento de hongos debido a que el secado fue insuficiente. La masa de granos tiene un bajo coeficiente de conducción de calor. Las pequeñas cantidades de calor, que se generan por el desarrollo de insectos o el crecimiento de hongos en los granos, no se disipan rápidamente y permanecen en la masa como "bolsa de calor". El aumento de temperatura se propaga lentamente hacia la periferia de la bolsa de calor, lo que produce diferencias de temperatura, causando un movimiento del aire caliente del foco hacia la superficie de los granos. Si la temperatura del grano de la superficie o del aire exterior es suficientemente baja se condensa la humedad, ocasionando un incremento de la humedad del grano y su deterioro. Problemas de este tipo pueden ser prevenidos con la aireación.

Si se lograra mantener una temperatura al interior del silo menor a 5°C se inhibiría la actividad de casi cualquier organismo vivo, pero eso sería considerar prácticamente temperaturas de refrigeración que solo podrían alcanzarse en zonas y épocas determinadas (al norte del país o zonas montañosas en invierno). Se considera adecuada una temperatura menor a 15°C, con la que se controla el desarrollo de insectos.

El establecimiento de un programa mensual de aireación preventiva, para mantener la masa de granos a una temperatura baja, hará que los daños del grano sean mínimos. Los malos olores pueden ser eliminados o reducidos en intensidad con la aireación, olor a humedad o a "moho", olores causados por malfuncionamiento del secado, y aquellos asociados con el uso de preservativos químicos de granos. Olores a ácido o a "fermentado" relacionados con el uso de ácidos orgánicos como preservativos son casi completamente removidos con la aireación.

Cuando lotes de grano con diferentes contenidos de humedad se almacenan juntos, la aireación normalmente efectúa la transferencia y homogeneización de la humedad.

Cuando el clima exterior al silo es más caliente o más frío que el de su interior, se produce un migración de la humedad a través de los granos debido al diferencial de temperatura que se crea entre los granos más cercanos a las paredes y los que están más alejados. Esto genera movimientos de aire que provocan zonas de condensación de humedad. Es posible prevenir la migración de humedad disminuyendo el diferencial de temperatura de la masa de granos con el uso de la aireación.

Aplicación de fumigante: gracias a un sistema de aireación se permite la aplicación de fumigante y su distribución a través del grano en silos.

Balance de energía para la aireación

La aireación consiste básicamente en un proceso de transferencia de calor: el calor que pierde el grano es el calor que gana el aire:

$$Ga \cdot \rho_a \cdot Ca \cdot \Delta Ta \cdot t = Wg \cdot Cg \cdot \Delta Tg$$

Donde

Ga : gasto de aire en m^3/min

Ca : capacidad térmica específica del aire, 1.005 kJ/kg K

ΔTa : diferencia de temperatura del aire en $^{\circ}C$

t : tiempo en min.

Wg : peso de grano en kg.

Cg : capacidad térmica específica del grano en kJ/kg K, varía entre 1.85 y 1.95 a humedades entre 12 y 14% b.h.

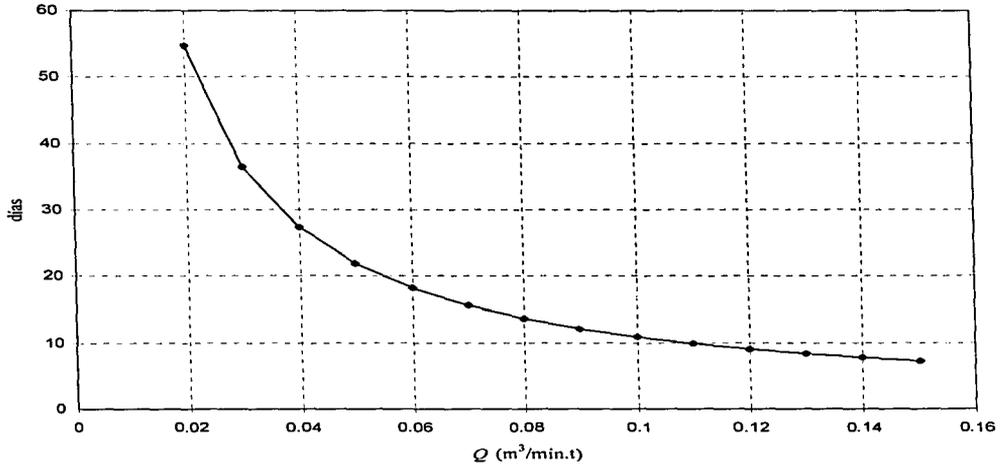
ΔTg : diferencia de temperatura del grano en $^{\circ}C$.

Despejando t y cambiando Ga por Q (gasto por unidad de masa de grano), se elimina el término Wg :

$$t = \frac{1000Cg}{Q\rho_aCa} \quad (Q \text{ se expresa en } m^3/min.t)$$

Como Cg , Ca y ρ_a son constantes, el tiempo de aireación es simplemente una función inversa del gasto que se utilice, como se ve en la gráfica siguiente.

Tiempo de aireación en función del gasto de aire.



Gastos menores a $0.05 \text{ m}^3/\text{min.t}$ resultarán en tiempos demasiado prolongados. Obviamente a mayor gasto menor es el tiempo necesario para completar la aireación, pero a partir de $0.1 \text{ m}^3/\text{min.t}$ el aumento del gasto no resultará en un ahorro significativo de tiempo, pero sí lo será el gasto de energía ya que se requeriría un ventilador más potente.

Diseño del colector solar

La función de un colector es captar energía radiante proveniente de la luz solar, y transmitirla a un fluido de trabajo, ya sea aire o algún líquido o captar la energía solar y convertirla directamente en energía eléctrica por medio de fotoceldas.

Cuando se diseña un colector solar existen múltiples factores que hay que considerar, antes de llegar a la configuración final del colector.

Hablaré de los diferentes factores que afectan el funcionamiento de los colectores solares, y de las consideraciones que hay que tomar para lograr un diseño óptimo.

Radiación solar sobre planos

Radiación y la constante solar

El primer factor a considerar es la energía radiante del sol. El sol, es una esfera de materia gaseosa incandescente, y se encuentra a una distancia promedio de 1.5×10^{11} m de la tierra. El sol, tiene una temperatura de cuerpo negro efectiva de 5777 K. El sol es como un gigantesco reactor de fusión que contiene gases que son retenidos por fuerzas gravitacionales.

El sol es la principal fuente de energía de nuestro sistema, y toda esa energía es emitida en forma de radiación, la radiación emitida por el sol está compuesta de diversas longitudes de onda. La radiación extraterrestre y su distribución espectral ha sido medida por varios métodos en múltiples experimentos.

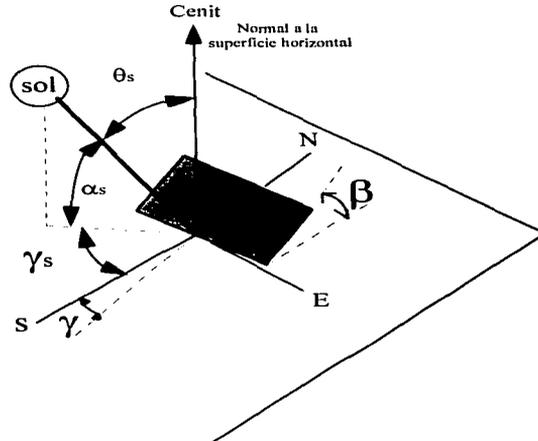
La radiación emitida por el sol y su relación espacial con la tierra da como resultado una cantidad casi constante de radiación fuera de la atmósfera de la tierra. Esta constante es llamada constante solar (Gcs) y es la energía por unidad de tiempo que se recibe en una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, en la distancia promedio entre la tierra y el sol. Se han llevado a cabo numerosos experimentos para determinar el valor de esta constante solar. Antes de la era espacial, la radiación era medida desde la troposfera, pero ahora con la ayuda de satélites y cohetes espaciales, esta constante se ha determinado con mayor precisión, y su valor se ha fijado por el centro de radiación mundial (WRC) en 1367 W/m^2 con una incertidumbre del 1%. Cabe señalar, que esta constante tiene ligeras variaciones y que se relacionan con la actividad de las manchas solares. Para fines prácticos, este valor se considera invariable.

La superficie terrestre, solamente recibe una parte de la radiación solar total, ya que una gran parte del espectro es filtrado por la atmósfera y gran parte de la radiación es dispersada por ella misma. A la radiación que llega sin haber sido dispersada por la atmósfera se le conoce como radiación solar directa.

Posición del sol relativa a un plano sobre la superficie terrestre

Cuando se proyectan colectores solares, hay que tomar en cuenta que el sol tiene diferentes posiciones en el cielo durante el año y durante el día. Es importante conocer la posición del sol respecto al plano del colector solar ya que la cantidad de energía captada por el colector depende en su mayoría de la radiación directa incidente sobre el plano del colector.

Las relaciones geométricas entre un plano de orientación particular y la radiación solar directa incidente pueden ser descritas en términos de unos cuantos ángulos. Los ángulos son indicados en la siguiente figura y son los siguientes:



ϕ Latitud, es la posición angular al norte o sur del ecuador, el norte es positivo.

δ Declinación, posición angular del sol al mediodía solar con respecto al norte del ecuador.

β Pendiente, el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal.

γ Ángulo azimutal de la superficie, es la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local, tiene valor cero hacia el sur, positivo hacia el oeste y negativo al este.

ω Ángulo horario, el desplazamiento angular del sol hacia el oeste o este del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a razón de 15° por hora, mañana negativo, tarde positivo.

θ Ángulo de incidencia, es el ángulo entre la radiación directa (rayo) sobre una superficie y la normal a esta superficie.

θ_z Ángulo cenital, el ángulo entre la vertical y la línea al sol.

α_s Ángulo de altitud solar, es el ángulo entre la horizontal y la línea al sol.

La declinación solar δ se puede encontrar de la siguiente ecuación.

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

donde n es el número de día del año

Hay relaciones existentes entre estos ángulos que son muy útiles, una de ellas, es la existente entre el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie y los demás ángulos.

$$\cos \theta = \operatorname{sen} \delta \cos \beta \operatorname{sen} \phi - \operatorname{sen} \delta \cos \phi \operatorname{sen} \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma \operatorname{sen} \omega$$

Para superficies horizontales, el ángulo de incidencia es el ángulo cenital θ_z por lo tanto $\beta=0$ y la ecuación anterior se convierte en:

$$\cos \theta_z = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega$$

Para propósitos de diseño y cálculos, es necesario conocer la radiación sobre una superficie inclinada con medidas o datos para una superficie horizontal, ya que lo más común es tener datos de radiación sobre una superficie horizontal. El factor geométrico R_b es la razón de la radiación directa (I_b) sobre una superficie inclinada a la radiación directa sobre una superficie horizontal. La razón está dada por:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} = \frac{I_b}{I_n}$$

Radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal

Se puede calcular convenientemente la radiación incidente en un plano, con algunos métodos parametrizados que usan razones de radiación, esto es la razón del nivel de radiación al nivel posible de radiación si la atmósfera no existiera. Para poder calcular la radiación extraterrestre se han formulado una serie de ecuaciones, que implican el uso de la constante solar y la posición del sol durante diferentes épocas del año.

A cualquier hora, la radiación solar incidente en un plano horizontal afuera de la atmósfera terrestre se puede encontrar de la siguiente forma.

$$G_o = G_{cs} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cos \theta_z$$

donde n es el día del año y G_{cs} es la constante solar.

La ecuación anterior puede integrarse para encontrar la radiación total en un día.

Radiación solar disponible

No toda la radiación proveniente del sol se recibe en la superficie de la tierra, la atmósfera dispersa gran parte de la radiación recibida y la radiación solar incidente también depende de las condiciones atmosféricas del cada lugar.

La radiación es dispersada por dos causas principales: la dispersión debida a las moléculas de aire, agua y polvo, y por la absorción atmosférica debida al O_3 , H_2O y CO_2 .

La absorción del espectro ultravioleta de la radiación es absorbido casi en su totalidad por el O_3 y el vapor de agua. El CO_2 absorbe una gran cantidad de la banda infrarroja. Los rayos X y la mayoría de la radiación de onda corta es absorbida en la ionósfera.

Medición de la radiación solar

Es difícil estimar la cantidad de radiación recibida sobre la superficie de la tierra, es por eso que existen instrumentos capaces de medir la radiación sobre la superficie terrestre, estos aparatos básicamente son de dos tipos: los piranómetros y los pirheliómetros.

Un pirheliómetro es un instrumento que usa un detector colimado para medir la radiación solar proveniente del sol (directa) y de una pequeña parte del cielo que rodea al sol, cuando incide normalmente.

Un piranómetro es un instrumento para medir la radiación solar total hemisférica (directa y difusa) sobre una superficie horizontal. Si se le coloca una sombra con un filtro, solamente mide la radiación difusa.

Hay una gran variedad disponible de datos de radiación solar, existen mediciones instantáneas (irradiancia) o valores integrados sobre un periodo de tiempo (irradiación) (usualmente por hora o por día); además existen medidas de la radiación directa, difusa o total; dependiendo de los instrumentos usados, la orientación de la superficie receptora (usualmente horizontal, a una pendiente fija o normal a la radiación directa); y si está promediada, el periodo sobre el cual se hizo el promedio (mensual o diario).

La mayoría de los datos disponibles son de superficies horizontales, incluyen la radiación directa y la difusa, y fueron medidas con un piranómetro. Lo usual es encontrar valores de radiación mensual promedio de la radiación total diaria sobre una superficie horizontal (H), o radiación total en una hora sobre una superficie horizontal (I).

Los datos de radiación son una buena fuente para estimar la radiación promedio incidente sobre una superficie. Pero no siempre están disponibles para todas las localidades. Cuando

no se dispone de estos datos es posible usar algunas relaciones empíricas para estimar la radiación solar.

Este tipo de relaciones empíricas incluyen algunos parámetros, como pueden ser: características meteorológicas, número de días soleados y número de días con lluvia, en algunos casos se pueden utilizar esperando un error de 10% .¹¹

Radiación sobre superficies inclinadas

La radiación total incidente sobre una superficie inclinada es la suma de la radiación directa (I_b) más la radiación difusa (I_d) y la radiación reflejada por la tierra.

Puede suponerse, que la combinación de la radiación difusa y la reflejada por la tierra es isotrópica. Bajo esta suposición, la suma de la radiación difusa del cielo y la reflejada por la tierra (I_g) que incide sobre una superficie inclinada es la misma sin importar la orientación del plano.¹²

Una superficie inclinada a un ángulo β con la horizontal tiene un factor de vista con el cielo dado por $\left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right)$. La superficie tiene un factor de vista con el suelo de $\left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$ además de la reflectancia del suelo ρ_g . Por lo tanto la radiación total incidente sobre un plano inclinado es:

$$I_T = I_b R_h + I_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + (I_b + I_d) \rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$

Ya que generalmente los valores de radiación difusa no son disponibles, la radiación difusa puede estimarse utilizando un método citado por Duffie¹³. Donde se define el uso de un índice de claridad K_T :

$$K_T = \frac{I}{I_0}$$

Donde I_0 es la radiación solar extraterrestre e I es la radiación solar total (directa más difusa) medida en el lugar en cuestión.

Con ayuda de este índice de claridad y con la siguiente correlación, se encuentra un valor para la razón I_d/I

y se calcula la radiación difusa.

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0.09 K_T & \text{para } K_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604 K_T + 4.388 K_T^2 - 16.338 K_T^3 + 12.336 K_T^4 & \text{para } 0.22 < K_T \leq 0.8 \\ 0.165 & \text{para } K_T > 0.8 \end{cases}$$

Para lograr la máxima radiación incidente sobre un plano inclinado, la inclinación del plano debe ser muy similar a la de la latitud del lugar donde operará el colector. Incrementos o decrementos hasta 15° no afectan considerablemente el funcionamiento del colector.

Características ópticas de los colectores

Superficies selectivas

Si un cuerpo absorbe energía solar y emite energía radiante, la temperatura en equilibrio final del cuerpo es directamente proporcional a la relación α/ϵ donde α es la absorptancia y ϵ la emitancia. Para lograr que un cuerpo absorba una buena cantidad de energía se necesita una superficie con alta absorción en la banda de emisión solar y baja emitancia en la banda de emisión de un cuerpo negro, esta superficie es llamada *superficie selectiva*.

Se puede definir la absorptancia de un cuerpo como la razón de la radiación absorbida a la radiación incidente. Y a la emitancia como la razón de la radiación emitida por la superficie de un cuerpo a la radiación emitida por un radiador perfecto a la misma temperatura.

Otras propiedades ópticas importantes de los cuerpos son la reflectancia y la transmitancia. La transmitancia es la razón de la energía radiante transmitida por un material dado a la energía solar incidente. La reflectancia es la razón de la radiación reflejada por una superficie a la radiación incidente sobre la misma.

Existen varios métodos para preparar superficies selectivas. Hay recubrimientos que tienen alta absorptancia y pueden ser aplicados a superficies que tienen baja emitancia. El recubrimiento absorbe la energía solar y el sustrato es un pobre emisor de radiación.

Se pueden recubrir placas metálicas con óxidos metálicos como pueden ser el óxido de cobre o el óxido ferroso.

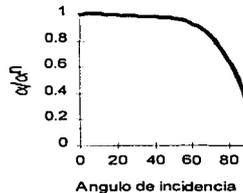
A continuación se muestra una tabla de varios materiales y sus propiedades.

Material	Emitancia	Absortancia
Aluminio	0.102	0.09
Aluminio recubierto con SiO ₂	0.378	0.12-0.16
Cobre pulido	0.039	0.11
Oro	0.048	0.23
Pintura acrílica negra	0.83	0.98
Pintura acrílica blanca	0.9	0.26
Oxido de magnesio	0.53	0.14
Hierro	0.110	0.44
Cromo	0.435	0.44
Cromo sobre cobre	0.93	0.22

En los colectores solares planos, es generalmente más crítico tener altos valores de absorptancia que bajos valores de emitancia.

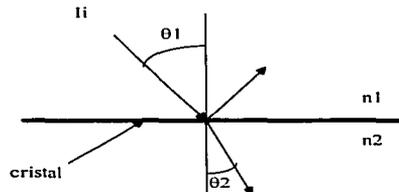
La dependencia angular de la absorptancia para la mayoría de los materiales no está disponible. La absorptancia direccional de las superficies ennegrecidas para colectores solares, es función del ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie. Los muy limitados datos disponibles acerca de ello sugiere que todas las superficies selectivas podrían exhibir un comportamiento similar¹⁴. En seguida se muestra una gráfica del comportamiento de la absorptancia de una superficie a un ángulo dado de incidencia α , sobre la absorptancia de una superficie con incidencia normal α_n .

Razón de absorptancia solar a la absorptancia solar a incidencia normal para superficies negras.



Transmisión de la radiación a través de cristales

Una parte de la radiación incidente en un colector es reflejada por la cubierta del sistema colector. Una parte de la radiación es reflejada y otra parte es refractada, de tal manera que podemos utilizar la ley de Snell para encontrar el ángulo de la parte refractada por el cristal.



$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1}$$

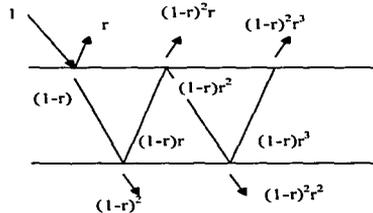
Para el vidrio, el índice de refracción n es 1.526 para el espectro solar, y para el aire es muy cercano a la unidad.

Si utilizamos las ecuaciones de Fresnel¹⁵, la reflectancia del cristal se puede calcular:

$$r_{perp} = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad r_{par} = \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad r = 1/2(r_{perp} + r_{par})$$

Donde los índices perp y par se refieren a la reflectancia a la radiación paralela y a la perpendicular respectivamente.

En las aplicaciones solares, la transmisión de la radiación se efectúa a través de una placa delgada de material, así es como por cada cubierta de cristal tenemos dos interfaces para causar pérdidas por reflexión. Despreciando la absorción a través del cristal y considerando la radiación incidente tenemos lo siguiente: sólomente una parte de la radiación se transmite por el cristal y de esa radiación una parte es absorbida y parte es reflejada hacia la cubierta y una parte es reflejada otra vez hacia la superficie selectiva. Este proceso lo ilustra la siguiente figura.



La transmitancia de la cubierta será entonces:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{par}}{1 + r_{par}} + \frac{1 - r_{per}}{1 + r_{per}} \right)$$

Donde el subíndice r denota que no se han tomado en cuenta pérdidas por absorción, solamente por reflectancia.

La absorción de la radiación a través de un medio parcialmente transparente se describe por la ley de Boguer¹⁶. La expresión que determina la transmitancia considerando pérdidas de absorción es la siguiente:

$$\tau_a = \exp\left(\frac{-KL}{\cos\theta_2}\right)$$

Donde K es el coeficiente de extinción del material y L es el espesor del cristal. El valor de K es varia desde 4 m^{-1} para cristal (water white) que si se le ve de lado, es muy claro, hasta 32 m^{-1} para cristal que en el filo se ve de color verdoso.

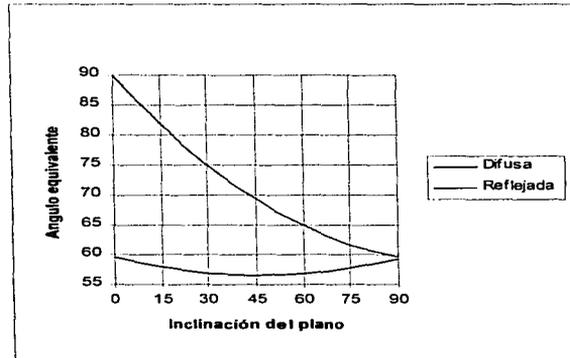
La transmitancia de una cubierta de un colector considerando pérdidas de absorción y de reflectancia será:

$$\tau = \tau_a \tau_r$$

Hasta ahora, sólo se ha expuesto el cálculo de la transmitancia para la radiación directa, el mismo cálculo se debe hacer para la radiación difusa y para la reflejada por la tierra, sin embargo, la distribución angular para esta radiación es totalmente desconocida.

La transmitancia para la radiación difusa o reflejada por el suelo puede ser calculada de forma que definimos un ángulo equivalente para la radiación directa que nos da la misma transmitancia que para la radiación difusa. En otras palabras significa, que podemos tratar a la radiación difusa y a la reflejada por la tierra como radiación directa incidiendo a un ángulo equivalente θ_e .

En la siguiente figura se presenta la relación existente entre θ_e y la inclinación del colector solar.



Radiación total absorbida por el colector

La radiación total incidente sobre un plano inclinado ha sido discutida previamente, la radiación incidente tiene tres componentes, la directa, la difusa y la reflejada por la tierra. Cada componente de la radiación total, tiene que ser multiplicada por el correspondiente producto $(\tau\alpha)$ obviamente, este producto es dependiente del ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie, el ángulo de incidencia a su vez, depende de la posición solar.

La ecuación que define la radiación total incidente sobre un plano puede ser modificada con sólo multiplicar por el producto $\tau\alpha$ correspondiente a cada tipo de radiación para dar la radiación absorbida por el colector S.

$$S = I_h R_h (\tau\alpha)_h + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + (I_h + I_d) \rho_k (\tau\alpha)_k \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

Transferencia de calor en el colector

Balance de energía en un colector plano

En estado permanente el comportamiento de un colector solar se describe por un balance de energía que indica la transformación de la energía absorbida por el colector en energía útil, pérdidas térmicas y pérdidas ópticas. Las pérdidas ópticas han sido consideradas un vez que se ha encontrado un valor para S. La energía térmica perdida por el colector hacia los alrededores por conducción, convección y radiación infrarroja pueden ser representadas como el producto de un coeficiente de transferencia de calor U_L y la diferencia entre la temperatura media de la placa T_{pm} y la temperatura ambiente T_a . En estado permanente la energía útil Q_u de un colector de área A_c es la diferencia entre la radiación solar absorbida y las pérdidas térmicas:

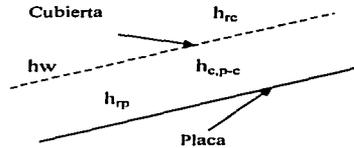
$$Q_u = A_c \left[S - U_L (T_{pm} - T_a) \right]$$

El problema con esta ecuación es que la temperatura media de la placa colectora es difícil de calcular o medir ya que es función del diseño del colector, la energía solar incidente y las condiciones de entrada del fluido. Esta ecuación se puede poner en términos de la temperatura de entrada del fluido y de un parámetro llamado factor de remoción de calor F que puede ser evaluado analíticamente, el cual se discutirá más adelante.

Coefficiente total de pérdidas de calor

Resulta conveniente desarrollar el concepto de coeficiente total de pérdidas de calor U_L para simplificar las matemáticas. En un colector solar la energía absorbida se tiene que distribuir entre la energía útil, pérdidas por la cubierta y pérdidas por la parte baja del colector.

Las pérdidas por la cubierta incluyen la energía perdida por radiación de la cubierta hacia el aire, la energía perdida por convección por el viento, la energía perdida por radiación de la placa colectora y la energía perdida por convección entre la placa colectora y el aire. Todas estas pérdidas pueden ser evaluadas usando un coeficiente de transferencia de calor h, los subíndices r y c se refieren a coeficientes debidos a la radiación y a la convección respectivamente.



Los coeficientes h_c se encuentran con ayuda del número de Nusselt Nu y de la conductividad térmica del aire k .

$$h = Nu \frac{k}{L}$$

L es la separación entre placas.

El coeficiente h_w depende de la velocidad del viento. Una buena aproximación puede ser la siguiente¹⁷.

Velocidad del viento (m/s)	h_w (W/m ² °C)
3	10
5	16
6	20

Los coeficientes de radiación se encuentran por medio de la siguiente fórmula:

$$h_r = \frac{4\sigma \overline{T^3}}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c}}$$

donde $\overline{T^3}$ es la temperatura promedio entre las dos placas y σ es la constante de Stefan-Boltzmann.

Una vez encontrados estos coeficientes h se calcula el coeficiente de pérdidas por la cubierta U_l .

$$U_l = \left(\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{rp}} + \frac{1}{h_w + h_{rc}} \right)^{-1}$$

A veces cuando se tiene un mayor número de cubiertas, es necesario hacer demasiados cálculos, además de que este proceso es un poco complicado porque es iterativo para cada temperatura supuesta en la placa y en la cubierta y depende del número de Reynolds y Nusselt. Por ello muchos autores han desarrollado ecuaciones empíricas para calcular el coeficiente de pérdidas por la cubierta. Una de ellas citada por Duffie es la siguiente:

$$U_i = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{(T_{pm} - T_u)}{(N+f)} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma (T_{pm} + T_u)(T_{pm}^2 + T_u^2)}{(\epsilon_p + 0.00591Nh_w)^{-1} + \frac{2N+f-1+0.133\epsilon_p}{\epsilon_g} - N}$$

donde

N = número de cubiertas de vidrio

$f = (1+0.089h_w-0.1166h_w\epsilon_p)(1+0.07866N)$

$C = 520(1-0.000051\beta^2)$ para $0^\circ < \beta < 70^\circ$ para $70^\circ < \beta$ use $\beta = 70^\circ$

$e = 0.430(1-100/T_{pm})$

β = inclinación del colector (grados)

ϵ_g = emitancia del vidrio

ϵ_p = emitancia de la placa

T_a = temperatura ambiente (K)

T_{pm} = temperatura media de la placa (K)

h_w = coeficiente de transferencia de calor por el viento ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

Esta fórmula es válida para colectores con separación entre placas igual o mayor a 25 mm, para separaciones menores, este coeficiente cambia significativamente y puede tener errores de hasta el 25%.

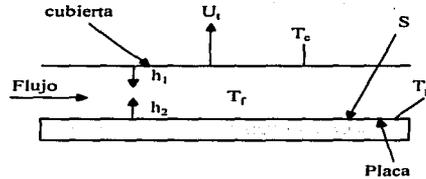
Los colectores planos, además de tener pérdidas por la cubierta, también tienen pérdidas por la parte baja del colector, debido a que la placa colectora se encuentra a una temperatura mayor que la del ambiente. Estas pérdidas se reducen significativamente, aislando térmicamente a la parte inferior de la placa colectora.

El coeficiente de pérdidas U_b de la parte baja del colector es evaluado fácilmente de la siguiente manera:

$U_b = \frac{K}{L}$ donde K y L son la conductividad térmica y el espesor del aislante respectivamente.

Energía útil del colector

Para encontrar la energía útil del colector, es necesario hacer un balance de energía en la cubierta, en la placa y en el fluido.



En la cubierta:

$$U_1(T_c - T_c) + h_r(T_p - T_c) + h_1(T_f - T_c) = 0$$

$$S + U_b(T_a - T_p) + h_2(T_f - T_p) + h_r(T_c - T_p) = 0$$

$$h_1(T_c - T_f) + h_2(T_p - T_f) = q_u$$

Estas ecuaciones se resuelven para expresar la energía útil del colector en términos de U_1 , h_1 , h_2 , h_r , T_f y T_a .

Resolviendo las primeras dos ecuaciones para $T_p - T_f$ y $T_c - T_f$

$$T_p - T_f = \frac{S(U_1 + h_r + h_1) - (T_f - T_a)(U_1 h_r + U_1 U_b + U_b h_r + U_b h_1)}{(U_1 + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_2^2}$$

$$T_c - T_f = \frac{h_r S - (T_f - T_a)(U_1 h_2 + U_1 U_b + U_1 h_r + U_b h_r)}{(U_1 + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_r^2}$$

sustituyendo las dos ecuaciones anteriores para q_u y arreglando obtenemos:

$$q_u = F' [S - U_L (T_f - T_a)]$$

donde:

$$F' = \frac{h_r h_1 + U_1 h_2 + h_2 h_r + h_1 h_2}{(U_1 + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_2^2}$$

y

$$U_L = \frac{(U_b + U_1)(h_r h_1 + h_2 h_r + h_1 h_2) + U_b U_1 (h_1 + h_2)}{h_r h_1 + U_1 h_2 + h_2 h_r + h_1 h_2}$$

F' se define como el factor de eficiencia del colector. F' realmente es la razón de la energía útil real a la energía que resultaría si la superficie colectora del colector estuviera a la misma temperatura local que el fluido.

Es conveniente definir una cantidad que relacione la energía útil real del colector con la energía que resultaría si la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido T_{fe} . Esta cantidad es llamada el factor de remoción de calor F_R y es una cantidad similar a F' .

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p(T_{fs} - T_{fe})}{A_c[S - U_L(T_{fe} - T_a)]}$$

Donde T_{fs} es la temperatura del fluido a la salida.

El factor de remoción de calor del calor puede expresarse como:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(\frac{-A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right]$$

Esta expresión es sumamente útil porque podemos encontrar el factor de remoción de calor del colector conociendo F' que ya habíamos calculado. Además se aplica esencialmente a todos los colectores planos y tiene la ventaja de que podemos usar la temperatura de entrada del fluido al colector.

La cantidad F_R es equivalente a la efectividad de un intercambiador de calor convencional, que se define como el cociente de la transferencia de calor real sobre la transferencia de calor máxima posible.

La ecuación que da toda la energía útil de un colector es:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L(T_{fe} - T_a)]$$

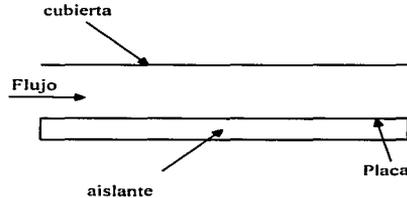
donde T_a es la temperatura del ambiente y T_{fe} es la temperatura del fluido a la entrada del colector.

Consideraciones de diseño para el colector del silo

Para diseñar el colector solar se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones. Los días se consideran simétricos respecto al medio día solar. Se tomarán en cuenta días claros y se tomará el promedio de la irradiación solar horaria en un día. El día a considerar en los cálculos será el día correspondiente al día que se puede considerar el promedio para el mes de septiembre que es el mes en el que el grano es cosechado y se tiene que almacenar. Las pérdidas de calor en los ductos son despreciables.

La latitud a considerar es la de Culiacán (24° 48'') que es representativa del estado de Sinaloa, el mayor productor de maíz en la República. El colector está orientado hacia el sur con una inclinación parecida a la de la latitud.

El colector solar que se tomará en cuenta, será del tipo que se ilustra:



Este colector requiere de un mantenimiento mínimo, los costos de instalación, de operación y el costo de construcción son muy bajos. El cristal de la cubierta es un cristal comercial de 3 mm de espesor. La superficie selectiva es una lámina de acero cubierta con esmalte acrílico negro.

Las características del colector se muestran en la siguiente tabla.

Latitud	Inclinación	Día del año	Espesor cristal	Separación entre placas
24° N	25°	258	3 mm	60 mm
Emitancias	Vidrio	Espesor	K del aislamiento	Coefficiente de viento h_w
0.83	0.88	50 mm	0.024 (W/m ² °C)	5 (W/m ² °C)
		Gasto (kg/s)		Temperatura ambiente
		0.06		24°C

Cálculo del colector

Una vez seleccionadas las características del colector se calcularon los coeficientes de pérdidas y el factor de remoción de calor con los métodos ya descritos anteriormente. Como el proceso es iterativo, todos los cálculos se realizaron con ayuda de una computadora. Los resultados para el colector diseñado se resumen en la siguiente tabla para distintas horas del día.

Características Geográficas y de tiempo				Temperatura Ambiente						
Latitud	Pendiente	Día del año	Declinación	22 °C						
α	β	n	δ							
24	25	258	2.217							
hora	ángulo horario	ángulo de incidencia	Propiedades ópticas de la cubierta		Transmitancia (difusa)		Transmitancia (tierra)			
	ω	θ	Transmitancia (directa)	Ángulos efectivos	Tierra	td	tg			
6	-90	0.04	0.852		57.17	77.21	0.788	0.50		
7	-75	16.05	0.851							
8	-60	31.03	0.845							
9	-45	43.90	0.831							
10	-30	53.78	0.804							
11	-15	59.99	0.770							
12	0	62.11	0.754							
13	15	59.99	0.770							
14	30	53.78	0.804							
15	45	43.90	0.831							
16	60	31.03	0.845							
17	75	16.05	0.851							
18	90	0.04	0.852							
19	105	16.12	0.851							
Emisiones Placa		Vidrio	Coefficiente de viento	Perdidas de cubierta		Coefficiente de pérdidas de aislamiento		Espacio entre placas		
0.83	0.88	5	U _t (W/m ² °C)	0.024	K	50	U _b (W/m ² °C)	50	α (mm)	
Propiedades de la superficie selectiva			Producto absorbancia emitiencia			Radiación solar				
Absorbancia			τρ			Teórica				
α	α ^b	α ^d	α ^g	(τρ) ^b	(τρ) ^d	Hora	l _o (MJ/m ²)	l (MJ/m ²)	l (w/m ²)	
0.98	0.980	0.929	0.701	0.843	0.739	0.354	6.7	0.804	0.362	
0.98	0.980			0.842		7-8	1.633	0.980	272.222	
0.98	0.968			0.825		8-9	2.557	1.534	426.093	
0.98	0.958			0.805		9-10	3.310	1.986	551.728	
0.98	0.941			0.764		10-11	3.843	2.306	640.566	
0.98	0.915			0.712		11-12	4.119	2.472	686.551	
0.98	0.902			0.687		12-13	4.119	2.472	686.551	
0.98	0.915			0.712		13-14	3.843	2.306	640.566	
0.98	0.941			0.764		15-16	3.310	1.986	551.728	
0.98	0.958			0.805		16-17	2.557	1.534	426.093	
0.98	0.968			0.825		17-18	1.633	0.980	272.222	
0.98	0.980			0.842		18-19	0.604	0.362	100.802	
0.98	0.980			0.843					622.626978	
0.98	0.980			0.842						
Gasto	Re	Nu	hr	h1	UL	F'	FR	Qu (w/m ²)	Eficiencia	Temperatura de salida
kg/s	6315.79	17.338	8.8236	4.4559	3.4891	0.710	0.696	363.61	0.688	38 °C
0.06										Área colector/ton
										2.200

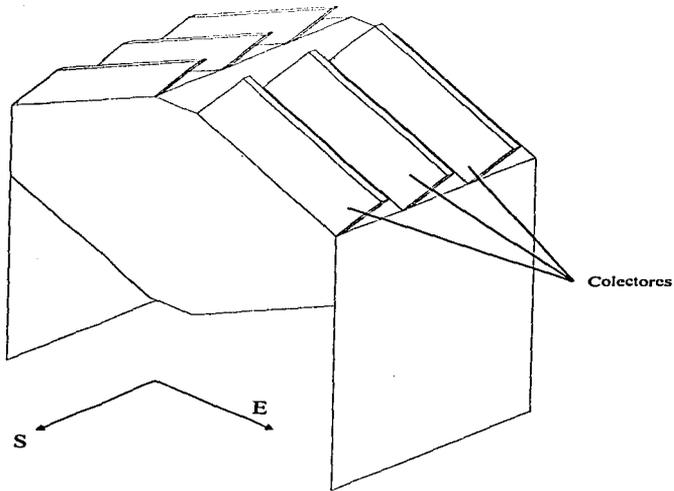
Este colector puede usarse sin cambio alguno en otras localidades con un clima y latitud similar a la considerada. Un resultado importante es el del área necesaria para secar una tonelada de grano, que es de 2.2 m².

Un arreglo de varios colectores es la mejor opción para aumentar el área disponible en el techo del silo.

Con el fin de ahorrar espacio la posición de los colectores en el silo puede ser como la que se ilustra en la siguiente figura. Donde los colectores tienen su superficie orientada hacia el sur con el fin de captar la mayor cantidad posible de energía.

Para colectores de pequeña capacidad no es necesario disponer de espacio adicional para los colectores solares, pero en silos de gran capacidad se requerirá de una cantidad mayor de espacio cerca del silo para los colectores solares.

La necesidad de espacio adicional para los colectores es una limitante muy importante para el sistema de conservación solar de granos, ya que el techo de los silos puede no tener el área suficiente de colección para secar el grano.



Este problema puede resolverse si se hace un arreglo de varias celdas. En un arreglo de varios silos, el área total del techo de los silos puede ser usada para secar el grano de una sola celda, después el área total se usa para secar el grano de la celda siguiente y así sucesivamente.

Las celdas del arreglo pueden ser llenadas una por una e ir secando conforme se llena cada una.

Caracterización del secado en el silo

Caracterización teórica

Se puede predecir el comportamiento del secado en el silo, utilizando ecuaciones simples de balance de materia y energía, y convirtiendo en constantes algunas variables que en él intervienen.

Se han realizado diversos estudios abocados a encontrar expresiones matemáticas que simulen de manera precisa el secado de los granos a través del tiempo, basadas en teorías de difusión, convección o en modelos como el de "capa delgada". Pero su complejidad no siempre implica mejor precisión, en cambio, es posible hacer buenas aproximaciones de forma más sencilla, mediante la ecuación de balance de calor:

$$t G C_a (T_a - T_g) = h M S (M_o - M_e) v \quad (1)$$

A continuación se explica el significado de cada miembro de la ecuación.

t: tiempo que tarda el grano en secarse de *M_o* a *M_e*.

G: gasto volumétrico de aire proporcionado al silo por el ventilador.

C_a: calor específico del aire seco, el cual proporciona el calor necesario para evaporar agua de la superficie del grano.

T_a: temperatura del aire a la entrada del silo.

T_g: temperatura del grano en el silo, generalmente la misma que la temperatura ambiente.

h: calor latente de vaporización del agua en el grano, depende del tipo de grano, la temperatura y la humedad, pero en cualquier caso es del orden de 2400-2500 kJ/kg, y para fines prácticos se usa un valor constante a pesar de que varíe durante el secado.

M_S: es el peso de materia seca del grano.

M_o: humedad inicial del grano.

M_e: humedad de equilibrio (con las condiciones de entrada del aire) o humedad final promedio, se obtiene con la ecuación de Chung.

v: es el volumen específico del aire seco.

Generalmente no se seca el grano hasta la humedad de equilibrio, porque significaría sobresecarlo. Lo normal es que se detenga el secado cuando el grano alcanza una humedad promedio segura para el almacenamiento.

Pero lo anterior no quiere decir que todo el grano contiene la misma humedad. El secado de volúmenes grandes de grano ocurre por capas, es decir que se definen tres zonas: la primera que está contigua a la entrada del aire, en donde el grano ya alcanzó la humedad de equilibrio, enseguida está la zona más ancha en donde llamada zona de secado en donde existe intercambio de calor y humedad entre el aire y el grano. En la capa superior el grano se encuentra aún en las condiciones iniciales.

Cuando el volumen total del grano alcanza la humedad promedio, el grano más cercano a la entrada de aire tiene la menor humedad (la de equilibrio) y el grano de capas superiores tiene una mayor humedad proporcional a la altura a la que se encuentra. Hukill desarrolló un método numérico para conocer la humedad del grano a determinados tiempos y alturas del silo. De todas formas, aunque las capas superiores permanezcan con una humedad alta una vez que se haya decidido detener el secado, gracias a la aireación y a la migración natural de la humedad, esta última se homogeneiza a lo largo del silo.

Como ya se vio anteriormente, existen gastos sugeridos para el aire de secado, en función de la humedad del grano, y serán tomados como referencia. Como el tamaño del silo es variable así como la cantidad de grano a secar, puede establecerse la misma ecuación de balance de calor independiente del término MS , cambiando G por Q en unidades $m^3/\text{min}\cdot\text{ton}$ (gasto de aire por unidad de masa de grano húmedo):

$$iQCa(Ta - Tg) = hv \left(1 - \frac{Mo}{1 + Mo} \right) (Mo - Mf) \times 1000 \quad (2)$$

De manera muy similar se pueden predecir tiempos de secado y la humedad final del grano, considerando un simple balance de humedad: la humedad que pierde el grano es la que gana el aire. Entonces,

$$i\Delta WQ = v \left(1 - \frac{Mo}{1 + Mo} \right) (Mo - Mf) \times 10^6 \quad (3)$$

De igual forma se elimina la cantidad de grano utilizando Q en $m^3/\text{min}\cdot\text{ton}$.

$\Delta W = (W_2 - W_1)$ es el cambio de humedad absoluta del aire ($\text{g H}_2\text{O} / \text{kg}$ aire seco) y se lee directamente en una carta psicrométrica. W_1 es la humedad absoluta inicial y W_2 se lee siguiendo la línea adiabática hacia la saturación, hasta 90% HR, valor más práctico que 100% HR que en realidad nunca alcanza el aire. La ecuación (3) es particularmente útil cuando la diferencia de temperatura entre el grano y el aire es muy pequeña o no existe, por ejemplo cuando el secado se realiza por la noche con el aire ambiente.

El clima de la localidad en donde se realiza el secado es un factor importante ya que determina las condiciones iniciales: temperatura y humedad del aire, temperatura del grano, energía solar disponible, etc. Se evaluará el secado en tres tipos de localidades diferentes, en donde la producción de maíz y por lo tanto su poscosecha es importante. Son eminentemente productores de maíz en México los siguientes estados, agrupados según su importancia:

1. Sinaloa.
2. Tamaulipas, Chiapas.
3. Chihuahua, Jalisco, Nuevo León, Oaxaca, Sonora, Veracruz, México, Guanajuato.

En los estados mencionados predominan básicamente dos tipos de clima según el INEGI: seco y templado subhúmedo.

También se pueden reconocer tres grandes zonas de distribución de temperaturas anuales:

- I. 10-18°C
- II. 18-22°C
- III. 22-26°C

Se pueden proponer con los datos anteriores tres tipos de zonas climáticas en donde se evaluará el funcionamiento del silo:

1. Cálido semi-seco (correspondiente a Sinaloa)
2. Cálido húmedo (correspondiente a Tamaulipas y Chiapas)
3. Templado seco (correspondiente a Chihuahua, Jalisco, etc.)

De acuerdo a estadísticas se tomarán como condiciones promedio las del cuadro sig. equivalentes a los meses subsecuentes al periodo más importante de cosecha del maíz en México, es decir, finales del verano e inicio del otoño (septiembre-octubre).

Condiciones para el secado en tres tipos de clima.

	Tipo de clima		
	Cálido semi-seco	Cálido húmedo	Templado seco
Temp. promedio en el día (°C)	28	31	25
HR promedio en el día	45%	55%	35%
Temp. promedio en la noche (°C)	24	28	20
HR promedio en la noche	57%	65%	50%
Presión atmosférica (KPa)	90	100	80

Estudio de casos

CASO 1

Clima: cálido semi-seco en el día:

- ambiente 28°C, HR 45%
- elevación de temperatura por el colector solar 10°C
- temperatura del aire de entrada 38°C, HR 25%¹⁸
- Humedad de equilibrio: 0.07% b.s.¹⁹ (humedad mínima que puede alcanzar el grano)

Despejando de la ecuación (2), podemos encontrar la humedad final M_f al tiempo t :

$$M_f = M_o - \frac{tQCa(T_a - T_g)}{\left(1 - \frac{M_o}{1 + M_o}\right)hv \times 1000} \quad (4)$$

Donde $T_g = 28^\circ\text{C}$

$M_o = 0.35$ (consideramos 35% de humedad base seca igual a 26% base húmeda)

$Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{min.t}$

$h = 2430 \text{ kJ/kg}$

$Ca = 1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

$v = 0.96 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$t = 9.5 \text{ h} = 570 \text{ min.}$$

Se puede entonces calcular la humedad final del grano al término del primer día de secado
 $M_f = 0.339$

Enseguida el agricultor tiene la opción de cerrar el silo y reanudar el secado a la mañana siguiente, o bien continuar el secado durante la noche con el aire natural.

En este último caso las condiciones iniciales son:

$$M_o = 0.339 = M_f \text{ anterior}$$

temp. ambiente = temp. del grano = temp. de entrada = temp. de salida = 24°C

$$\text{HR entrada} = 57\% \quad W_1 = 10.5$$

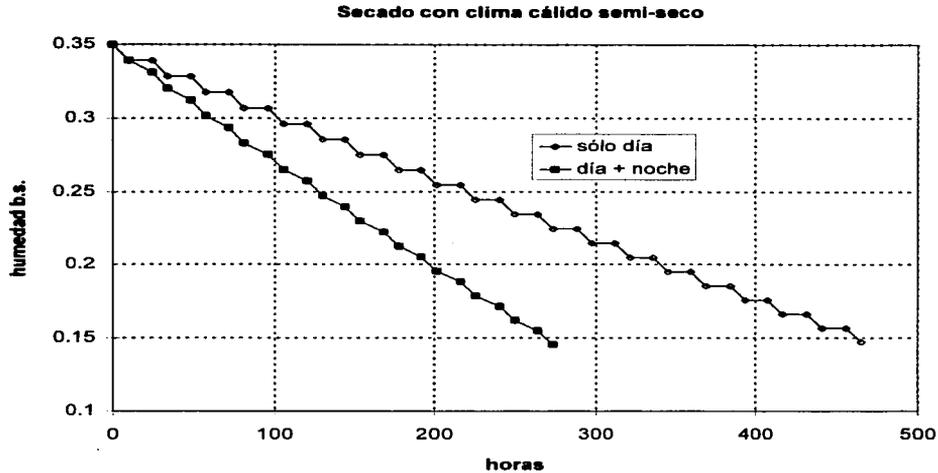
$$\text{HR salida} = 90\% \quad W_2 = 12.5 \text{ (} W_1 \text{ y } W_2 \text{ leídos en la carta psicrométrica)}$$

$$v = 0.95 \text{ (calculado para } 24^\circ\text{C y } 90 \text{ KPa)}$$

$$t = 14.5 \text{ horas} = 870 \text{ min.}$$

Se obtienen los siguientes resultados para el caso 1

	secado sólo de día	secado día y noche
tiempo de secado	462.7 h = 19 días 6 h 44 min	268.9 h = 11 días 4 h 52 min
tiempo de uso del ventilador	187.2 h	268.9 h
	en el día	en la noche
% humedad b.s retirado / periodo	0.93 - 1.10	0.7 - 0.8



CASO 2

Todos los cálculos se hacen de la misma forma que en el caso 1.

Clima: cálido húmedo

En el día:

- ambiente 31°C, HR 55%
- elevación de temperatura por el colector solar 12°C
- temperatura del aire de entrada 44°C, HR 28%
- Humedad de equilibrio: 0.07% b.s.

$T_g = 31^\circ\text{C}$

$M_o = 0.35$

$Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{min.t}$

$h = 2430 \text{ kJ/kg}$

$Ca = 1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

$v = 0.87 \text{ m}^3/\text{kg}$

$t = 9.5 \text{ h} = 570 \text{ min.}$

En la noche:

temp. ambiente = temp. del grano = temp. de entrada = temp. de salida = 24°C

HR entrada = 65%

$W_1 = 15.2$

HR salida = 90%

$W_2 = 16.8$

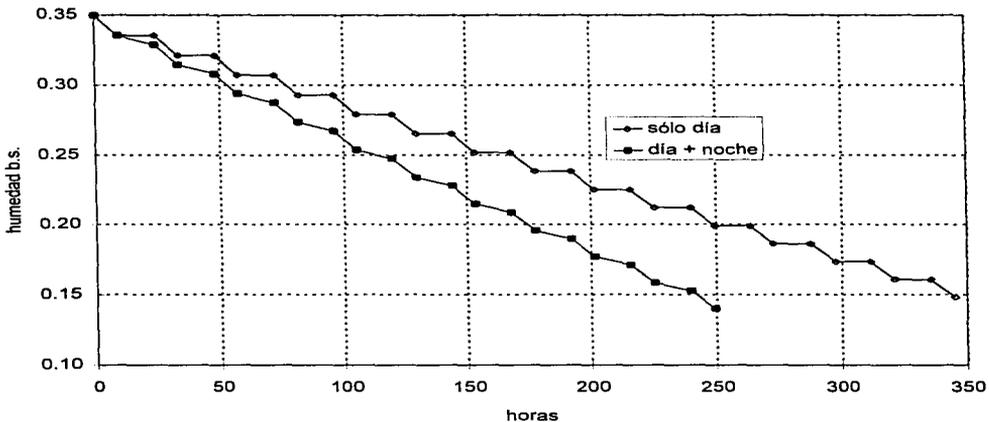
$v = 0.86$ (para 28°C y 100 KPa)

$t = 14.5$ horas = 870 min.

Se obtienen los siguientes resultados para el caso 2:

	secado sólo de día	secado día y noche
tiempo de secado	344.2 h = 14 días 8 h 13 min	242 h = 10 días 2 h 00 min
tiempo de uso del ventilador	141.2 h	242 h
	en el día	en la noche
% humedad b.s retirado / periodo	1.25 - 1.45	0.59 - 0.67

Secado con clima cálido húmedo



CASO 3

Todos los cálculos se hacen de la misma forma que en el caso 1.

Clima: templado seco

En el día:

- ambiente 25°C, HR 35%
- elevación de temperatura por el colector solar 8°C
- temperatura del aire de entrada 32°C, HR 23%
- Humedad de equilibrio: 0.072% b.s.

$T_g = 25^\circ\text{C}$

$M_o = 0.35$

$Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{min.t}$

Caracterización del secado en el silo

$h = 2430 \text{ kJ/kg}$
 $Ca = 1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
 $v = 1.07 \text{ m}^3/\text{kg}$
 $t = 9.5 \text{ h} = 570 \text{ min.}$

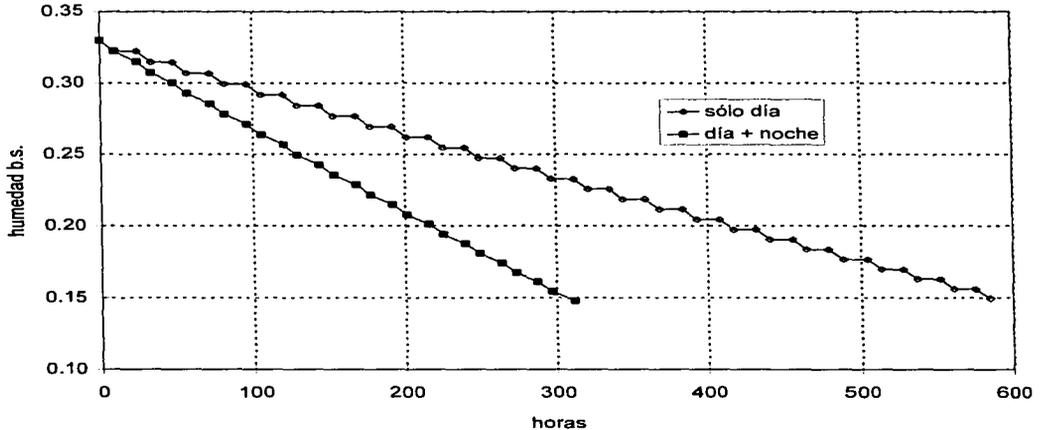
En la noche:

temp. ambiente = temp. del grano = temp. de entrada = temp. de salida = 20°C
HR entrada = 50% $W_1 = 7.25$
HR salida = 90% $W_2 = 9.25$
 $v = 1.05$ (para 20°C y 80 KPa)
 $t = 14.5 \text{ horas} = 870 \text{ min.}$

Se obtienen los siguientes resultados para el caso 3

	secado sólo de día	secado día y noche
tiempo de secado	584.8 h = 24 días 8 h 50 min	307.5 h = 12 días 19 h 31 min
tiempo de uso del ventilador	236.8 h	307.5 h
	en el día	en la noche
% humedad b.s retirado / periodo	0.70 - 0.77	0.66 - 0.73

Secado con clima templado seco



Los resultados anteriores muestran que secar adicionalmente durante la noche, puede representar un ahorro en tiempo de secado a expensas de un mayor gasto de energía para operar el ventilador, proporcional al tiempo de uso, como se ve en el siguiente cuadro:

Ventaja y desventaja del secado complementario en la noche

CASO	Clima	Ahorro en tiempo de secado	Energía extra utilizada
1	cálido semi-seco	42.0%	43.6%
2	cálido húmedo	29.7%	71.4%
3	templado seco	47.4%	29.9%

Es claro que en el caso 2, dado que el clima es húmedo, el secado durante la noche es muy ineficiente y por lo tanto si se seca el grano en ese momento, el ahorro de tiempo es bajo en comparación con el importante aumento del gasto de energía. Sin embargo, en climas más secos, como en el caso 3, el secado durante la noche vale la pena ya que se obtiene un ahorro sustancial en el tiempo total de secado a bajo costo energético.

Todo el análisis anterior del secado sólo debe ser considerado como una aproximación a la realidad, pues se hicieron las siguientes suposiciones, que no necesariamente corresponden a cada caso particular:

Se escogió un gasto constante de $3.3 \text{ m}^3/\text{min.t}$ para secar gran con $M_o = 0.35 \%$ b.s., cuando es el mínimo recomendado en la literatura. Bien se pudo haber elegido un valor de Q de hasta $5.5 \text{ m}^3/\text{min.t}$ o más. Otro punto al respecto es que aunque Q es un valor constante, G (m^3/min) no lo es y obviamente deberá ser ajustado por el operador según la cantidad de grano que desee secar.

Fueron consideradas condiciones climáticas promedio, las cuales son imposibles de predecir y controlar, y además habrá localidades en donde se utilice el silo y el clima sea muy diferente. Variaciones marcadas de temperatura, humedad relativa, tiempo de insolación, lluvia, afectarán la eficiencia del colector solar y por lo tanto al secado. En días lluviosos, el secado definitivamente debe ser detenido.

El agricultor puede dar prioridad al ahorro de energía y no al tiempo de secado, entonces evitará el secado nocturno cada dos o tres noches, o bien sólo secará en las primeras noches para evitar deterioro del grano. Como ya se vio, secar sólo de día resulta en tiempos demasiado prolongados de secado y se corre el riesgo de que el grano sea atacado a causa del desarrollo de microorganismos.

La eficiencia del colector juega igualmente un papel vital. Mucho depende del clima, que no es controlable, pero también del diseño del colector. Un aumento de menos de 5°C de la temperatura del aire resultaría en un secado casi tan ineficiente como el que se efectuaría con aire sin calentar. Por otra parte, como colectar la energía solar no es fácil, un aumento en la temperatura del aire de entre 8 y 12°C se considera adecuado, pues con él se puede

secar el maíz de 35% a 15% de humedad base seca en tan solo 10 días. Aumentar el incremento de temperatura no resultará en una reducción significativa del tiempo de secado, pero reducirlo si tendría un efecto indeseable importante.

Por lo anterior, es importante calcular cuidadosamente el diseño del colector y ajustarlo a los gastos de aire que serán empleados en silos de determinada capacidad.

Los cálculos realizados para estimar los tiempos de secado en diferentes condiciones climáticas no garantiza la uniformidad del secado en su interior. De hecho, dada la geometría del silo, la predicción del comportamiento interno se dificulta.

Costos

Para cuantificar los costos de operación, se hará un ejemplo con el silo piloto ubicado en San Miguel de Allende, Guanajuato, que consiste en dos celdas hexagonales de 100 ton de capacidad aproximadamente.

Si se quiere conocer el costo en pesos del secado (o más bien de la operación del ventilador), se emplean las ecuaciones referentes al cálculo de la potencia del ventilador. Y así, conociendo el tiempo de secado y la tarifa eléctrica, se puede estimar el costo.

Se establecen los siguientes datos:

Altura de la celda, h_s : 8.5 m.

Humedad inicial del grano : 25% b.h.

Gasto por unidad de masa, Q : 3.3 m³/min.t (se elige de los gastos recomendados)

Densidad del grano, δ : 670 kg/m³

Se obtiene:

$$Qa = 0.0709 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{.s)}$$

$$\Delta P = 90.6 \text{ Pa/m}$$

$$W = 4483 \text{ watts} = 6 \text{ hp. (1hp} = 746 \text{ W)}$$

El ventilador para el secado debe tener una potencia de 6 hp.

Dada la localidad del silo, se toma como tiempo de secado el calculado para clima templado seco, unas 300 horas, entonces el consumo de energía es:

$$4.483 \text{ kW} \times 300 \text{ h} = 1345 \text{ kW.h}$$

La tarifa 9M de uso agrícola en media tensión establecida por la CFE para el mes de septiembre de 1997 es de \$0.16217 por cada uno de los primeros 5000 kilowatts-hora consumidos²⁰. El secado de maíz de 33% b.s (25% b.h.) a 15% b.s. (13% b.h.) de contenido de humedad, con operación continua del ventilador costaría en septiembre de 1997, para una celda:

costo en pesos = $1345 \times 0.16217 = \$218.10$

Comparemos el resultado anterior con lo que costaría secar la misma cantidad de grano en un secador industrial convencional tipo columna de flujo transversal.

El consumo específico de energía del secador es de 6.9 MJ/Kg de agua a evaporar²¹. Si se secara la misma cantidad de grano bajo las mismas condiciones iniciales y finales de humedad, la cantidad de agua a remover es de 12 ton. El poder calorífico del gas LP es de 25800 KJ/l y su costo es de 1.35 Pesos/l

costo en pesos = $(6.9 \times 10^3 * 12000 * 1.35) / 25800 = \4332.55

Durante la década pasada se llevaron a cabo numerosos experimentos para determinar el costo del secado de maíz en secadores convencionales, el resultado fue de 5.1 centavos de dolar por cada kg de agua a remover²². Si tomamos en cuenta esta consideración y calculamos, el costo sería:

costo en pesos = $5.1 * 12000 * 7.93 \text{ (pesos/dolar)} / 100 = \4853.16

que es bastante aceptable como estimación del costo.

Los resultados se resumen a continuación:

	Secado solar	Convencional
Tiempo de secado	300 horas	20 horas
Costo	\$218.10	\$4853.16

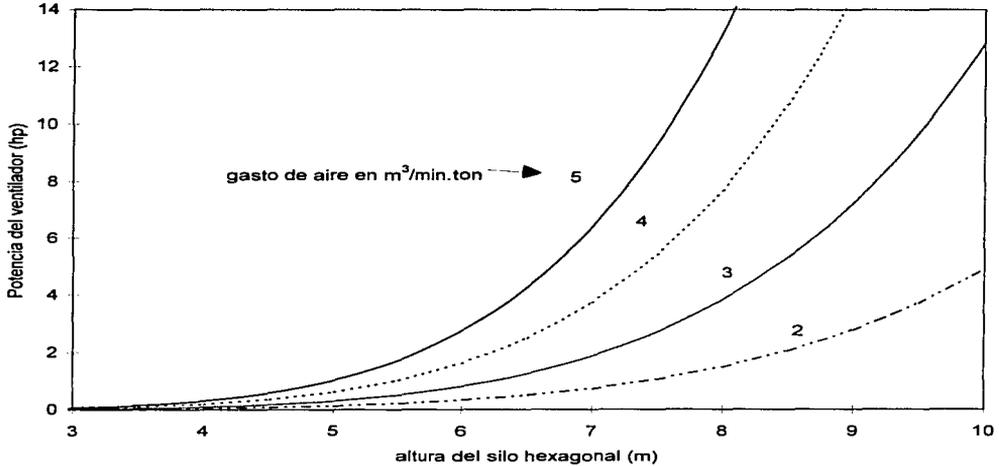
El secado solar es 22 veces más barato que el secado convencional.

Aunque no se han considerado los costos de instalación, es intuitivo pensar que los costos de inversión de un equipo de secado convencional son superiores a los de un sistema de secado solar.

Para dar una idea del tamaño del ventilador en función del tamaño del silo, el agricultor puede consultar la siguiente gráfica.

Caracterización del secado en el silo

Potencia del ventilador en función de la altura del silo, para diferentes valores de Q .



La selección del tamaño del silo y del gasto de aire para el secado son dos decisiones críticas, pues alturas mayores a 8 m o gastos mayores a $4 \text{ m}^3/\text{min.ton}$ se traducirán en grandes requerimientos de potencia

El secado en el silo es sin duda una opción muy económica para el agricultor, si varios campesinos con propiedades pequeñas que cosechen de 5 a 10 ton al año se unen para utilizar un solo silo, únicamente tendrían que desembolsar unos 20 o 30 pesos al año para secar toda la cosecha (dado que se cosecha una vez al año). Garantizar la calidad de su producto secándolo y conservándolo en el silo solar hexagonal con tan poca inversión es una excelente alternativa en comparación con el sistema tradicional que es más barato pero a cambio de una mala calidad del producto y también en comparación con sistemas de secado convencionales con los cuales la inversión debe ser mucho mayor.

Experimentación

Materiales y equipo

Las pruebas de secado se realizaron en un modelo del silo hexagonal a escala 1:16 respecto al construido en San Miguel de Allende Guanajuato. El modelo tiene una estructura de metal y las paredes están constituidas de acrílico transparente. El acrílico es un buen aislante térmico y puede simular de buena forma las paredes de concreto del silo; ya que por éstas no hay transferencia de calor entre el grano y los alrededores.

Como se pretende simular el secado del maíz, también el grano debe estar a escala. Por esta razón se empleó mijo (también llamado sorgo) el cual tiene un tamaño equivalente de 1:14 con respecto al maíz. Además el mijo posee características físicas similares a las del maíz como la densidad o el espacio intergranular (ver cuadro), y se comporta durante el secado en forma muy similar a él. Esto se puede observar con la ecuación de Chung que determina las humedades de equilibrio (ver gráfica 1).

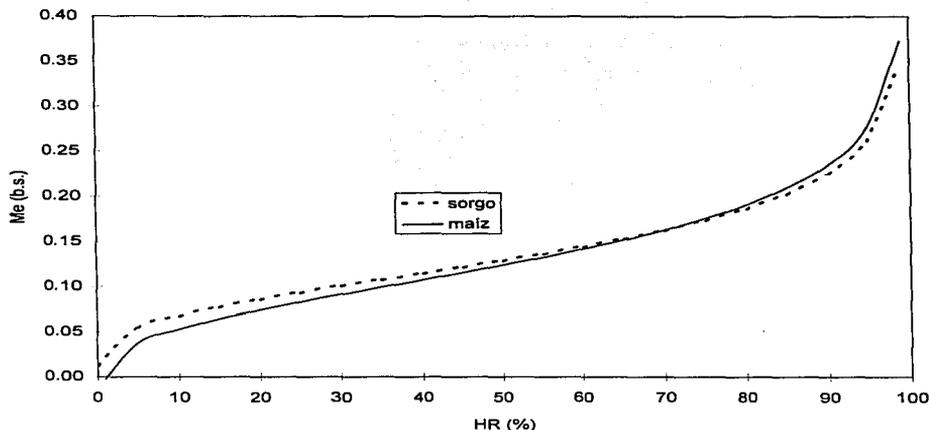
Algunas similitudes físicas entre el mijo y el maíz.

	mijo	maíz
Densidad (15% hum b.h.) en kg/m ³	721	721
Espacio intergranular en %	37	40

Constantes de la ecuación de Chung.

	E	F	C
Mijo	0.35649	0.050907	102.849
Maíz	0.33872	0.058970	30.205

Gráfica 1.- Isotermas del maíz y mijo a 25°C.



Los ductos de distribución del aire y el piso falso se construyeron de poliestireno de 3 mm de espesor.

Para forzar el paso del aire a través del grano, se usó un ventilador centrífugo de aspas curvadas hacia atrás de 1/2 hp.

El calentamiento solar del aire se simuló con el uso de una resistencia de temperatura controlada, ubicada a la salida del ventilador.

La humedad y temperatura del aire se midieron con un psicrómetro digital con una precisión de ± 0.2 °C y $\pm 1\%$ HR marca Cole Parmer.

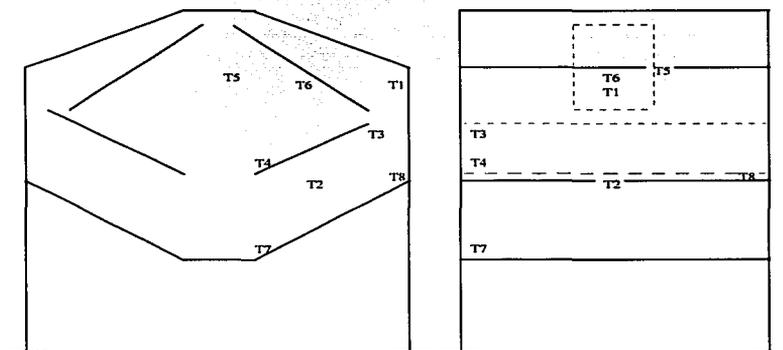
Instrumentación

Para controlar la temperatura de la resistencia se usó un sistema consistente en un termopar y un pirómetro.

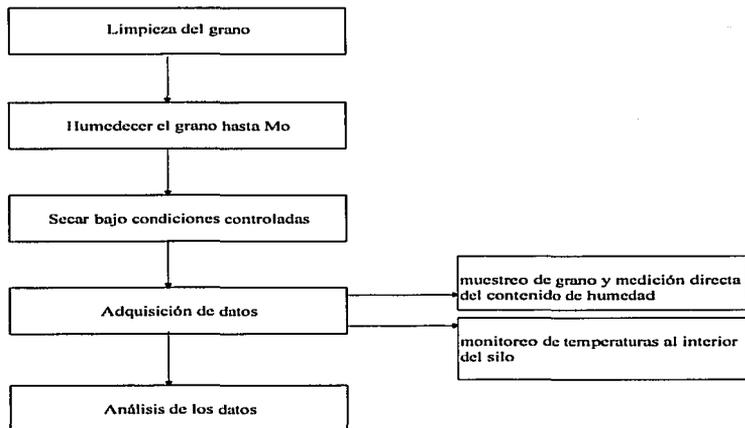
Para conocer el desarrollo del secado al interior del silo, se colocaron termotransistores en puntos estratégicos de un lado, como se ve en la figura, dado que la estructura es simétrica.

La señal de los termotransistores fue interpretada por medio de un convertidor A/D y leída con ayuda de una computadora, los datos se almacenaron para su posterior análisis. Las lecturas se llevaron a cabo a intervalos de tiempo de 5 min. cada uno.

Ubicación de los termómetros en el silo.

**Metodología**

El procedimiento seguido fue el siguiente:



Limpieza del grano: se utilizó un sistema de mallas para separar la materia extraña y el tamo del grano.

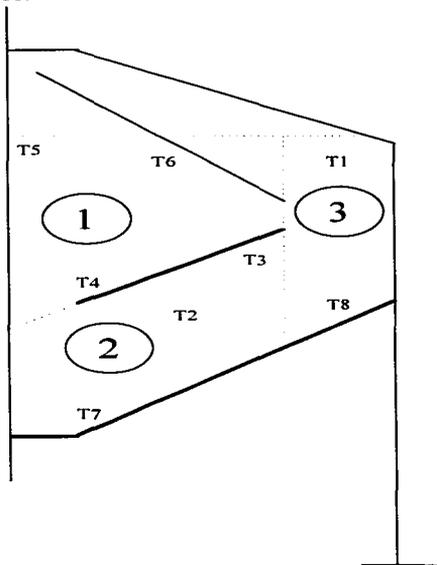
Humedecimiento del grano: se determinó la humedad inicial y se agregó la cantidad de agua necesaria para que el grano alcanzara las condiciones deseadas. Para garantizar la homogeneidad, se hicieron rotar recipientes con el grano ya húmedo por varias horas en una máquina de rodillos.

La humedad del grano se determinó tomando muestras y secándolas en una estufa (110 °C durante 20 h). Una vez seco el grano, se calcula la humedad por diferencia en peso, el peso inicial y final se determinó con ayuda de una balanza analítica.

Secado del grano: el secado se llevó a cabo a flujo constante de aire, calentado durante el día y sin calentamiento durante la noche.

Al término de cada período de secado (diurno o nocturno) se tomó una muestra de grano de la superficie. De esta forma se puede inferir acerca de la evolución del secado global dado que siempre es la zona que seca hacia el final y por lo tanto siempre es la más húmeda.

Para estudiar el secado dentro del silo, cada mitad puede ser dividida arbitrariamente en 3 partes dado que es simétrico.

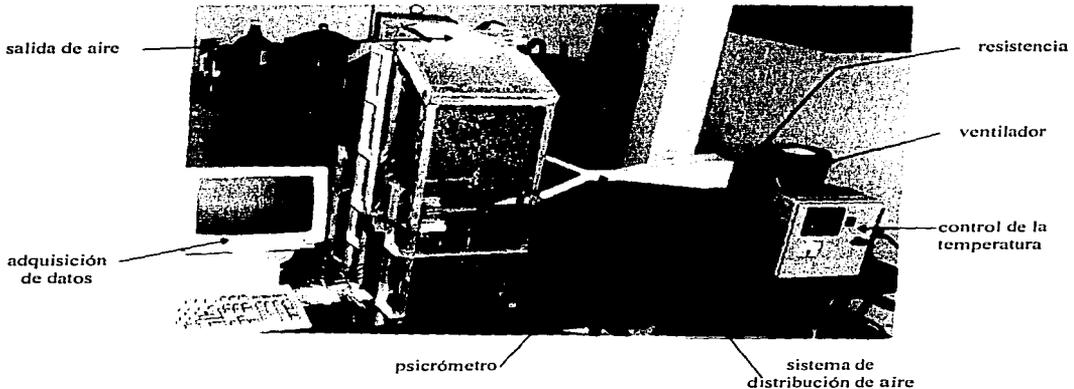


El sistema de distribución del aire se diseñó de tal forma que todo el grano en cualquier parte del silo recibe la misma cantidad de aire. Dicho de otra forma, las capas superiores de cada una de las tres zonas se secan al mismo tiempo. Se colocaron tres termómetros en la zona 1, tres en la zona 2 y dos en la zona 3.

La temperatura en cada punto del silo indicará qué tan seco se encuentra el grano en esa zona, si la temperatura es igual a la temperatura de entrada del aire, significa que el grano está seco y por lo tanto no hay intercambio ni de calor ni de humedad. Si la temperatura es igual a la temperatura inicial del grano o a la del ambiente (que generalmente son las mismas), significa que el grano no ha iniciado a secarse. Si la temperatura se encuentra entre la temperatura de entrada y la temperatura de salida, entonces el grano se está secando, y a mayor temperatura, más seco se encuentra el grano.

Una forma de saber que todo el grano se ha secado es verificando que en todas las zonas del silo la temperatura se ha igualado a la temperatura de entrada del aire. Esto se puede comprobar midiendo la humedad a la capa superior de grano, ubicada a la salida del aire.

El montaje del experimento se muestra en la foto:



Resultados

	Inicial	Final
Peso húmedo de grano	37.300 kg	32.380 kg
Humedad promedio del grano	30.45% b.s., 23.34% b.h.	13.24 % b.s., 11.69 %b.h.

Peso de materia seca: 28.593 kg

Tiempo total de secado: 3 días 4 h (76 horas)

de día: 37 h

de noche: 39 h

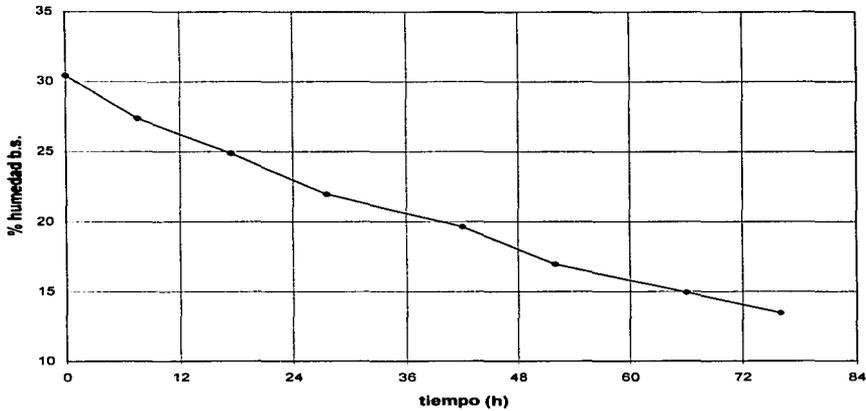
Después de 3 días y 4 horas (76 horas) de secado continuo día y noche de grano inicialmente a una humedad de 30.45% b.s., el total del grano alcanzó una humedad promedio de 13.24 %b.s. Las condiciones del secado fueron las siguientes:

	De día	De noche
Temperatura de entrada	38-40°C	23°C (min 21, max 24.2) = ambiente
Humedad relativa	14-16%	35% (min 28.1, max 41.5) = ambiente
Q (gasto de aire en m ³ /min.t)	7.26	7.26
v (a 23°C, 78.8 KPa, en m ³ /kg)	1.079	1.079

tiempo (horas:min)	% humedad b.s.	% humedad b.s. retirada
0:00	30.45	-
7:30	27.37	3.08
17:30	24.88	2.49
27:30	21.97	2.91
42:00	19.66	2.31
52:00	16.97	2.69
66:00	14.95	2.02
76:00	13.48	1.47

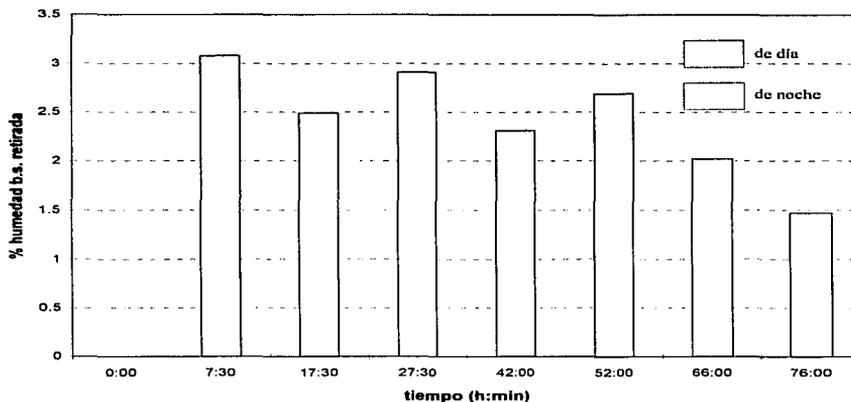
El desarrollo del secado de la capa superior se observa en la siguiente gráfica. Los segmentos con pendiente más pronunciada corresponden al secado de día con calentamiento del aire.

Gráfica 2.- humedad (%b.s.) de la capa superior de grano vs. tiempo de secado.



En la siguiente gráfica se observa la humedad que es retirada del grano superficial. Contra lo que establece el secado por capas, desde el primer día hay una importante pérdida de humedad en esa zona y es cada vez menor conforme pasa el tiempo. Lógicamente es más importante el secado en el día que en la noche. Llega un momento en que disminuye sensiblemente la cantidad de humedad retirada, lo que significa que se ha llegado a un punto en que es más difícil retirar la humedad y por lo tanto debe pensarse en finalizar el secado (dado que se vuelve ineficiente y costoso).

% de humedad b.s. retirado de día y de noche



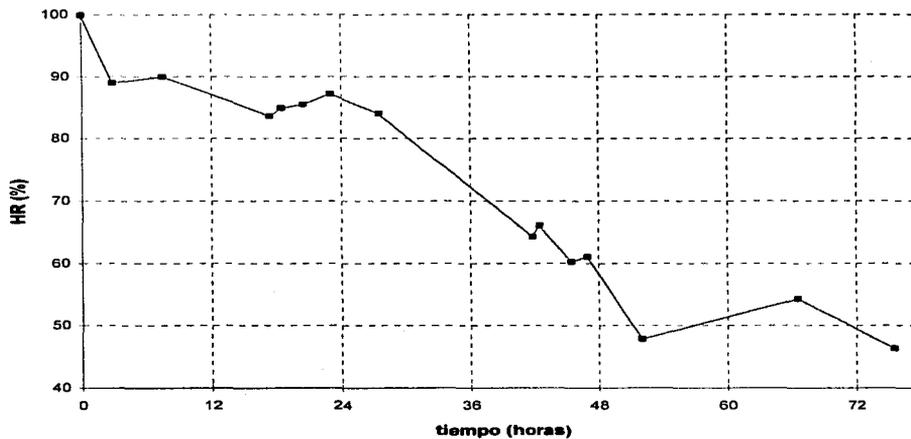
EN LA
 TESIS NO HAYE
 EN LA BIBLIOTECA

Las ecuaciones utilizadas en la evaluación teórica no consideran el hecho de que aunque no se haya alcanzado la humedad de equilibrio, la razón de pérdida de humedad por tiempo tiende a disminuir y entonces el secado se vuelve muy ineficiente y en general también innecesario pues seguramente ya se ha alcanzado un nivel de humedad seguro para el almacenamiento (normalmente de 3 a 5 puntos porcentuales de humedad b.s. por encima de la humedad de equilibrio).

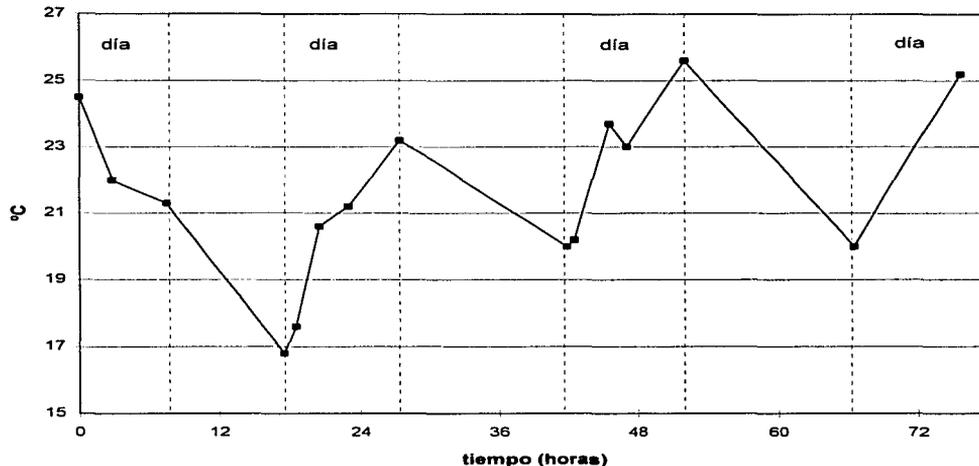
Considerando las condiciones del aire de salida, lo anterior se traduce en un incremento de la temperatura y una disminución de la humedad relativa. Cuando el aire pasa a través de una masa húmeda, tiende a saturarse y a enfriarse hasta la temperatura inicial del producto, tal y como sucede en las primeras horas del secado. Cuando este tiende a su fin, la temperatura de salida deja de mantenerse constante y aumenta. Por su parte la humedad relativa disminuye, o bien, ya no retira la misma humedad y en vez de salir a 100% HR sale a menos de 50% HR. Esto se observa en los siguientes datos.

tiempo (h: min)	HR (%)	Temperatura (°C)
0:00	99.9	24.5
2:50	89.0	22.0
7:30	90.0	21.3
17:30	83.6	16.8
18:30	84.9	17.6
20:30	85.5	20.6
23:00	87.2	21.2
27:30	84.0	23.2
41:50	64.3	20.0
42:30	66.1	20.2
45:30	60.3	23.7
47:00	61.1	23.0
52:00	47.8	25.6
66:30	54.3	20.0
75:30	46.3	25.2

Humedad relativa del aire de salida vs. tiempo



Temperatura del aire de salida vs. tiempo.

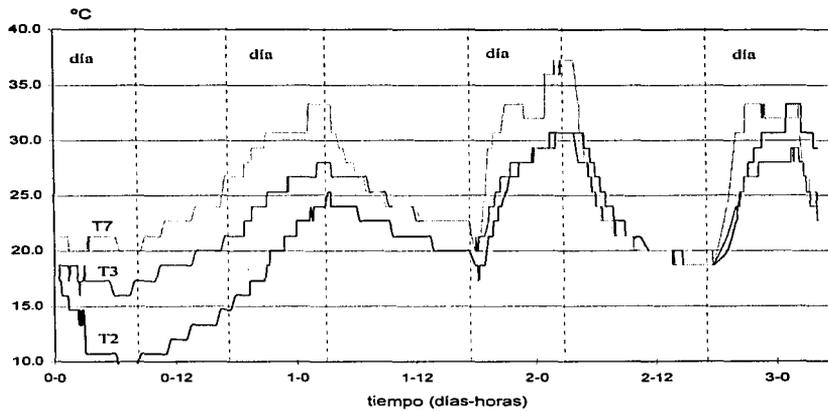


Con excepción del primer período de secado diurno, se observa que en el día la temperatura de salida aumenta, pero nunca se acerca a la temperatura de entrada (38-40°C) -lo haría si el tiempo de secado con calentamiento fuera más largo-, sólo llega a pasar por encima de algunos grados la temperatura inicial del grano. Por la noche, sería lógico que el aire saliera a la misma temperatura a la que entró (21-23°C), pero se enfría paulatinamente hasta unos 5°C, dado que se humedece adiabáticamente (visto en la carta psicrométrica, esto se traduce en un incremento de la humedad relativa y una disminución de la temperatura).

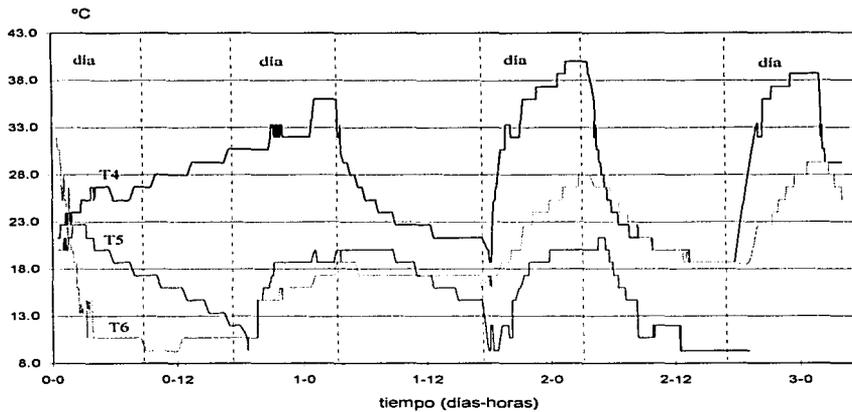
Con ayuda de los termotransistores se dió seguimiento al comportamiento de la temperatura al interior de cada zona y se ilustra en las siguientes tres gráficas.

En general se observó lo que se esperaba: entre más cerca de la entrada de aire se encuentre el grano, más rápido se seca, lo que se observa como un mayor incremento de la temperatura durante el día y por ende un enfriamiento más pronunciado.

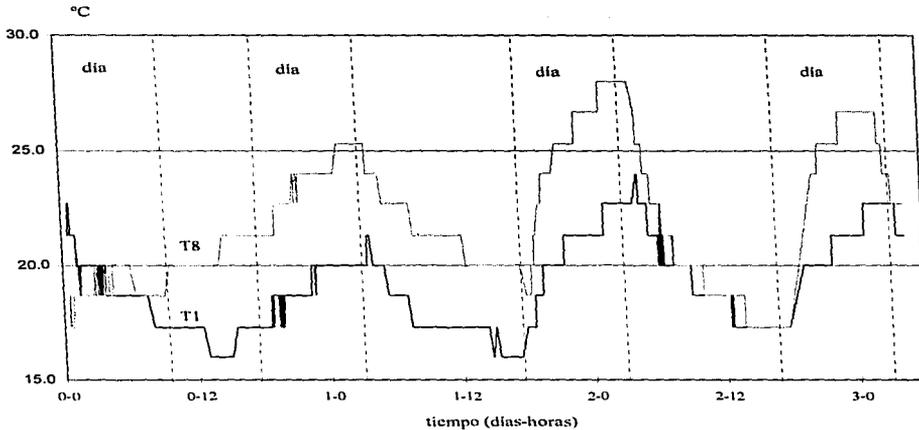
Temperatura vs tiempo en la zona 1.



Temperatura vs. tiempo en la zona 2.



Temperatura vs. tiempo en la zona 3.



Conforme transcurre el secado en el día, la diferencia de temperatura entre puntos a diferentes alturas de una zona disminuye y tienden a igualarse cuando finaliza el secado. Esto se debe a que el secado ocurre por capas: las capas que ya están secas se encuentran a la temperatura de entrada del aire, las capas que se están secando se calientan constantemente, y las capas que aún no se secan no aumentan su temperatura o muy poco dado que están sometidas a un flujo de aire que ya se enfrió a la temperatura inicial del grano porque ya hubo transferencia de calor con las capas inferiores de grano.

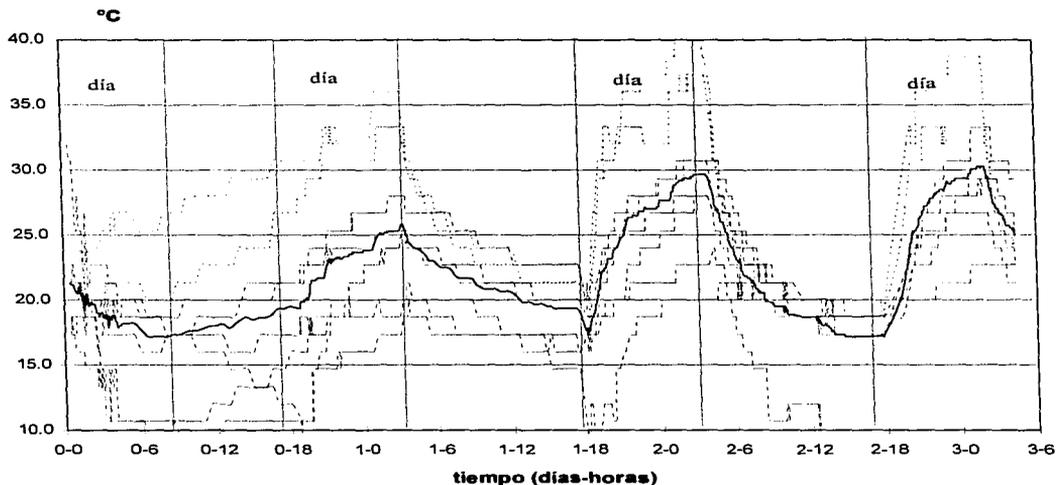
De noche, al entrar el aire a la temperatura ambiente y encontrarse inicialmente el grano caliente a causa del secado solar, hay un enfriamiento primero rápido y después más lento. La primer etapa de enfriamiento rápido se debe a dos eventos:

- 1.- Transferencia directa de calor entre el aire frío y el grano caliente.
- 2.- Secado del grano: dado que el aire ya no cuenta con la energía extra proporcionada por el sol, ahora al quitar humedad se ve obligado a disponer de energía del grano para evaporar la humedad que en él se encuentra. esto resulta en el enfriamiento del producto. Mientras el grano se esté secando, el enfriamiento, aunque más lento, continúa aún cuando las temperaturas del aire y el grano se hayan igualado (el primer evento deja de ocurrir). El producto puede disminuir su temperatura incluso por debajo del ambiente (2 o 3°C).

Si la temperatura se estabiliza en un mínimo en la noche, quiere decir que el secado es muy lento y por lo tanto el producto ya se encuentra suficientemente seco. De igual forma se puede considerar completado el secado si en el día la temperatura alcanza y se mantiene en un máximo cercano a la temperatura de entrada.

Si se calcula el promedio de los ocho termómetros, se puede definir con mayor claridad la conducta del silo, como se muestra en la gráfica siguiente.

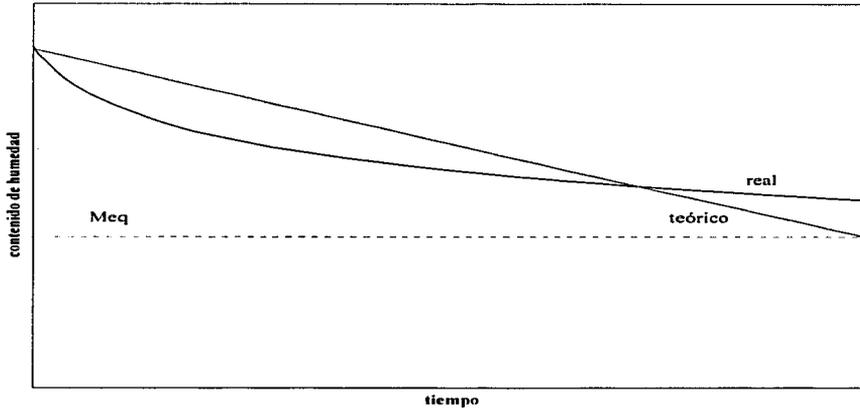
Temperatura promedio en el silo vs. tiempo.



Al inicio del secado hay un enfriamiento a pesar de que se suministra al sistema aire caliente, debido a que la pérdida de humedad enfría al grano y es de tal magnitud que este efecto es preponderante al calentamiento por el aire de secado. Más adelante se observa un comportamiento generalizado: calentamiento en el día y enfriamiento en la noche. El aumento de la temperatura en el día es cada vez mayor y tiende a alcanzar un máximo que, como ya se mencionó previamente, indica que el grano ya está suficientemente seco.

La magnitud del aumento de temperatura puede relacionarse con la cantidad de humedad retirada del producto, y es inversamente proporcional: en los primeros días del secado, el cambio global de temperatura es pequeño y la humedad quitada al grano es grande, mientras que en las últimas horas el calentamiento -y el enfriamiento- son más importantes pero se retira menos humedad.

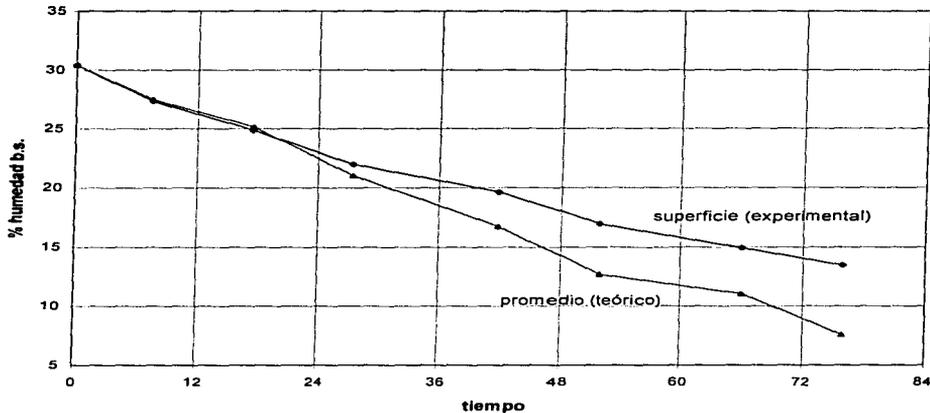
Asumimos entonces que la razón de pérdida de humedad con respecto al tiempo disminuye, lo cual contradice la evaluación teórica, en donde las ecuaciones utilizadas representan una disminución constante del contenido de humedad al transcurrir el tiempo de secado. La diferencia se observa en la siguiente gráfica.



La simulación teórica primero estima tiempos de secado largos pues no considera que al inicio del secado la disminución del contenido de humedad es rápida. Para tiempos más largos, la ecuación resulta optimista pues tampoco considera que conforme el contenido de humedad se acerca a la humedad de equilibrio el grano pierde cada vez menos humedad por unidad de tiempo.

Retomando los datos de la gráfica 2, se puede hacer una comparación entre datos teóricos y experimentales con la gráfica presentada más adelante. Hay que aclarar que la comparación no puede hacerse directamente ya que se trata por un lado de la humedad promedio del grano, y por otro de la humedad en una zona específica. En las primeras horas de secado el promedio teórico es muy similar a la humedad superficial experimental, por lo que la ecuación teórica da valores mayores a los reales. Hacia el final del secado, en teoría el grano alcanza una humedad de 8 % b.s., pero el grano en realidad tiene 14 % b.s. de humedad. En este caso la humedad de la superficie es cercana a la humedad promedio del total, entonces la estimación teórica ahora resulta en valores de contenido de humedad demasiado bajos. Esto significa que si se quiere calcular el tiempo de secado hasta valores cercanos a la humedad de equilibrio, con la ecuación teórica se obtendrá un tiempo muy corto.

Comparación entre humedad del grano experimental y teórica.



La humedad de equilibrio (Meq) es la mínima humedad a la que se puede secar el grano y depende exclusivamente de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa). Este valor cambia según si es de día o de noche, pues de día el aire es calentado y por lo tanto la temperatura es alta y la HR baja, mientras que en la noche es al contrario: la temperatura es baja y la humedad alta. Entonces en el día en teoría, en un clima seco templado, el maíz puede secarse hasta 7 %b.s., pero en la noche sólo hasta 13%. Secar el grano hasta Meq es innecesario e incluso absurdo, una vez alcanzada la humedad segura para el almacenamiento (14-15 %b.s.) el secado debe detenerse, esta humedad generalmente es cercana a la Meq para las condiciones de secado sin calentamiento. Así, si en el día se sobrepasara el valor de Meq nocturno, la operación del sistema de secado en la noche siguiente resultaría en el humedecimiento del grano.

Una vez secado el grano, este debe de ser guardado bajo condiciones que favorezcan su conservación. En el silo solar hexagonal, el mantenimiento de la calidad del maíz se fundamenta en el control de la temperatura y del microclima que en él se crea, mediante la aireación, que aprovecha el mismo sistema de secado.

Conclusiones

Dada la situación económica del país y la creciente crisis agrícola, el silo hexagonal puede ser una solución económica posible al problema de la poscosecha en México.

Así mismo, el silo ofrece una solución al problema de la pérdida de calidad en los granos y puede ser una alternativa para la conservación de los mismos durante largos periodos de tiempo sin que el grano sufra deterioro alguno en sus propiedades.

El silo es versátil, ya que puede ser fabricado y construido en diferentes tamaños de acuerdo con las necesidades del productor y solamente está limitado por el área necesaria para los colectores solares. Las características constructivas permiten la carga y descarga en diferentes tipos de transporte, abaten los costos de construcción y permiten el control de plagas.

La modificación del sistema de poscosecha y el cambio gradual del sistema tradicional de encostado por el sistema de silos de pequeña capacidad, reducirá las pérdidas poscosecha debidas a daños mecánicos y la calidad de los granos mejorará considerablemente.

Se puede secar maíz en el silo en unos cuantos días no siendo necesario un sistema complejo de dehumidificación del aire, ya que las condiciones ambientales permiten que la humedad del grano sea retirada por el sistema incorporado.

Es conveniente airear durante la noche, ya que el tiempo de secado se reduce considerablemente y a pesar de que también se consume una mayor cantidad de energía el costo es mínimo comparado con el beneficio de conservar el grano por un mayor tiempo sin deterioro alguno en sus propiedades.

La aireación nocturna también permite que la temperatura del grano disminuya después del periodo diurno de calentamiento solar; el enfriamiento del grano es sumamente benéfico, ya que los insectos y hongos no se desarrollan a temperaturas bajas.

Desafortunadamente la capacidad de secado está limitada por la humedad inicial del grano, que no debe exceder 30-32% b.s. (24 % b.h.), y por lo tanto un maíz más húmedo (como el recién cosechado) debe pre-secarse al menos hasta esa humedad. Aún así, el secado solar representa una alternativa ecológica y muy económica, dado que sólo se opera un ventilador durante algunos días en todo el año. Los costos de secado dentro del silo son mucho menores a los costos de secado en secadores industriales.

La conservación de la calidad del grano es el objetivo primordial del silo y para ello cuenta con diversas opciones: si el silo es pequeño puede hacerse hermético, se puede aplicar fumigante o algún tratamiento anti-plagas correctivo o preventivo (ácido, etc.); además de ser hermético, los silos pequeños también pueden ser equipados con un sistema de aireación y secado.

Si se trata de un silo de mayor capacidad, el sistema de aireación puede ser utilizado para la inyección de fumigante, de gas inerte o simplemente para mantener la temperatura del grano debajo de un límite dado, y los niveles de humedad deseados. Incluso un silo equipado con sensores de temperatura y/o humedad puede ser automatizado y volverse totalmente autosuficiente.

No se recomienda que los silos con una altura mayor a 15 metros sean equipados con un sistema de aireación, ya que la resistencia del grano al paso del aire aumenta considerablemente y se necesitaría un ventilador muy grande para vencerla, por lo cual el sistema sería más costoso aunque considerablemente más barato que un sistema convencional.

Para silos de grana capacidad se requerirá una cantidad de terreno adicional considerable, ya que el área requerida por los colectores es de 2.2 m² por tonelada de grano y esto significa que el área disponible en el techo del silo no es suficiente.

Si se hace un arreglo de varios silos, el área total de los silos puede ser usada para mantener la humedad de cada una de las celdas, esto es aireando en serie; el área total de colección solar se usa para la primera celda, después el sistema se usa para la segunda y así sucesivamente.

Aunque el estudio se realizó enfocado al secado del maíz, este sistema es aplicable para todo tipo granos, ya que las propiedades termodinámicas y físicas son similares para todos los tipos de granos.

Bibliografía y Referencias

- Almanza, Muñoz F. *Ingeniería de la energía solar* 1a ed. El Colegio Nacional. México 1994
- Alvarez Gabriela, Estrada C. *Simulación matemática de secado de grnos usando colectores solares planos*. En memoria de la XIX semana nacional de energía solar 1995 La Paz, Baja California Sur. México pp 461-466
- Arias Ciro. 1993. *Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural*. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile., P.P.14-26, 55,60,.98-111.
- Arias C.A., Barahona H.E., Valladares G. 1994. *Estudio de la eficacia de insecticidas comerciales y de origen vegetal en plagas de frijol (*Phaseolus vulgaris*) y de maíz (*Zea mays*) almacenado*. En memorias de la III renión nacional de la problemática de poscosecha de granos y semillas y del taller de evaluación de pérdidas poscosecha de granos básicos, AMEXPOGRASE 1994, pp 92-98.
- Brooker D. B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. AVI Publishing Co., USA, pp 1-5, 77, 78, 390-393, 395-402
- Duffie J.A , Beckman. *Solar Engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons 2a Ed. 1980
- Estrada Cajigal Vicente. *Métodos de cálculo de la radiación solar*. En notas del curso de actualización en energía solar Instituto de investigaciones en Materiales, Temixco Morelos, 1980.
- Hall C. W. 1980. *Drying and Storage of Agricultural Crops*. AVI Publishing Company INC, USA, pp 58-62, 291-309.
- Hernández G., Morano H.R., Sosa L.G. 1995. *Secado y aireación solar en un silo hexagonal*. Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM, pp 21-24.

- Juarez de Sousa e S. 1995. *Pré-processamento de productos agrícolas*. 1a. edición, Depto. editorial Instituto Marfá, Brasil, 1995, pp 57-72, 145-161.
- Kent N.L. 1987. *Tecnología de los cereales*. 3a edición, editorial Acribia, España, pp. 1-3, 10-11, 194.
- Moreira R.G., Bakker-Arkema F.W. 1992. *Grain dryer controls: a review*. Cereal Chemistry, vol. 69, no. 4, pp 390-396.
- Moreno E. 1995. *El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*. PUAL, UNAM, México.
- Multon J.L. 1988. *Preservation and storage of grains, seeds and their by-products*. Lavoisier Publishing Inc., NY EUA, pp 3-4, 18, 50-52
- Sauer D.B. (editor). 1992. *Storage of cereal grains and their products*. 4a edición, American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul, Minnesota, USA, pp 213, 228-244
- Sayigh A.A.M Ed. *Solar energy engineering*. 1a Ed. Academic press, 1977
- Talbot M.T. 1993. *Management of stored grains with aeration*. Circular 1104, Agricultural Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, USA, pp 1-8.
- Talbot M., Koehler P. 1991. *Pest management strategies for storing grains in Florida*. University of Florida Cooperative Extension Service, USA, pp 1-27.
- Talbot M.T. 1988. *Grain drying and storage on Florida farms*. Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, USA, pp 1-19.
- Talbot M.T. 1985. *High Moisture Grain Storage*. Bulletin 225, Florida Cooperative Extension Service, University of Florida, Gainesville, USA, pp1-13.

- ¹ Sayigh A.A.M *Solar energy engineering*. 1a Ed. 1977 Academic Press.
- ² Torres F., *El sistema poscosecha y la alimentación nacional*, en *El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*, PUAL, 1995
- ³ Chías J.L., Gasca J., *Participación del Sistema Nacional de Transporte en la distribución de granos en El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*, PUAL, 1995, p.217.
- ⁴ Moreno E., *Op cit*
- ⁵ Torres F., *El sistema poscosecha y la alimentación nacional*, en *El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*, PUAL, 1995, p.181.
- ⁶ Arias C., *Almacenamiento de granos en Latinoamérica*, en *El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*, PUAL, 1995, p.238.
- ⁷ Moreno E., *El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*, PUAL, México, 1995, pp. 257.
- ⁸ Torres F., *El sistema poscosecha y la alimentación nacional*, En *El sistema poscosecha de granos en el nivel rural: problemática y propuestas*, PUAL, México, 1995 pp 193.
- ⁹ Hall C.W. 1980 *Drying and storage of agricultural crops*. AVI Publishing Co, USA pp 58.
- ¹⁰ Brooker D. B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. AVI Publishing Co., USA, pp 244.
- ¹¹ Almanza , Muñoz. Ingeniería de la energía solar. 1a Ed. El colegio Nacional 1994
- ¹² Duffie, Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley & Sons. 1980 pp 94
- ¹³ Duffie, *Op. cit.* pp 77
- ¹⁴ Duffie, *Op cit.* pp 209
- ¹⁵ Duffie, *Op cit.* pp 216
- ¹⁶ Duffie, *Op cit.* pp 221
- ¹⁷ Duffie, *Op. cit.* pp 174
- ¹⁸ Leída en la carta psicrométrica.
- ¹⁹ Calculado con la ecuación de Chung, para las condiciones dadas.
- ²⁰ Las tarifas según el uso, la localidad, el mes y el año se pueden encontrar en internet: <http://www.cfe.gob.mx/gercom/tarif97/tarifa.html>
- ²¹ Brooker D. B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. AVI Publishing Co., USA, pp 279
- ²² Sauer D.B (editor) 1992. *Storage of cereal grains and their products*. 4a edición, American Association of Cereal Chemists Inc., St. Paul Minnesota, USA. pp 216