**AGROCENTRO**

**Modelos Físicos-Matemáticos de Difusión de agua en granos**

***Physical-Mathematical models of water Diffusion in grains***

**Williams Morales González1, Jesús E. Hernández Ruiz2, Bárbara S. Martínez Chinea3**

1- Estudiante 4to Año Licenciatura en Física y Alumno Ayudante Laboratorio de Física Molecular y Termodinámica del Dpto. de Física. Facultad de Matemática, Física y Computación. Universidad Central ‘’Marta Abreu’’ de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5½ Santa Clara 54 830. Villa Clara. Cuba. E-mail: wmorales@uclv.cu, wilianmorales@nauta.cu

2- Profesor Titular del Dpto. de Física. Facultad de Matemática, Física y Computación. Universidad Central ‘’Marta Abreu’’ de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km 5½ Santa Clara 54 830. Villa Clara. Cuba.

3- Empresa de Silos (EMSIL). UEB Villa Clara, Cuba.

**Resumen:** En el presente artículo se realiza un estudio teórico de la difusión de humedad en granos almacenados por tiempos prolongados en Silos Metálicos Refrigerados (SMR). Se describen algunos de los modelos físicos-matemáticos reportados en la literatura especializada en el tema. Se presentan y discuten, la formulación y soluciones de los modelos de difusión de humedad en granos de geometría esférica. Finalmente, se presentan las conclusiones y se describen brevemente los estudios que en el futuro serán realizados, para obtener los regímenes adecuados de operación de los sistemas refrigerados que contemple el conocimiento del comportamiento de cada tipo de grano en función del contenido de humedad y de la temperatura.

***Abstract:*** *In this paper the theorical study of moisture diffusion in grains, which remains for long time in Metallic Refrigerate Silos (MRS) is described. Some of the physical-mathematical models reported in the specialized literature in this thematic are described. The formulation and solutions of the moisture diffusion models in spherical geometry grains are presented and discussed. Finally, the conclusions are presented and the studies that will be carried out in the future are briefly described, to obtain the adequate operating regimes of the refrigerated systems that includes knowledge of the behavior of each type of grain according to the moisture content and the temperature.*

**Palabras Clave:** Difusión; Humedad; Granos; Silos Metálicos Refrigerados.

***Keywords:*** *Diffusion; Moisture; Grains; Metallic Refrigerate Silos.*

**1. Introducción**

Los granos son materiales higroscópicos, es decir, poseen la capacidad de absorber y desorber la humedad del medio ambiente donde se encuentran (Muthokumarappan y Gunasekaran, 2008). Los granos situados en ambientes con niveles de humedad superiores a la que ellos mismos contienen, inicialmente se recubren de agua, la que posteriormente se difunde en su estructura (Hsu, 1984). Esto adquiere una connotación especial en las condiciones de climas tropicales y húmedos como el cubano pues, la exposición de los granos durante la cosecha, secado, transportación y almacenamiento en estas atmósferas altamente humectantes influye de forma negativa en su calidad, degradando sus propiedades generales y muy particularmente las nutritivas, mecánicas, físico – químicas y, en el caso de las semillas, su capacidad de germinación (Chung y Converse, 1971; Seifi y Alimardani, 2010).

Los altos contenidos de humedad junto a favorables condiciones de temperaturas favorecen el desarrollo de bacterias, hongos e insectos (Navarro et al., 2002). A esto hay que añadir que los granos son entes vivos, y su actividad metabólica, junto a la de los insectos y hongos, genera calor, agua y CO2, (Reuss et al., 1994; Paucar Nemacho, 2017) lo cual agrava esta situación.

El valor económico, alimenticio, agrícola e industrial de los granos y semillas dependen de su calidad; y ésta, como se ha descrito antes está asociada con el nivel de humedad y la temperatura de los granos. Por ello, el cuidado y control que se requiere sobre estas variables en las diferentes etapas que involucran el manejo y acarreo de los granos. Generalmente los granos se cosechan con altos contenido de humedad y para almacenarlos de manera segura, sin que se desarrollen hogos o experimenten descomposición, se requiere secarlos, llevándolos hasta un contenido de humedad adecuado (Sadaka y Bautista, 2014). Sin embargo, por tratarse de la etapa más prolongada, es durante el almacenamiento el momento en que se deben extremar las medidas de control del nivel de humedad y temperatura de los granos. En este contexto, Converse et al. (1971) y Khankari et al. (1994) explican que son el contenido de humedad y la temperatura los factores críticos en el mantenimiento de la calidad de los granos durante su almacenamiento.

La durabilidad de los granos está básicamente determinada por su capacidad para resistir la penetración de la humedad y otros agentes agresivos. La durabilidad es, por tanto, críticamente determinada por la velocidad con la cual la humedad se infiltra y se mueve a través de la estructura del grano. En este sentido, Muthokumarappan y Gunasekaran (2008) describen cómo la absorción y desorción de humedad por las granos puede conducir al desarrollo de tensiones internas, y agregan que tanto las tensiones internas como externas son la causa de las fisuras del núcleo de los granos. Asimismo, Pérez et al. (2014) explican que la humectación del grano produce grietas y fisuras, lo cual aumenta la tasa de difusión de humedad. Luego, la penetración de humedad en diversos tipos de granos puede proveer un mecanismo y camino para la penetración de mayor cantidad de agua y al mismo tiempo de agentes agresivos y dañinos a los granos.

Al mismo tiempo, como se explicó antes, la humectación de los granos está estrechamente relacionada con la temperatura. En relación con este particular, destacan los trabajos de Pixton y Warburton (1971), quienes estudiaron la relación funcional de la razón del contenido de humedad/ humedad relativa vs. la temperatura en diferentes tipos de granos, tales como trigo, maíz y frijoles; y ofrecieron los nomogramas correspondientes, de Vertucci et al. (1994) que postulan y verifican la hipótesis de que el contenido óptimo de humedad en granos de chicharos o guisantes se puede incrementar sin causar daños a los granos cuando disminuye la temperatura de almacenamiento, de Seyda et al. (2000) quienes investigaron el efecto del tiempo de almacenamiento, el contenido de humedad y la temperatura de almacenamiento sobre la viabilidad de semillas de soya, y demostraron que la interacción entre estos tres factores es estadísticamente significativa y finalmente de Sawant et al. (2012) que investigaron el efecto conjugado de la temperatura, la humedad relativa y el contenido de humedad sobre el índice de germinación de semillas de trigo almacenadas en diferentes tipos de silos.

Por otra parte, el problema del transporte de humedad en granos ha recibido gran atención en el pasado (Pixton and Griffiths, 1971; Thorpe, 1981; Thorpe, 1982; Deshpande et al., 1994) y lo recibe aun en el presente (Montanuci et al. 2013; Pérez et al., 2014). En este sentido, la literatura especializada reporta ampliamente el estudio de la hidratación y de la difusión de humedad en diferentes tipos de granos, y modela, analítica y numéricamente este proceso, empleando mayoritariamente modelos Fickianos de difusión, generalmente en las estructuras esféricas y cilíndricas de diferentes tipos de granos (Hsu, 1984; Lu and Siebenmorgen, 1992; Casada, 2002). También se reporta el estudio del transporte global de la humedad en silos y otras estructuras de almacenamiento de granos (Smith y Sokhansanj, 1990; Thorpe et al., 1991; Thorpe et al., 1991A; Jian et al., 2009).

A pesar de que en los últimos tiempos se han desarrollado y aplicado diferentes técnicas que permiten medir de manera rápida y con incertidumbres adecuadas el contenido de humedad de los granos, así como seguir la evolución de la humectación de los granos y el registro de los datos experimentales para el ajuste de los diferentes modelos de difusión de humedad, entre ellas la medición del contenido de humedad a través de métodos eléctricos, que se fundamentan en la correlación entre las propiedades dieléctricas de los granos y el contenido de humedad de éstos (Nelson, 1981), la medición de la humedad empleando técnicas de microondas y ondas de alta frecuencia (Nelson y Kraszewski, 1990; Nelson et al. 1998; Nelson et al., 2001), a partir de la alta correlación que existe, a una determinada frecuencia, entre el contenido de humedad de los granos y sus propiedades dieléctricas, métodos espectroscópicos con empleo de resonancia magnética nuclear (Stapley et al., 1998) y medición del contenido de humedad de los granos usando sensores integrados para medición de la humedad relativa y la temperatura (Uddin et al., 2005) entre otras técnicas de las más novedosas y sofisticadas; continúa siendo el ensayo clásico de humectación, con el empleo de técnicas gravimétricas, el más usado pues, a pesar de resultar tedioso, el equipamiento requerido para su realización es relativamente barato, de simple operación y la información que se puede obtener sobre todo el proceso de humectación de los granos es altamente confiable, la que además, con el empleo de modelos clásicos de difusión permite estimar con alta precisión y exactitud los parámetros cinéticos y termodinámicos del proceso, todos éstos de gran valor en el estudio del comportamiento de la humectación de los granos y su dependencia con la temperatura.

Al mismo tiempo, la solución o atenuación de los problemas que se presentan durante el almacenamiento de los granos por efectos combinados de la humead y la temperatura, puede efectuarse modificando la atmósfera interior del lugar donde se almacenan. Esto puede lograrse de varias formas: a) Mediante la disminución del contenido de oxígeno y el enriquecimiento de la atmósfera de conservación de los granos con nitrógeno usando para ello sistemas PSA (*Pressuring System Adsorption*) con el fin de restringir la disponibilidad del oxígeno del aire y así poder disminuir los procesos de respiración de los hongos e insectos, b) Disminuyendo el contenido de humedad de la atmósfera de conservación con el empleo dehumificadores o sustancias absorbentes reciclables, tales como zeolitas naturales o sintéticas, carbón activado, silica-geles y otras, c) Disminuyendo la temperatura de los granos almacenados por medio de la refrigeración y d) Mediante la combinación de dos o más de estos procederes entre otros métodos. De todos estos procederes, el más extendido es la que se basa en el empleo de la refrigeración.

En Cuba en la últimas décadas se han realizado ingentes esfuerzos para la adquisición, instalación y operación de Silos Metálicos Refrigerados (SMR) para el almacenamiento y conservación de granos tales como chicharos, maíz y frijoles entre otros. Sin embargo, la refrigeración requiere al mismo tiempo de un riguroso control de la humedad y lo que es más importante, del conocimiento de la dependencia temperatura vs. humedad para cada tipo de grano almacenado, pues de lo contrario se pueden ocasionar gastos excesivos de energía por concepto de sobre enfriamiento, o lo que es más peligroso aun, buscando ahorros de energía, no lograr los niveles adecuados de temperatura en función del contenido de humedad para cada tipo de grano, y producirse el consecuente deterioro de la propiedades de los granos almacenados. De aquí la necesidad de establecer regímenes adecuados de operación de los sistemas refrigerados que contemplen el conocimiento del comportamiento de la temperatura en función del contenido de humedad para cada tipo de grano.

De este modo, el presente trabajo tiene el propósito de presentar el marco teórico asociado a los modelos físicos-matemáticos, reportados en la bibliografía especializada, que permitan describir la cinética del transporte de humedad en los granos que se almacenan durante tiempos prolongados con el fin de determinar los tiempos óptimos de almacenamiento de diferentes tipos de granos y los regímenes adecuados de operación de los SMR, con consumos mínimos de energía y niveles adecuados de temperatura en función del contenido de humedad, para evitar la aparición de gérmenes y consecuentemente garantizar que no se degraden las propiedades de los granos almacenados más allá de los límites permisibles.

**2. Metodología**

Como resultado del estudio de la literatura especializada en el tema de Difusión de agua en granos, se seleccionaron modelos físicos-matemáticos, aplicables a un ensayo general de humectación y de remojo.

1. **Modelos físicos matemáticos para la Difusión de Humedad en granos**

La teoría matemática de la difusión, primero enunciada por Fick (1855), es considerada en detalles por Crank (1956) y otros (Pixton, S. W. and Griffiths, H. J. ,1971).

La teoría de la difusión en un medio isotrópico es basada en la hipótesis de que el ritmo de transferencia de la sustancia difusida por unidad de área de la sección es proporcional al gradiente de concentración medido normal a la sección, i.e.

Donde es el ritmo de transferencia por unidad de área de la sección, es la concentración, y la coordenada espacial normal a la sección. , es la constante de proporcionalidad, definida como el coeficiente de difusión, El signo negativo en la ecuación se debe a que la difusión ocurre en la dirección del decrecimiento de la concentración (Pixton and Griffiths, 1971)

La ecuación diferencial de la difusión, con constante coeficiente de difusión en un medio isotrópico, es derivada de la ecuación (I) y se reduce a:

Las ecuaciones (I) y (II) son la 1ra y 2da Ley de Fick de la difusión, respectivamente.

La ecuación para la difusión en coordenadas esféricas propuesta por Crank (1975) es:

Dónde es la concentración de humedad, es el tiempo,es la distancia radial,y es el coeficiente de difusión, Si el coeficiente de difusión es constante, entonces la ecuación (1) se puede simplificar de la forma:

La absorción y el equilibrio de humedad dependen en el mismo mecanismo de difusión por el movimiento de agua, la ecuación (2) debería ser descriptiva durante estos dos periodos. Las condiciones de frontera para estos dos periodos, sin embargo, son diferentes. Asumiendo que la humedad inicial de los granos es uniformemente distribuida y la concentración de humedad al centro del grano es finita, las condiciones iniciales y de frontera para el periodo de absorción quedan expresadas de la siguiente manera (Hsu, 1984):

Donde es la concentración de humedad inicial, es la concentración de saturación, y es el radio del grano,

Durante el periodo de equilibrio, los alrededores inmediatos al grano están esperando a estar cerca de la saturación, y un pequeño movimiento de humedad es de esperar entre el grano y sus alrededores. Bajo las circunstancias, la superficie del grano está asumida impermeable tal que el movimiento de humedad es restringido dentro del grano solamente. La inicial distribución de concentración será la misma como que al final del periodo de absorción. Así, las condiciones iniciales y de frontera para el periodo de equilibrio son (Hsu, 1984):

Donde es el perfil de humedad al final del periodo de absorción.

La solución de la ecuación (2), sujeta a las condiciones de frontera presentadas en (3), fue presentada por Crank (1975):

Donde es el tiempo de absorción , la ecuación (5) es válida para todo excepto para . Tendiendo al límite cuando , la ecuación (5) se convierte en:

Integrando la ecuación (5) en todo el volumen del grano esférico se obtiene (Crank, 1975):

Donde es la fracción del total de agua absorbible, absorbida después del tiempo, (Hsu, 1984).

La solución general de la ecuación (2), sujeta a las condiciones de frontera presentadas en (4) para el periodo de equilibrio, también fue presentada por Crank (1975):

Donde son las raíces positivas de

Ya que la ecuación (5) es el perfil de humedad del grano del fin de un periodo de absorción, esta debería ser también el perfil de la etapa inicial del periodo de equilibrio. Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (8) tenemos (Hsu, 1984):

Donde es el tiempo de equilibrio *.* Esta ecuación permite un enlace entre los dos periodos. Por la integración de la ecuación (10), la solución específica para el periodo de equilibrio es obtenida:

De nuevo, pasando al límite cuando , la ecuación (11) se convierte en:

Las ecuaciones (11) y (12) son las únicas en que la distribución de humedad durante el periodo de equilibrio es descrita como una función no solo del tiempo de equilibrio, y la posición radial, también del tiempo transcurrido durante la absorción, Estas expresiones significan el efecto de la absorción en equilibrio (Hsu, 1984).

Para tiempos largos, la ecuación (7) puede ser ajustada para el cálculo del coeficiente de difusión (Agudelo, 2009):

El coeficiente de difusión puede ser calculado de la pendiente del lado izquierdo de la ecuación anterior versus el tiempo (Agudelo, 2009):

Generalmente la dependencia de la difusividad de la temperatura se describe por el modelo de Arrhenius de la forma (Sopade, 1990):

Donde es una constante; es la energía de activación, es la constante universal de los gases igual a , y es la temperatura,

El modelo de Peleg (1988) es una propuesta matemática simple, que además de su fácil manejo, ha sido validado en el modelamiento de fenómenos de absorción de agua para una gran cantidad de materiales, en general granos (Agudelo, 2009).

Según (Peleg, 1988) tenemos:

Dónde , contenido de humedad en el tiempo *t.* ; es contenido de humedad inicial. , constante de Peleg. , constante de capacidad de Peleg. (No depende de la temperatura)., tiempo de rehidratación. ; ,

Si hacemos un ajuste lineal de la ecuación (15) tenemos:

El Ritmo de absorción es:

Contenido de humedad en equilibrio :

Según (Sopade, 1992) tenemos la relación de Arrhenius:

Dónde , es la energía de activación, constante universal de los gases. , temperatura. , constante de Arrhenius referente a T.

Energías de activación bajas se traduce en una mayor facilidad para que el agua ingrese dentro del material (Agudelo, 2009).

Si hacemos un ajuste lineal de la ecuación (18) tenemos:

Según (Montanuci, 2013) tenemos las propiedades termodinámicas:

Dónde , es la Entalpía*.* , Entropía. , Energía libre de Gibbs. , constante de Boltzman., constante de Planck..

**3. Resultados y discusión**

Se emplea el ensayo general de humectación, el que comprende dos ensayos parciales. En el primero de ellos, se determina experimentalmente la calidad de los diferentes tipos de granos en función del incremento porcentual en masa húmeda con el tiempo de exposición de éstos, a una intemperie altamente humectante artificialmente creada para este fin. La data que se obtiene permite encontrar por técnicas de ajuste no lineal la ley empírica que correlaciona la calidad del grano, determinada a partir de las propiedades nutritivas, mecánicas o físico-química de los granos, con su incremento en masa húmeda. En el segundo ensayo, se determinan experimentalmente el incremento en masa húmeda de los diferentes tipos de granos en función del tiempo de exposición de éstos, en atmósferas con humedades relativas y temperaturas típicas del clima tropical húmedo, hasta alcanzar el equilibrio y empleando técnicas de ajuste lineal y no lineal, se ajusta la data experimental según los modelos matemáticos propuestos, de acuerdo con la geometría del grano, en general esférica, para estimar los coeficientes efectivos de difusión de la humedad en los diferentes tipos de granos para las diferentes humedades relativas y temperatura prefijadas, además de la energía de activación y otras propiedades termodinámicas como entalpía, entropía y energía libre de Gibbs.

Empleando los resultados de ambos ensayos de humectación y las expresiones de cálculo de los tiempos óptimos de almacenamiento, obtenidas como resultado de modelar el proceso de difusión de humedad y absorción de agua en los diferentes tipos de granos, se calculan los tiempos óptimos de almacenamiento de los diferentes tipos de granos a una temperatura y humedad dada.

**4. Conclusiones**

El contenido de humedad y la temperatura son los factores críticos que determinan la conservación de los granos almacenados. El adecuado control y manejo de estas variables en granos almacenados por tiempos prolongados permite mitigar sus efectos negativos sobre la durabilidad de los granos, la cual está críticamente determinada por la velocidad con la cual la humedad se infiltra y se mueve a través de la estructura del grano.

La técnica más empleada en la conservación de los granos es la refrigeración. La refrigeración de los granos almacenados en silos debe ser complementada con el control riguroso de la humedad y la temperatura, así como del conocimiento de la dependencia temperatura vs. humedad para cada tipo de grano almacenado. En la revisión realizada no se encontraron reportes de estudios sobre este particular en las condiciones propias del clima tropical y húmedo cubano.

El transporte de humedad en los granos almacenados puede ser descrito satisfactoriamente empleando la teoría clásica de la difusión. Los modelos más empleados se basan en las leyes de Fick de la difusión y postulan que la absorción de humedad trascurre con coeficiente de difusión constante.

La técnica experimental más usada en los estudios de humectación de los granos es la gravimétrica. Esta técnica consiste en determinar los incrementos (decrementos) en masa húmeda de los granos en el tiempo, no requiere de recursos costosos para su implementación y el procedimiento para el ulterior procesamiento de los datos es sencillo.

**5. Referencias bibliográficas**

1. Agudelo, O. J. (2009) Law enforcement Fick and Peleg model for study of water uptake in navel cargamanto yellow (phaseolus vulgaris l.) and peas seca (pisan sativa) during rehydration. Revista Publicaciones e Investigación Vol. 3, No. 1.
2. Casada, M.E. (2002) Moisture adsorption characteristics of wheat and barley. Transactions of the ASAE Vol. 45, No. 2, 361-368.
3. Chung, D. S. and Converse, H. H (1971) Effect of Moisture Content on Some Physical Properties of Grains. Transactions of the ASAE, 612-620.
4. Crank, J. (1975) The mathematics of diffusion. 2a ed. New York: Oxford University Press.
5. Deshpande, S. D., Bal S. and Ojha, T. P. (1994) A Study on Diffusion of Water by the Soybean Grain During Cold Water Soaking. Journal of Food Engineering Vol. 23, 121 – 127.
6. Febles, A. D. (2016) Evaluación del proceso de conservación de maíz en los silos metálicos refrigerado (SMR) de la posición Cuba Libre. Trabajo de Diploma. Departamento de Química e Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas Sede “Camilo Cienfuegos”.
7. Feitó, M. C. (2014) PLANIFICACIÓN DEL PROCESO ENFRIAMIENTO EN EL ALMACENAMIENTO DE MAÍZ EN SILOS METÁLICOS REFRIGERADOS. B. CEPPA, Curitiba, Vol. 32, No. 2, 333-345
8. G. Xanthopoulos and J.L. Woods (2003) A two-dimensional Model of Grain Storage with Dynamic Visualisation: Predictions for Temperature, Moisture Content, Germination and Respiration - a case study for rapeseed. Agro Thesis Vol. 1, No. 1, 19-27
9. Hsu, K. H. (1984) A theoretical approach to the tempering of grains. Cereal Chem. Vol. 61, No. 5, 466-470.
10. Jian, F., Jayas, D.S. and White, N.D.G. (2009) Temperature fluctuations and moisture migration in wheat stored for 15 months in a metal silo in Canada. Journal of Stored Products Research Vol. 45, 82–90.
11. Khankari, K. K., Morey, R. V. and Patankar, S. V. (1994) Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due temperature gradients. Transactions of the ASAE VOL. 37, No. 5, 1591-1604.
12. Lu, R. and Siebenmorgen, T. J. (1992) Moisture diffusivity of long-grain rice components. Transactions of the ASAE Vol. 35, No. 6, 1955-1961.
13. Martínez López, E. Importancia de la metrología en la determinación del contenido de humedad en granos, Centro Nacional de Metrología (CENAM) de México (Presentación, IV Encuentro Nacional de Metrología Eléctrica, 2012) (consultada en febrero de 2017).
14. Montanuci, F.D., Matos Jorge, L. M. and Matos Jorge R.M. (2013) Kinetic, thermodynamic properties, and optimization of barley hydration. Food Science and Technology Vol. 33, No. 4, 690-698.
15. Muthokumarappan, K. and Gunasekaran, S. (2008) Chapter 3: Modeling moisture diffusion in food grains during adsorption. En: Food processing operations modeling. Design and analysis. Eds.: S. Jun y J.M. Irudayaraj, CRC Press Taylor & Francis Group. © 2009.
16. Navarro, S., Noyes, R., Armitage, D. and Maier, D. (2002) Objectives of aeration. En: The Mechanics and Physic of Modern Grain Aeration Management, eds. S. Navarro y R. Noyes. New York: CRC Press.
17. Nelson, S. O. (1981) Review of factors influencing the dielectric properties of cereals grains. Cereal Chem. Vol. 58, No. 6, 487-492.
18. Nelson, S. O., and A. W. Kraszewski. (1990) Grain moisture content determination by microwave measurements. Transactions of the ASAE Vol. 33, No. 4, 1303-1307.
19. Nelson, S. O., Trabelsi, S. and Kraszewski A. W. (1998) Advances in sensing grain moisture content by microwave. Transactions of the ASAE Vol. 41, No.2, 483-487.
20. Nelson, S. O., Trabelsi, S. and Kraszewski, A. W. (2001) RF Sensing of Grain and Seed Moisture Content. IEEE Sensors J. Vol. 1, No. 2, 119-126.
21. Paucar Nemacho, L. M. Respiración y patología de los granos y semillas (Presentación) Universidad Nacional del Santa, Perú. Disponible en: http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/001\_4ta\_clase\_granos\_ysemillas.pdf (consultada en febrero de 2017).
22. Peleg, Micha. (1988) An empirical model for the description of moisture sorption curves, Journal of Food Science Vol. 53, 1216-1219.
23. Pérez, J. et al. (2014) Numerical Modeling of Heterogeneous Moisture Diffusion in Milled Rice Grains: Diffusion Coefficient as a Function of Moisture, Temperature and Time. Food Science and Technology Research Vol. 20, No. 1, 59-64.
24. Pixton, S. W. and Griffiths, H. J. (1971) Diffusion of Moisture through Grain. J. Stored Prod. Res. Vol. 7, 133-152.
25. Reuss, R., Danicevski, K. and Annist, P.C. (1994) The impact of temperature, moisture content, grain quality and their interactions changes in storage vessel atmospheres. Proceedings of the 6th International Conference of Stored Product Protection, Vol. I, 178-182. Publisher CAB International, Wallingford, Oxin, UK.
26. Sadaka, S. and Bautista, R. (2014) Grain Drying Tools: Equilibrium Moisture Content Tables and Psychrometric Charts. Publicado por: Division of Agriculture and Extension. University of Arkansas System. Disponible en: https://www.uaex.edu/publications/pdf/FSA-1074.pdf (consultada en febrero de 2017).
27. Sawant, A. A., Patil, S. C., Kalse, S. B. and Thakor, N. J. (2012) Effect of temperature, relative humidity and moisture content on germination percentage of wheat stored in different storage structures. Agric Eng Int: CIGR Journal Vol. 14, No. 2, 1-14.
28. Seifi, R.F. and Alimardani, R. (2010) The Moisture Content Effect on Some Physical and Mechanical Properties of Corn (Sc 704). Journal of Agricultural Science Vol. 2, No. 4, 125-134.
29. Seyda, N., Mohmand, A. S. and Roidar Khan, B. (2000) The effect of storage temperature storage period and seed moisture content on seed viability to soybean. Pakistan Journal of Biological Sciences Vol. 3, No. 12.
30. Smith, E. A. and Sokhansanj, S. (1990) Moisture Transport Caused by Natural Convection in Grain Stores. J. Agric. Eng. Res. Vol. 47, 23-34.
31. Sopade, P. A., Ajisegiri, E. S. and Badau, M. H. (1992) The use of Peleg’s Equation to model water absorption in some cereal grains during soaking. Journal of Food Engineering Vol. 15, No. 4, 269-283.
32. Sopade, P. A. and Obekpa, J. A. (1990) Modelling water absorption in soybean, cowpea and peanuts at three temperatures using Peleg’s equation. Journal of Food Science Vol. 55, No. 4, 1084-1087.
33. Stapley, A. G. F. Fryer, P. J. and Gladden, L. F. (1998) Diffusion and Reaction in Whole Wheat Grains during Boiling. AIChE Journal Vol. 44, No. 8, 1777-1789.
34. Thorpe, G. R. (1981) Moisture diffusion through bulk grain. J. Stored Prod. Res. Vol. 17, 39-42.
35. Thorpe, G. R. (1982) Moisture diffusion through bulk grain subjected to a temperature gradient. J. Stored Prod. Res. Vol. 18, 9-12.
36. Thorpe, G.R., Tapia, J.A.O. and Whitaker, S. (1991) The diffusion of moisture in food grains. I. The development of a mass transport equation. Journal of Stored Products Research Vol. 27, No. 1, 1–9.
37. Thorpe, G.R., Tapia, J.A.O. and Whitaker, S. (1991) The diffusion of moisture in food grains. II. Estimation of the effective diffusivity. Journal of Stored Products Research Vol. 27, No. 1, 11–30.
38. Uddin, M. S., Armstrong, P. R. and Zhang, N. (2005) Accuracy of grain moisture content prediction using temperature and relative humidity sensors. Applied Engineering in Agriculture Vol. 22, No. 2, 267-273.
39. Vertucci, C. W., Ross, E. E. and Crane, J. (1994) Theoretical protocols for seed storage III. Optimum moisture contents for pea seeds stored at different temperatures. Annals of Botany Vol. 74, 531-540.