

## Control de la temperatura para la prevención de plagas poscosecha en la conservación de granos

Temperature control for preventing  
postharvest plagues in grain conservation

Michael Feito Cespón\*  
Gretel Martínez Curbelo\*\*  
Daylí Covas Varela\*\*\*  
Aníbal Barrera García\*\*\*\*  
*Universidad de Cienfuegos (Cuba)*

\* Ingeniero industrial. Máster en Ingeniería Industrial. Mención Logística. Profesor auxiliar. [mfeito@ucf.edu.cu](mailto:mfeito@ucf.edu.cu)  
\*\* Ingeniero industrial. Máster en Ciencias en Matemática Aplicada. Profesor asistente. [gmartinez@ucf.edu.cu](mailto:gmartinez@ucf.edu.cu)  
\*\*\* Ingeniero industrial. Máster en Producciones más Limpias. Profesor asistente. [dcovas@ucf.edu.cu](mailto:dcovas@ucf.edu.cu)  
\*\*\*\* Ingeniero industrial. Máster en Ciencias en Matemática Aplicada. Profesor asistente. [abarrera@ucf.edu.cu](mailto:abarrera@ucf.edu.cu)

**Correspondencia:** Michael Feito Cespón: carretera a Rodas, Km 4, Cuatro Caminos, Cienfuegos (Cuba). Teléfono: 58165990, [mfeito@ucf.edu.cu](mailto:mfeito@ucf.edu.cu)

## Resumen

La infestación por plagas durante el período de poscosecha es la principal causa de las pérdidas de calidad de granos como el maíz, principalmente en zonas de clima tropical, debido a los altos valores de temperatura y humedad. El almacenamiento en silos metálicos refrigerados (SMR) es una de las principales tecnologías utilizadas para la conservación de grandes cantidades de granos durante largos períodos. Las variables atmosféricas se modifican a través de la utilización de vehículos equipados con compresores de aire frío, los cuales son compartidos entre varios silos. La utilización inadecuada de estos carros de frío provoca que la temperatura o la humedad en los SMR no sean las especificadas para la conservación del maíz.

Esta investigación tiene como objetivo el análisis y pronóstico del comportamiento de la temperatura y la humedad en un SMR para evaluar y mejorar el proceso de enfriamiento. Se construyó un modelo de pronósticos con líneas de tendencia para la temperatura en el SMR, el cual fue utilizado para planear el uso adecuado de los carros de frío.

**Keywords:** almacenamiento de granos, control de plagas poscosecha, pronóstico de temperatura, silos metálicos refrigerados.

## Abstract

The postharvest insect plagues are the main cause of grain quality lost during storage period, fundamentally in tropical climate zones due to the high values of temperature and humidity. The storage in Refrigerated Metallic Storehouses (RMS) is one of the principal technologies for the conservation of large grain quantities during long time period. The atmospheric variables are modified by using vehicles equipped with cool air compressors which are shared among several storehouses. The inadequate usage of these cold carts causes that temperature and/or humidity in the RMS run out of the specifications for the maize conservation.

This research aims to analyse and forecast the temperature and humidity behavior in a RMS in order to evaluate and to improve the cooling process. A forecasting model for the temperature in the RMS is built using trend lines, which is employed to plan the adequate usage of the cold carts.

**Palabras clave:** grain storage, post-harvest plague control, refrigerated metallic storehouse, temperature forecasting.

Fecha de recepción: 04 de mayo de 2014  
Fecha de aceptación: 31 de enero de 2015

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años la población mundial ha aumentado considerablemente; las necesidades alimentarias han sido mayores de acuerdo con el aumento demográfico y, en cambio, la elaboración de los productos y subproductos para la alimentación no ha crecido de acuerdo con el desarrollo poblacional.

Según la estimación de la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en el futuro la demanda de los alimentos aumentará un 3 % por año, y la producción alimentaria únicamente tendrá un aumento del 2.8 % por año [1].

El cultivo del maíz en el continente americano representa casi el 40 % del área ocupada en el mundo por los cultivos. En Estados Unidos, que es el centro productor, con más del 45 % de la producción mundial, el maíz constituye el cultivo más importante, utilizado para la alimentación humana y como alimento básico de las dietas para animales [2], [4]. En Latinoamérica todos los países cultivan este cereal; entre ellos se destacan Brasil, México y Argentina. Europa ocupa el segundo lugar en cuanto a producción, y sobresalen Francia, Rumanía y Yugoslavia.

La cadena del maíz ocupa un lugar prioritario en el desarrollo de casi todos los países del mundo debido a su capacidad de generación de empleo, inversión, desarrollo regional y a las innumerables oportunidades de crecimiento y progreso que ofrece [3].

La amplitud de las pérdidas en los granos limita gravemente el alcance de los esfuerzos realizados para aumentar la producción de alimentos. En este contexto, se describen diversos factores, bióticos y abióticos, causantes de pérdidas en la producción y almacenamiento de maíz a nivel mundial [5]. El principal factor abiótico es la infertilidad del suelo y los insectos poscosecha como factor biótico; en conjunto estos factores son responsables de pérdidas que varían entre 70 y 95 % de la cosecha cuando las condiciones de cultivo y almacenamiento son deficientes.

Las plagas causan pérdidas superiores al 10 % durante la producción y de 10 a 20 % en poscosecha. Las principales plagas que afectan el grano durante su almacenamiento son el gorgojo de maíz (*Sitophilus zeamais*), en

las regiones tropicales y subtropicales; el barrenador grande del grano (*Prostephanustruncatus*), localizado en las regiones de transición y altas, y la palomilla dorada de maíz (*Sitotrogacerealella*), ubicada en las regiones templadas y altas. Plagas secundarias que aparecen con menor frecuencia son: *Plodiainterpuctella*, *Triboliumcastaneum*, *Rhyzoperta dominica*, *Cathartusquadriollis*, *Cryptolestesferrugineus*, entre otras [6].

El clima tropical favorece la proliferación de las plagas dentro de los almacenes [2], [4], [7], [8] debido a los altos valores de temperatura y humedad.

Para garantizar el consumo humano y animal en algunos países es necesario el almacenamiento de grandes cantidades de cereales, entre ellos el maíz [9]. Es por esto que la conservación de los mismos en óptimas condiciones reviste mayor importancia.

La finalidad principal del almacenamiento consiste en guardar parte o la totalidad de las cosechas o subproductos elaborados en correspondencia con necesidades tales como: contar con semillas certificadas para los cultivos de las siguientes temporadas, constituir una reserva de alimentos para épocas posteriores, esperar mejores precios en los mercados locales e internacionales y utilizar los productos de acuerdo con las necesidades de consumo, industriales y de mercado.

La conservación de los productos agropecuarios es necesaria para lograr su disponibilidad en un momento dado a lo largo de todo un período. Durante la conservación el producto puede mantener sus cualidades originales o sufrir transformaciones, según el proceso y los objetivos [2].

En general, los granos deben almacenarse para mantenerlos físicamente bien y conservar su poder germinativo, aunque pueden deteriorarse físicamente por la acción de bacterias y hongos.

El principio más usado para la prolongación marcada de la vida útil de los productos agropecuarios es el del almacenamiento refrigerado o de baja temperatura bajo condiciones controladas de humedad y temperatura; con lo cual se reduce la actividad biológica del producto y de los microorganismos, y en el caso de granos y especias se evita la incubación de los huevos de insectos [2], [10]-[12].

El almacenamiento de granos constituye una actividad muy especializada que requiere de tecnologías apropiadas para garantizar su conservación con la calidad necesaria.

Para lograr que el almacenamiento de los granos se efectúe correctamente, estos deben conservarse limpios, sanos, secos y fríos y en un depósito que pueda mantener las temperaturas y las condiciones de calidad hasta el destino final del producto.

Los métodos de almacenamiento en las diferentes regiones del mundo dependen de las necesidades de cada lugar, de las condiciones económicas y del objetivo del almacenamiento.

Para conservar productos en su estado natural con el mínimo de cambios y pérdidas es necesario controlar la temperatura, la humedad relativa y las condiciones del local.

Algunos autores [2], [4], [5], [10]- [14] señalan que las bajas temperaturas inhiben las reacciones bioquímicas de la germinación y la fermentación y la supervivencia de agentes bióticos destructores de los granos.

El desarrollo de tecnologías avanzadas en dispositivos de mayores requerimientos técnicos como los silos metálicos refrigerados (SMR) ha permitido que las producciones se conserven mayor tiempo, en condiciones más homogéneas, libres de cambios bioquímicos y del daño ocasionado por las plagas.

Dentro de los silos se debe mantener un valor constante de temperatura y humedad para no favorecer los procesos fermentativos que pueden sufrir los granos en condiciones de almacenamiento. El aislamiento total con el exterior del producto almacenado y su consecuente conservación en el tiempo es la premisa fundamental de este tipo de sistema de almacenaje [2], [15].

El uso de SMR con equipos de refrigeración artificial permite independizar el almacenamiento de las condiciones climáticas externas, lo cual provoca que las condiciones del clima no incidan en la conservación de la calidad del grano.

La refrigeración de los SMR se realiza a través de la inyección de aire seco a baja temperatura mediante el uso de máquinas enfriadoras. Esta tecnología se encuentra instalada en medios de transporte automotores, lo que permite su utilización en el enfriamiento de varios silos.

El uso eficiente de los carros de frío depende de una correcta planificación y distribución entre los diferentes SMR para lograr las condiciones climáticas requeridas.

La presencia de plagas en los SMR en la provincia de Cienfuegos provocó en varias ocasiones la venta del maíz con muy poco tiempo de almacenamiento, y debido a la infestación, la imposibilidad del consumo humano. En la tabla 1 se muestran los niveles de infección en los diferentes silos de la provincia, siendo los de la posición Guillermo Moncada los que tuvieron mayores pérdidas; las causas potenciales: el mal uso de los carros de frío, lo que provocó altas temperaturas en los mismos.

**Tabla 1.** Niveles de plaga en los SMR para almacenamiento de granos en Cienfuegos 2012

Posición de silo	Toneladas	Silo	Tipo de plaga	Nivel de plagamiento
Guillermo Moncada	6000	A	<i>Sitophilusoryzae</i>	Ligero
			<i>Triboliumcastaneum</i>	Medio
		B	<i>Sitophilusoryzae</i>	Medio
			<i>Triboliumcastaneum</i>	Medio
Ramón Balboa	4000	A	<i>Triboliumcastaneum</i>	Ligero
			<i>Cryptolestesferrugineus</i>	Ligero
		C	<i>Cryptolestesferrugineus</i>	Ligero
Mal Tiempo	2000	A	<i>Triboliumcastaneum</i>	Medio

Las plagas de insectos poscosecha se desarrollan en un rango óptimo entre 25 y 35 °C. Temperaturas por debajo de 20 °C reducen su tasa de crecimiento a puntos tan bajos que los niveles de daños son casi insignificantes, pero algunos son resistentes, como los *Sitophilus* [4], [5], [8], [10]- [12], [14], [15], [18].

Los productos almacenados en los silos no deben tener puntos inferiores a 15 °C, debido a que ello produce la cristalización del grano y afecta su molido; ni mayores a 20 °C; en este rango el maíz queda vulnerable a la aparición de plagas; lo óptimo es mantener la temperatura de todos los puntos del grano entre estos valores y el promedio de temperatura del silo no debe sobrepasar los 17,5 °C.

La utilización de la estadística [19]-[22] permite enfrentar varios problemas relacionados con el control y pronóstico de los procesos. Una investigación anterior del mismo objeto de estudio [23], demuestra la necesidad de continuar profundizando en los métodos de pronóstico de las condiciones atmosféricas en los SMR. En la misma, los problemas esenciales radicaron en la necesidad de corregir las desviaciones para el cálculo de la Señal de Rastreo y en la omisión de medidas de errores importantes como la Media del error y la Media del Porcentaje de Error Absoluto, las que pueden complementar el modelo original y brindar un pronóstico más acertado para la toma de decisiones en la planificación de los carros de frío.

Es por ello que esta investigación tiene como objetivo analizar y pronosticar el comportamiento de las variables atmosféricas en el SMR en la conservación de maíz, teniendo en cuenta la Media del error para corregir el modelo de pronóstico planteado en [23]. De esta manera se pretende planificar eficazmente el proceso de enfriamiento en los silos de la provincia de Cienfuegos y disminuir las pérdidas por infección de plagas.

## **MATERIAL Y MÉTODOS**

A fin de cumplir el objetivo de esta investigación y ordenar lógicamente los pasos y técnicas estadísticas que se deben realizar se describe el siguiente procedimiento:

### **Selección del objeto de estudio y conformación de la muestra**

Se tomaron valores de temperatura y humedad de los granos de un silo que ha mantenido afectaciones por plagas en 2012. Los datos se obtuvieron entre enero a marzo de 2013. Para esta investigación se utilizó el procedimiento referido en [2] para la toma de los datos para el monitoreo de la temperatura y humedad en los silos.

## Obtención de los datos

- Durante el almacenamiento se tomó una lectura de temperatura diaria siempre a las 8 de la mañana. La medición y control de la temperatura dentro del silo se efectuó con un equipo termocolector, el cual calcula la temperatura promedio de un sistema de sensores.
- Se obtuvo un total de 90 mediciones de temperatura correspondiente al tiempo en que se mantuvo el almacenamiento del maíz hasta la venta del grano.
- El valor de humedad se obtuvo a partir de muestras del grano de diferentes partes del SMR, por lo que solo se realizó una medición semanal, lo cual resultó en una cantidad de 13 observaciones durante el período analizado.

## Análisis estadístico de los datos

- *Normalidad de los datos*

Se procesan estadísticamente las variables de temperatura y humedad, en las que se prueba primeramente el ajuste de las variables a la distribución normal a través de la prueba de Bondad de Ajuste de Kolmogorov-Smirnov.

La realización de los análisis de capacidad del proceso de enfriamiento en los SMR requiere la determinación de la distribución de probabilidad de las variables para hacer inferencias estadísticas a partir de las muestras tomadas.

- *Análisis estadístico de la capacidad del proceso de enfriamiento*

La capacidad de un proceso se suele interpretar como su aptitud para realizarse de acuerdo con las especificaciones, y se puede considerar como un indicador de la uniformidad en el rendimiento.

El análisis se suele iniciar cuando se necesita estudiar un nuevo proceso, cuando se ha modificado alguna de las partes esenciales del proceso o cuando muestra cierta inestabilidad. Este paso se realiza para demostrar las desviaciones del proceso de enfriamiento y para justificar la necesidad de tomar acciones para su corrección.



Los índices de capacidad calculados utilizando las expresiones 1, 2, 3 y 4 son [16], [17]:

$$P_p = \frac{USL - LSL}{k\sigma_l} \quad (1)$$

$$P_{pk} = \min \left[ \frac{\mu - LSL}{(k/2)\sigma_l}, \frac{USL - \mu}{(k/2)\sigma_l} \right] \quad (2)$$

$$C_p = \frac{USL - LSL}{k\sigma_s} \quad (3)$$

$$C_{pk} = \min \left[ \frac{\mu - LSL}{(k/2)\sigma_s}, \frac{USL - \mu}{(k/2)\sigma_s} \right] \quad (4)$$

Donde

USL y LSL son los límites: superior e inferior, de las especificaciones,  $\mu$  es la media estimada de la muestra de los datos,  $\sigma_l$  y  $\sigma_s$  son las desviaciones estándar a largo y corto plazo y  $k$  la cantidad de veces que se debe repetir la desviación; usualmente se toma como 6.

$C_p$  y  $P_p$ : índices de capacidad potencial del proceso a corto y largo plazo, respectivamente. No toma en cuenta la media observada del proceso.

$C_{pk}$  y  $P_{pk}$ : índices de capacidad o habilidad real del proceso a corto y largo plazo, respectivamente; toma en cuenta la media observada en el proceso.

Para interpretar estos índices se comparan con valores específicos: si  $C_p < 1$ , no es posible garantizar que las mediciones satisfacen la especificación, por tanto, el proceso no puede ser capaz; si  $C_p > 1$ , el proceso es capaz. El coeficiente  $C_p$  tiene también otra interpretación muy importante, pues su inverso representa el porcentaje de la banda de tolerancia que abarca los

límites naturales de variación del proceso cuando este está centrado. Puede ser interpretado el porcentaje que representan los límites naturales de variación del proceso, de los límites de especificación.

Para interpretar el índice de capacidad o habilidad real, si  $C_{pk} > 1.33$ , el proceso es capaz y es comúnmente usado como una meta para muchas compañías; si  $1 < C_{pk} < 1.33$ , el proceso es marginalmente capaz; y si  $C_{pk} < 1$ , el proceso no es capaz.

También pueden tomarse decisiones si se comparan ambos índices: si  $C_p = C_{pk} > 1$ , el proceso es capaz y centrado; si  $C_p > C_{pk} > 1$ , el proceso es capaz pero no está centrado; si  $C_p > 1$ ,  $C_{pk} > 1$ , el proceso es potencialmente capaz; y si  $C_{pk} < C_p < 1$ , el proceso no es capaz.

Los índices Pp y Ppk se interpretan de manera similar, aunque representan la variabilidad del proceso a largo plazo.

- *Comprobación de independencia estadística de las variables*

Se analiza la independencia estadística de estas variables utilizando el estadístico Chi-cuadrado de Pearson para conocer si existe relación entre las mismas dentro del SMR. El objetivo de este análisis es prever posibles afectaciones o no en una variable si se toman acciones para modificar la otra.

Para la realización de las pruebas estadísticas se utilizó el software Stat-Graphics versión 152.14 de 2007.

### **Conformación del modelo de pronóstico**

Para la conformación del modelo se propone utilizar las pendientes de las rectas resultantes de las regresiones lineales en dos momentos fundamentales: cuando el carro de frío está conectado y realizando el proceso de enfriamiento y cuando no se le está administrando frío. El objetivo es establecer un modelo que prediga en un rango de tiempo mayor que las series temporales. Las nuevas rectas de predicción se forman utilizando las pendientes antes explicadas multiplicadas por el tiempo "t", sumándole el valor de la temperatura del período anterior, como se describe en la expresión 5.

$$Tf(t) = T_{0n} + M_i(t - tf_{n-1}) \quad (5)$$

Donde

$Tf(t)$  es la predicción de la temperatura para un tiempo  $t$ .

$M_i$  son las pendientes de las rectas de tendencia, donde  $i$  es el número de la pendiente correspondiente con las entradas y salidas de los carros de frío; su selección se explica a continuación:

- La primera debe seleccionarse tomando la pendiente de la recta de regresión cuando se enfría el silo un día antes de su llenado.
- La segunda se corresponde con la mayor de las pendientes cuando no se encuentra conectado el carro de frío, para pronosticar siempre el escenario que más rápido eleve la temperatura.
- La tercera es la pendiente de menor módulo cuando los carros de frío se encuentran conectados, para pronosticar el escenario que más lento disminuya la temperatura.

La primera pendiente se toma solo una vez, pues describe el enfriamiento en el proceso de llenado del silo. Las otras dos se alternan para mantener la temperatura alrededor de un valor medio.

$T_{0n}$  es la temperatura inicial conocida antes de realizar un cambio  $n$  (entrada o salida del carro de frío); se toma de los datos reales de temperatura cuando se conocen o de la temperatura final pronosticada cuando se está planificando.

Finalmente,  $tf_{n-1}$  constituye el tiempo en días en el que ocurrió el último cambio  $n$  y se le resta al tiempo  $t$ ; lo cual posibilita que la variable que multiplica la pendiente de la recta tome nuevamente el valor de 0 cada vez que se realice un cambio.

### **Análisis de los errores**

En la práctica, un pronóstico perfecto es imposible y, por tanto, el tomador de decisiones sabe que debe lidiar con un grado de error; para decidir si el modelo es adecuado se utilizan varios indicadores, como la Media de los

errores (Me), Error Absoluto Medio (MAD), la Media del Porcentaje de Error Absoluto (PMAD) y la Señal de Rastreo (TS), descritas por las expresiones 6, 7, 8 y 9, respectivamente, los cuales generalmente se analizan en forma conjunta para tener una visión más objetiva.

$$Me = \frac{\sum_{t=1}^n At - Ft}{n} \quad (6)$$

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |At - Ft|}{n} \quad (7)$$

$$PMAD = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t} \quad (8)$$

$$TS = \frac{\sum_{t=1}^n (At - Ft)}{MAD} \quad (9)$$

Donde

$A_t$  son los valores de la variable para un tiempo  $t$ ,  $F_t$  son los valores del modelo de pronóstico para el mismo tiempo  $t$  y  $n$  la cantidad de unidades de tiempo que se utilizan para la conformación del modelo de pronóstico.

Los valores del MAD y la Me deben estar cercanos a 0 para que el modelo se considere adecuado. El PMAD brinda la proporción de la desviación con respecto al real; debe ser un valor bajo, está muy ligado a la precisión del modelo. Por último, la TS debe encontrarse entre  $\pm 6$  para que un modelo de pronóstico se considere adecuado. Si la señal de rastreo esta fuera de los límites, ello demuestra que el modelo se encuentra desviado. Es posible corregir este error adicionando al modelo la media de los errores (Me), como se muestra en la expresión 10.

$$Tf'(t) = Tf(t) + Me \quad (10)$$

Donde

$Tf'(t)$  es el modelo de pronóstico de la temperatura del SMR corregida la desviación,  $Tf(t)$  es el modelo original descrito en la expresión 5 y  $Me$  es la media de los errores descrita en la expresión 6.

### **Planeación de la operación de enfriamiento del SMR**

Una vez definido el modelo de pronóstico y comprobada su capacidad para predecir las temperaturas del almacenamiento en el SMR, se procede a realizar la planificación del próximo almacenamiento. Se utilizan las expresiones (5) o (10) en función de las decisiones tomadas en el paso anterior; además se determinan los valores de las pendientes de las rectas y el valor de temperatura inicial. Se procede a pronosticar la temperatura y se planean las entradas y salidas de los carros de frío para alcanzar el objetivo de mantener las temperaturas dentro del rango de especificaciones.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Análisis de la temperatura en el SMR**

Para probar que la capacidad del proceso de mantenimiento de la temperatura en este SMR es deficiente, se analiza estadísticamente el comportamiento de esta variable. Para ello se prueba la normalidad de la distribución de la variable utilizando la Prueba de Bondad de Ajuste de Kolmogorov-Smirnov; dado que el menor valor de probabilidad es 0.175971 y es mayor que 0.05, se puede plantear con un 95 % de confianza que los datos provienen de una distribución normal.

Se utiliza el software estadístico StatGraphics para determinar los índices de capacidad [19].  $Pp$  de 0.89 no es considerado bueno;  $Ppk$  es igual a 0.36. La diferencia entre  $Pp$  y  $Ppk$  demuestra que la variable no está centrada, lo cual puede observarse en la figura 1, así como que existen valores por encima del límite de especificaciones, mostradas con las líneas largas. Puesto que  $K$  es igual a 0.60, la media está localizada 60 % desde el centro de las especificaciones hacia el límite superior de especificación; lo cual puede contribuir de manera significativa a que la capacidad del proceso para cumplir con las especificaciones sea baja. El índice  $Cpk$  es mucho más pequeño que el de  $Cp$ , lo cual indica que la media del proceso está alejada de las especificaciones.

Como el valor de  $C_p$  es mayor que 2, se determina que el proceso es adecuado; quiere decir que para mantener la temperatura dentro de los límites de especificaciones el proceso de enfriamiento es potencialmente capaz si se logra acercar el centro a la media de las especificaciones.

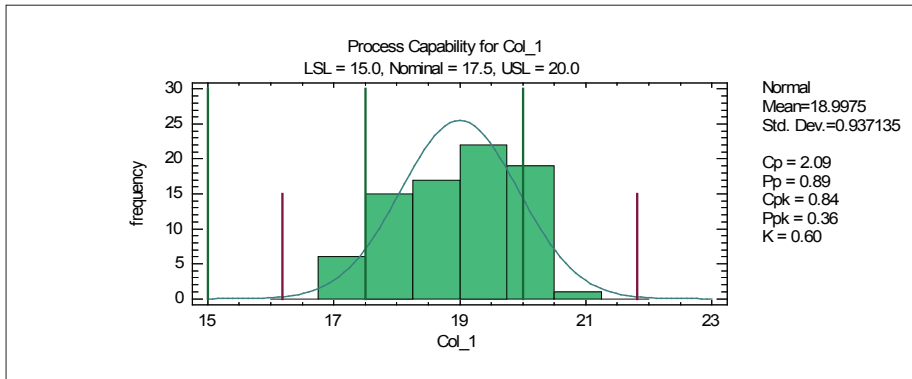


Figura 1. Capacidad del proceso de mantención de la temperatura en el silo

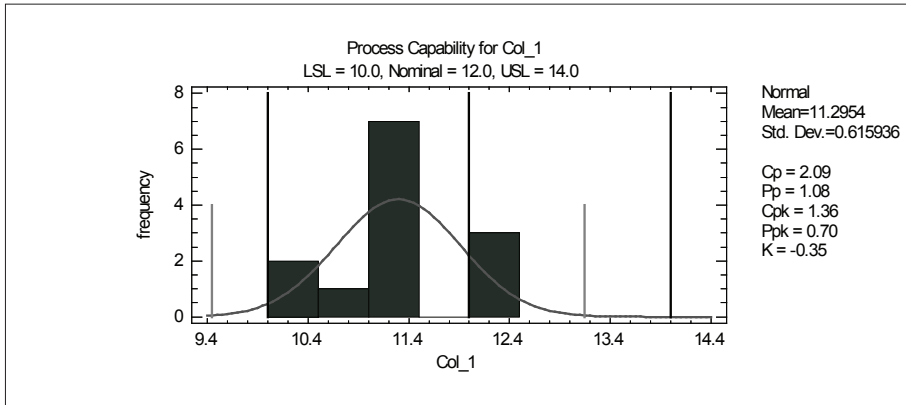
### Análisis de la humedad en el SMR

A medida que aumenta la humedad del grano por encima de la humedad de recibo aumenta el deterioro, principalmente causado por el desarrollo de hongos, levaduras y bacterias. Estos microorganismos necesitan de humedad para crecer, y a medida que se van desarrollando aumentan su nivel de respiración y la temperatura de la masa de los granos.

En general se pueden guardar granos con contenidos de al menos 14 % de humedad en equilibrio con una humedad relativa de menos del 70 % sin peligro de infección por microorganismos. Aun con humedades bastantes bajas los insectos atacan el grano. Muy pocos insectos atacan los productos almacenados y causa deterioro al grano con menos del 12 % de humedad. En el caso del maíz, los índices establecidos para mantener su integridad física durante el tiempo de conservación están entre el 10 y 14 % de humedad.

Para determinar si la distribución normal es apropiada para estos datos, se realiza la Prueba de Bondad de Ajuste de Kolmogorov-Smirnov; siendo el valor de probabilidad de 0,84 mayor que 0,05, por lo que se puede plantear con un 95 % de confianza que los datos provienen de una distribución normal.

El análisis de la capacidad de la variable humedad se muestra en la figura 2.



**Figura 2.** Análisis de la capacidad de la variable humedad en el SMR

El valor de Cp es 2.09, lo cual indica que el proceso es adecuado. El índice Cpk es igual a 1,36, en este caso es mucho más pequeño que Cp; establece que la media del proceso está alejada del centro, pero con poca variabilidad. En este caso, la media del proceso está corrida hacia cerca del límite inferior; la poca humedad de los granos hace que el maíz pierda peso por la falta de contenido de agua, aunque no en medidas alarmantes.

### Análisis de independencia entre la temperatura y la humedad

Con el objetivo de enfocar el estudio y mejorar la capacidad del proceso de almacenamiento del maíz, el cual se ve afectado por valores de la temperatura fuera de los parámetros establecidos, se quiere conocer si los cambios para mejorarla no afectan el comportamiento de la humedad. Para ello se realiza la prueba de independencia Chi-cuadrado de Pearson para los valores de temperatura en el día que se analizó la humedad [20].

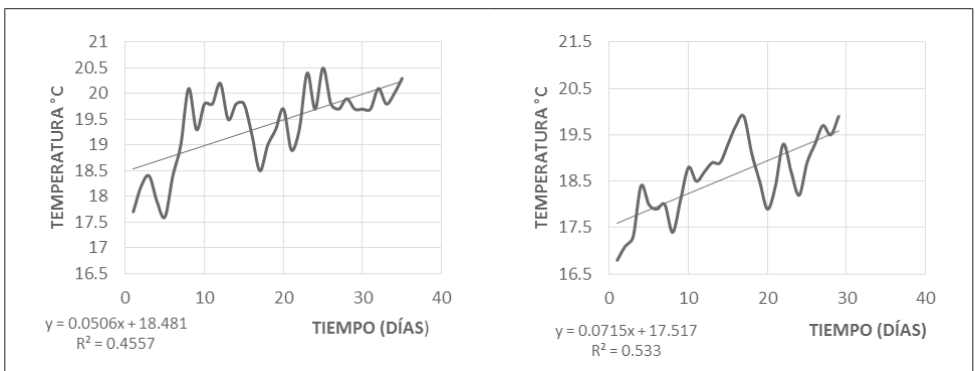
**Tabla 2.** Prueba de Independencia estadística entre temperatura y humedad en el SMR

Prueba	Estadístico	Grados de libertad	Probabilidad
Chi-cuadrado de Pearson	117.000	110	0.3060

La hipótesis nula de esta prueba consiste en que las variables son independientes entre sí. Según los resultados que muestra la tabla, el valor de probabilidad para la prueba de Chi-cuadrado de Pearson es mayor que  $\alpha$ , la cual está fijada en 0,05, lo cual expresa que las variables “temperatura” y “humedad” son independientes, con 95 % de confianza. La conclusión de esta prueba determina que es posible realizar acciones para corregir la temperatura sin temor a afectar la humedad en el proceso de almacenamiento de granos. En el caso de que no se demostrara la independencia estadística, habría que determinar la afectación de modificar la temperatura sobre la humedad y comprobar que esta todavía se encuentra en los límites de las especificaciones.

### Construcción de un modelo de pronóstico de la temperatura en el SMR

Con el objetivo de predecir el comportamiento de la temperatura se grafican los valores de temperatura en función del tiempo [21], [22] cuando no está conectado el carro de frío, como se muestra en la figura 3. Aunque el coeficiente de determinación no es alto para ambos casos, es visible la tendencia de incremento de la temperatura cuando el carro de frío no está conectado al SMR.

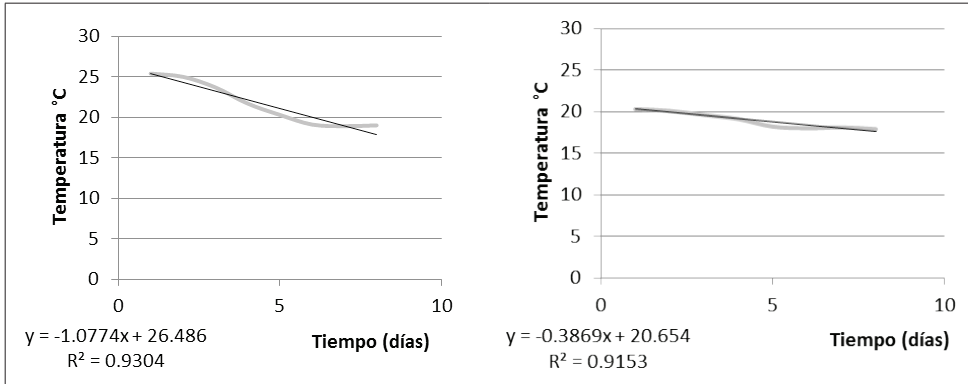


**Figura 3.** Comportamiento de la temperatura cuando no está conectado el carro de frío: a) período 9 de enero - 12 de febrero 2013; b) período 21 de febrero - 20 de marzo de 2013

Cuando el carro de frío está conectado se puede observar que la línea de tendencia para cada período tiene un coeficiente de determinación muy bueno; es decir que el comportamiento de la temperatura cuando está enfriándose el SMR tiene un comportamiento lineal. En la figura 4a) el carro



de frío se conecta al silo 24 horas antes del llenado del arribo del grano, por lo que la temperatura baja más rápidamente que cuando es conectado durante el almacenamiento.



**Figura 4.** Comportamiento de la temperatura cuando está conectado el carro de frío: a) período 1° enero - 8 enero de 2013; b) período 13 de febrero - 20 de febrero de 2013

Para realizar la predicción de los valores de la temperatura cuando entra el primer carro de frío se toma la ecuación de la recta correspondiente a la figura 4a). En el caso de los otros enfriamientos se toma la pendiente de la recta que más se demora en bajar la temperatura, la cual se corresponde con la figura 4b), para pronosticar el peor escenario. Cuando no está conectado el carro de frío se calcula con la pendiente de la recta que más rápido sube la temperatura, la cual corresponde a la figura 3b). Se construyen los modelos de predicción utilizando las expresiones 5 y 10 para ver cuál de los dos es más adecuado para realizar la planeación.

En la tabla 3 se muestran los indicadores de los errores calculados para ambos modelos.

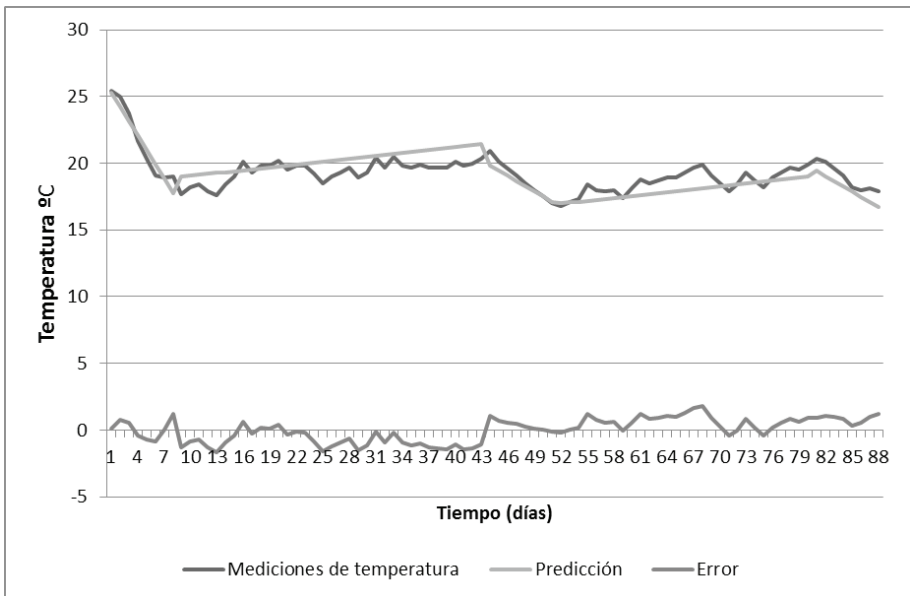
**Tabla 3.** Comparación entre los errores de los modelos de pronóstico para la temperatura en el silo

	MAD	PMAD	Me (BIAS)	TS
Modelo de predicción original	0.737	3.84%	-0.0919	-10.973
Modelo de predicción corregido	0.741	3.86%	-1.453E-15	-1.724E-13

Se puede observar que el MAD y el PMAD tienen un comportamiento similar en ambos modelos; incluso empeoraron un poco en el modelo corregido, a diferencia de la Me y la TS. La señal de rastreo de la predicción original no es buena, ya que el valor -10.973 se encuentra fuera del rango para considerar adecuado el modelo.

Para el segundo modelo, la Me y la TS tomaron valores muy cercanos a 0; por lo que se puede afirmar que el modelo corregido es mucho más confiable, que el planteado en [23], para pronosticar la temperatura en el silo y utilizarlo en la planeación del proceso de enfriamiento.

En la figura 5 se muestran las mediciones reales de temperatura, los valores pronosticados por el modelo seleccionado y el error.



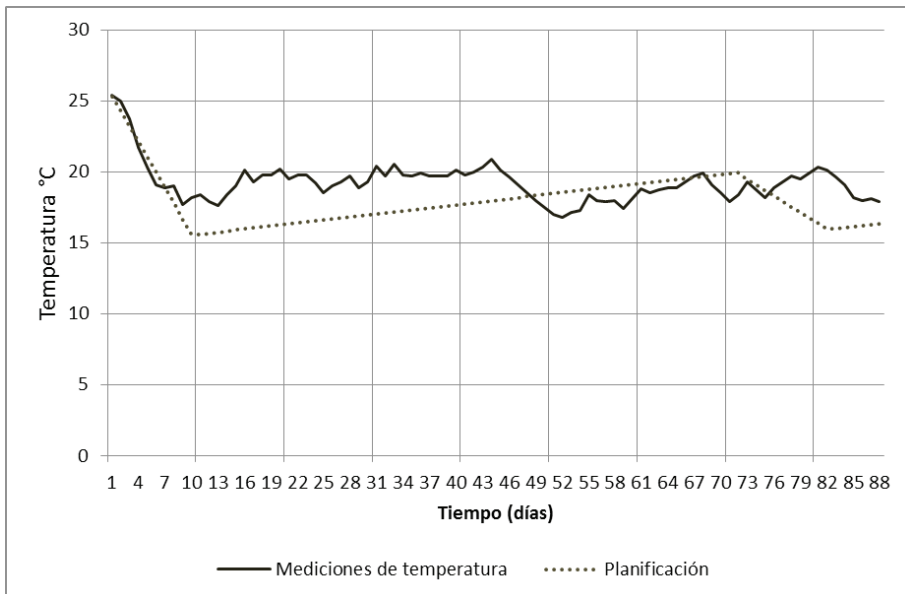
**Figura 5.** Construcción del modelo de pronóstico de la temperatura en la conservación del maíz en el SMR

### Planificación de los carros de frío para la recepción y conservación del maíz

Basados en los resultados obtenidos se puede decir que el método predice bastante bien el comportamiento de la variable que es objeto de estudio, tanto en condiciones normales de operación y cuando se encuentran co-

nectados los carros de frío. Seguidamente se procede a planificar los días que se le debe dar enfriamiento al grano que se encuentra almacenado en el silo y los días de antelación en que se deben pedir los carros de frío. Se comienza el proceso de planeación utilizando la temperatura de la ecuación de la recta de la figura 4a, que es 26,486.

La figura 6 muestra el proceso de planificación contrastado con los valores reales en el período sin la utilización del modelo.



**Figura 6.** Planificación de la conexión de los carros de frío en el SMR

Según el proceder actual de enfriamiento, el carro de frío debe pedirse al proveedor cuando la temperatura del silo se encuentra en 20 °C; el proveedor se demora hasta 5 días en dar respuesta y comenzar el proceso de enfriamiento. Una vez conectado se mantiene durante 8 días, y se desconecta independientemente del valor de la temperatura en el silo.

Como se puede observar en la figura 6, con la planificación de los carros de frío realizada por el modelo se mantiene la temperatura dentro de los parámetros establecidos y por debajo de la mayoría de los valores medidos para un período similar. Solo se tienen los primeros valores fuera de los

límites de especificaciones durante la recepción del grano. El carro de frío se conecta un día antes de la recepción del maíz y se desconecta a los 10 días cuando la temperatura del silo llega a los 15,71 °C. Se conecta nuevamente cuando la temperatura llegue cerca de los 20 °C y se mantiene el enfriamiento hasta que alcance los 15,67 °C.

El principal resultado de este plan reside en que se puede notificar con mucho tiempo de antelación al proveedor de los carros de frío para asegurar su conexión. Si se modifica el procedimiento actual, el proceso de enfriamiento permanece conectado el tiempo necesario, a diferencia del método actual de 8 días fijos. La cantidad de tiempo que debe estar conectado el carro de frío es aproximadamente igual para el período estudiado, lo cual garantizaría una mejor utilización de la tecnología.

Este método puede servir para predecir el comportamiento de la temperatura en el resto de los SMR de la región para realizar una programación del uso de los carros de frío, balancear la carga con la disponibilidad de los mismos y planear las acciones de mantenimiento de esta tecnología de manera que no afecte el enfriamiento en los SMR.

Es importante monitorear las plagas dentro de los SMR, si se logra controlar la temperatura correctamente, para establecer parámetros de clima más apropiados para el almacenamiento del maíz en el caso de que los actuales no resuelvan el problema.

## CONCLUSIONES

En el análisis del comportamiento de las variables climáticas medidas en el almacenamiento del grano se detectaron problemas en la temperatura, al encontrarse el proceso de enfriamiento descentrado con valores por encima del límite superior de especificaciones, por lo que es necesario modificar el actual proceder.

Para la resolución de esta problemática se pronosticó el comportamiento de la temperatura utilizando las líneas de tendencia y se analizaron los errores de dos modelos de pronóstico.

Una vez realizado el estudio se concluyó que el modelo corregido con la media de los errores es el adecuado para predecir la temperatura en el silo

y puede ser utilizado para la realización de la planificación del proceso de enfriamiento.

La utilización de este modelo de pronóstico permite la planificación acertada de la conexión del carro de frío en el SMR para lograr mantener la temperatura dentro de los límites establecidos. También puede contribuir a la programación de acciones de mantenimiento de la tecnología y balancear la disponibilidad de los mismos con las necesidades en los SMR de la región.

## REFERENCIAS

- [1] D. A. Landis, M. M. Gardiner, W. van der Werf, and S. M. Swinton, "Increasing corn for biofuel production reduces biocontrol services in agricultural landscapes", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, pp. 20552-20557, 2008.
- [2] R. L. Paliwal, G. Granados, H. R. Lafitte, A. D. Violic, and J.-P. Marathée, *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción*. FAO, 2001.
- [3] L. Bon Sosa and V. Socorro Rodríguez, *Monitoreo y manejo de las temperaturas en la posición de silo Cuba Libre, Pedro Betancourt para mantener la calidad del grano almacenado*. 2012. Available: <http://monografias.umcc.cu/monos/2012/FUM%20Pedro%20Betancourt/mo1268.pdf>
- [4] S. T. Berry, M. J. Roberts, and W. Schlenker, "Corn Production Shocks in 2012 and Beyond: Implications for Harvest Volatility", in *The Economics of Food Price Volatility*. University of Chicago Press, 2013, pp. 59-81.
- [5] P. L. Pingali, *Meeting world maize needs: technological opportunities and priorities for the public sector*. International Maize and Wheat Improvement Center, 2001.
- [6] J. E. Domínguez Umpiérrez and L. Marrero Artabe, "Catálogo de la entomofauna asociada a almacenes de alimentos en la provincia de Matanzas", *Fitosanidad*, vol. 14, pp. 75-82, 2010.
- [7] R. Acosta, "Selección participativa de germoplasma cubano de maíz (*Zea mays* L.) en el sistema local de Batabanó, La Habana", *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*, vol. 28, pp. 63-70, 2012.
- [8] S. L. Yang, J. Shen, Z. M. Li, B. X. Tan, and K. Zhao, "Temperature and Humidity Measurement System for Grain Storage Based on nRF905", *Advanced Materials Research*, vol. 383, pp. 5012-5016, 2012.
- [9] G. Benítez Riech and V. Cruz González, "CUBA: Un análisis de la actividad económica de la industria alimentaria", *Agroalimentaria*, vol. 7, pp. 27-41, 2002.

- [10] H. Z. L. Chunhua, "Temperature control for grain storage in large warehouse in Guangdong province", *Grain Storage*, vol. 1, p. 004, 2011.
- [11] J. H. C. D. Y. Hui, L. L. R. F. B. Liwei, and J. X. S. Jiamin, "Grain storage by temperature control in large warehouses with dynamic heat insulation structure", *Grain Storage*, vol. 2, p. 006, 2010.
- [12] Y. Lei, "Application and prospect of advanced technology for grain storage", *Grain Storage*, vol. 6, p. 008, 2011.
- [13] A. Dominguez-Pacheco, C. Hernández Aguilar, R. Zepeda Bautista, E. Martínez Ortiz, and A. Cruz-Orea, "Análisis térmico de semilla de maíz con plaga por microscopía fotopiroeléctrica", *Superficies y vacío*, vol. 25, pp. 92-96, 2012.
- [14] Á. E. Ladino Gaibor, "Estudio del manejo postcosecha del maíz tierno (*Zea mays* L.) procedente del cantón San Miguel de la provincia de Bolívar". Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [15] X. Weizhi, "Maize safe storage technology in silos in southern coastal areas", *Grain Storage*, vol. 4, p. 006, 2010.
- [16] E. L. Grant and R. Leavenworth, "Control estadístico de calidad". CECSA, 1999.
- [17] G. C. Canavos and E. G. U. Medal, *Probabilidad y estadística*. McGraw-Hill, 1987.
- [18] H. M. H. X. Z. Wei and C. Jibin, "Field maize storage by using technology of nitrogen filling and oxygen lowering by pressure swing adsorption (PSA)", *Grain Storage*, vol. 2, p. 007, 2011.
- [19] M. R. Chowdhury, "Process Capability Analysis in Pharmaceutical Production", *International Journal of Pharmaceutical and Life Sciences*, vol. 2, pp. 85-89, 2013.
- [20] D. C. Montgomery, G. C. Runger, and N. F. Hubele, *Engineering statistics*. Wiley. com, 2009.
- [21] B. Abraham and J. Ledolter, *Statistical methods for forecasting*, vol. 234. Wiley. com, 2009.
- [22] G. E. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel, *Time series analysis: forecasting and control*. Wiley. com, 2013.
- [23] M. Feitó Cespón, "Planificación del proceso enfriamiento en el almacenamiento de maíz en silos metálicos refrigerados", *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*, vol. 32, pp. 333-345, 2014.