

Análisis del proceso de deshidratación del maíz (Zea Mays) en un secador de lecho fluidizado

Analysis of the corn dehydration process (Zea Mays) in a fluidized bed dryer

Alfredo Fernandez¹, <https://orcid.org/0000-0001-6083-9666>

¹Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, alfredustrial@hotmail.com, Abancay, Perú

Resumen - El presente trabajo se desarrolló en el Departamento de Apurímac, Provincia de Abancay, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Profesional Académica de Ingeniería Agroindustrial. El objetivo principal de la investigación fue determinar qué elementos mecánicos influyen en el tiempo de secado. El problema en los secadores radica en el consumo de energía; por lo tanto, se incorporan ventiladores que impulsan el aire para reducir el tiempo de secado y, si bien aumentan la turbulencia del aire, también incrementan el consumo de energía eléctrica. La investigación se desarrolló para optimizar el tiempo de secado en un secador de lecho fluidizado JARCON, modelo SLFT-60-240X. El método utilizado para la determinación de la humedad fue el AOAC (2005) y el diseño aplicado fue el de bloques completamente aleatorizados (22x3) para evaluar las variables de respuesta, manipulando dos factores: el ventilador y el extractor. Las conclusiones más importantes fueron que el tiempo de secado más corto se obtuvo con el equipo auxiliar del ventilador y extractor alcanzando una temperatura de 36,9 °C con un tiempo promedio de 14,7 horas, con la ecuación exponencial con un coeficiente de correlación R2 de 0,9488 y en segundo lugar es cuando el ventilador funciona a una temperatura de 35,11 °C con un tiempo de 16,8 horas con R2 de 0,9388.

Palabras clave: lecho fluidizado, elementos mecánicos, maíz, deshidratación.

Abstract - The present work was developed in the Department of Apurímac, Province of Abancay, in the Unitary Operations Laboratory of the professional Academic School of Agroindustrial Engineering. The main objective of the research was to determine which mechanical elements influence the drying time. The problem in the dryers is the consumption of energy therefore the fans that drive the air are incorporated to reduce drying time and also increases the turbulence of the air but the expenditure of the electric power is higher, the research was developed to optimize the drying time in a fluidized bed dryer, JARCON, Model SLFT-60-240X, the method used for the determination of humidity is AOAC (2005) and the design applied was the complete random block (22*3) to evaluate the variables of answers, manipulating two factors such as the fan and extractor. The most important conclusions were, the shortest drying time resulted with the auxiliary equipment of the fan and extractor reaching a temperature of 36.9 oC with an average time of 14.7 hours, with the equation exponentially with a correlation coefficient of R2 of 0.9488 and secondly is when the fan operates at a temperature of 35.11 oC with a time of 16.8 hours with R2 of .9388.

Keywords: fluidized bed, mechanical elements, corn, dehydration.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*) es una especie de gramínea anual originaria de América e introducida en Europa en el siglo XVII. Actualmente, es el cereal con el mayor volumen de producción a nivel mundial, superando al trigo y al arroz, se cosecha con un contenido de humedad mayor a la de recepción. Es el grano que más se procesa en el país y en todos los países productores de grano. En el secado el fisurado son las microrajaduras que se producen en el endospermo harinoso, pero que no llegan al pericarpio, por lo que el grano permanece entero, con el posterior movimiento el grano se termina partiendo las cascarras, que no es bueno para la comercialización, la temperatura máxima

que puede alcanzar el grano, durante el proceso de secado es 70 °C, e indica que la humedad promedia de maíz blanco es de 13,5% [1].

Los granos de la mazorca o semilla es un fruto independiente llamado cariópside que está insertado en el raquis cilíndrico; la cantidad de grano producido por mazorca está limitada por el número de granos por hilera y de hileras por mazorca, si bien el maíz es un alimento muy rico en nutrientes, al punto que era considerado el alimento vegetal principal y su composición química del grano de maíz se ve afectada por el genotipo, medioambiente y condiciones de siembra. En promedio, el contenido de proteína es del 10% y más del 60% son prolaminas (zeínas). Presentan muy bajo contenido de aminoácidos

esenciales, como lisina, triptofano e isoleucina, lo que provoca que el valor biológico de la proteína sea bajo y de pobre calidad nutricional [2].

El grano está formado por cuatro partes principales (Figura 1): pericarpo, endospermo, **germen** y pedicelo. El pericarpo es una capa de células fibrosas (5% del peso del grano). El endospermo (segundo tejido de reserva) representa poco más del 80% del peso del grano y tiene un alto contenido de almidón. El germen (aproximadamente un 11% del peso del grano), con alto contenido en lípidos y proteínas, es considerado el primer tejido de reserva puesto que contiene una gran cantidad de nutrientes utilizados durante la germinación donde se origina el tallo (plúmula) y las raíces (radícula). El pedicelo o capa terminal, es la continuación del pericarpo y permite la unión de grano en la mazorca [2].

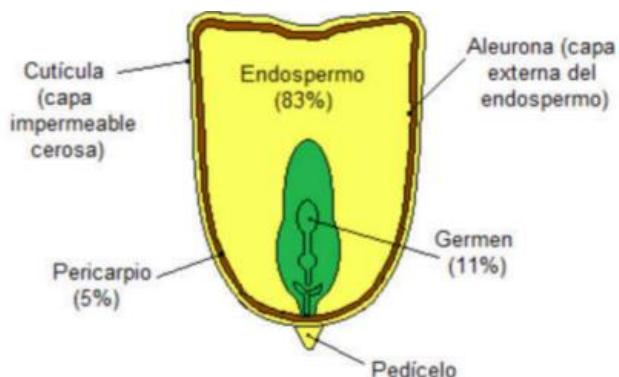


Figura 1: Partes estructurales de grano de maíz [2].

El secado se define como la eliminación de la humedad de un producto, y en la mayoría de las situaciones prácticas durante el secado es la transferencia de masa interna. El principal objetivo de la deshidratación de alimentos es alargar la vida comercial del producto final. Por esta razón, el contenido de humedad se reduce a niveles a fin de limitar el crecimiento microbiano y para retrasar el deterioro reacciones químicas. El aire caliente se utiliza en la mayoría de los procesos de secado, y este tipo de operación tiene ha utilizado desde tiempos históricos [3].

El costo del transporte depende en el contenido de humedad del producto, y el costo de secado. Un exceso de sequedad es un desperdicio; no sólo es más calor, que es decir, gasto, complicado que es necesario, pero a menudo el secado excesivo da como resultado un producto degradado, hay que prestar atención a los métodos involucrados en el ahorro de energía en las secadoras [4].

De otra parte, el secado artificial produce la principal transformación del grano en la postcosecha y a su vez es el procedimiento que requiere para no afectar la calidad, ya que, de la energía utilizada en el proceso de producción de granos, el secado consume alrededor del 50 %, y tomando en cuenta factores de calidad y consumo energético, se puede apreciar la importancia que adquiere su correcta utilización. Secado significa la remoción de cantidades de agua de determinado material, la cual se elimina en una mezcla de aire-vapor de agua. Los métodos de eliminación de humedad varían desde medios mecánicos, utilizando prensas, máquinas centrífugas, hasta el secado por medios térmicos con aire caliente por tipo natural o forzado [5].

El secado de los granos tiene por objeto reducir el nivel de humedad, por debajo de un nivel de seguridad, lo cual contribuye a garantizar su conservación, al impedir su germinación como el crecimiento microbiano. El nivel de seguridad para el almacenamiento de cereales es del 13 al 15% de humedad, para períodos de almacenamiento de hasta un año, y del 11 al 13% para períodos de más de un año, aunque depende del tipo de cereal, en cuanto las condiciones ambientales cambian el equilibrio se rompe, y el grano puede volver a ganar humedad. En principio se asume que, una vez secado hasta los niveles de humedad el grano de cereal no absorbe agua nuevamente o lo hace en cantidades mínimas.

[6]. Realizó el estudio de "La comparación de maíz secado en secador de lecho fluido y convectiva bandeja secadora" en este estudio, las características de secado de maíz se investigaron experimentalmente en un secador de lecho fluidizado y un secador de bandeja de convección. El maíz contenía una humedad inicial de 25% base seca, los experimentos se llevaron en tres diferentes temperaturas: 55, 65, 75 oC. En cada experimento se insertó una capa de maíz en el secador y después de secado se realizó durante 90 min. Las velocidades del aire de secado fueron de 0,45 m/s para secador de bandeja y 2,5 m/s para el secador de lecho fluidizado. Resultando las velocidades de secado de maíz en lecho fluidizado son más alto que bandeja de convección.

Así mismo [7]. Realizó el estudio de "Modelado del secado de granos en lecho fijo a bajas temperaturas de aire", estudió el proceso de secado de maíz a bajas temperaturas que es un método más ecológico y que conduzca a granos

de mayor calidad y valor. Se consideraron para la modelización: equilibrio térmico y másico y no equilibrio; se incluyó la acumulación y sin acumulación de aire. Las comparaciones entre modelos se basaron en la respuesta característica del sistema y en la influencia de las condiciones atmosféricas, consumo de energía y pérdida de materia seca. Se concluye que el modelo no estacionario de no equilibrio representa mejor el proceso. El uso de ventilador precalienta y baja la humedad relativa del aire, conduciendo a menores tiempos de secado y reducciones en el consumo de energía.[8]. Realizó el estudio de "Rediseño de secador de granos Senescyt TT-08-00001", el objetivo fue rediseñar el secador de granos, optimizando los procesos de construcción y costos mejorando las condiciones de operación del secado de maíz, con una capacidad de producción de 22,7 toneladas de maíz por tanda de secado, es descargado manualmente o con tornillo sin fin y utiliza un ventilador radial con un caudal de aire de 47 218 m³/h, y presión de 89 mm c.a. y el ducto rectangular de lámina de acero para el transporte de aire caliente, quemador que usa GLP bien aislado con ladrillo y la plancha metálica con 4 boquillas para la salida de la llama produciendo 600 000 Btu/h, la temperatura de secado fue de 50 °C, llegando a una humedad de equilibrio de 13%.

El objetivo principal de la investigación fue determinar los elementos mecánicos como influye en el tiempo de secado.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el Departamento de Apurímac, Provincia de Abancay, Distrito de Tamburco, en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Académico profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, que está ubicada a una altitud de 2700 msnm y la Dirección es Av. Inca Garcilaso de la Vega S/N.

Maíz dulce, procedente de la micro cuenca de distrito de Abancay, recolectadas (entre marzo hasta junio de 2017), que está ubicada a una altitud de 2400 msnm., Provincia de Abancay del Departamento de Apurímac.

El equipo que se uso es el secador lecho fluidizado, JARCON, Modelo SLFT-60-240X, con las características técnicas como se muestra en el Tabla 1.

Tabla 1: Características técnicas de secador lecho fluidizado SLFT-60-240X

Descripción	Capacidad
Motor (ventilador)	7.5 hp, 3550 rpm
Motor (extractor)	1.5 hp, 3550 rpm
Capacidad por batch	80-120 kg (en función al producto)
Temperatura de trabajo	40-65°C (en función al producto)
% humedad final	4-12% (en función al producto)

Fuente: Catálogo de secador lecho fluidizado, JARCON.

Los instrumentos de medición de variables que se usaron son, psicrómetro digital IR, EXTECH Instruments, Modelo HD500, Infrared -50 a 500 °C, Type K -100 a 1372 °C. Analizador de Humedad, OHAUS, Modelo MB45, capacidad 45 g ± 0.01%, 50 a 200 °C ± 1 °C. Balanza analítica, BALANCE JR, Modelo HB3000., capacidad min. 10g y máx. 3000 g, d=0.1g y cronometro digital, EXTECH INSTRUMENTS.

2.2 Métodos

Curvas de secado y determinación experimental

Una descripción de los diversos estados del sistema de agua en sólidos son parámetros importantes se definen en la siguiente que el contenido de agua de un material indica la cantidad total de agua en porcentaje de la masa total, el contenido de humedad en base húmeda se representa por la siguiente relación [9].

$$\%H_{bh} = \frac{m_w}{m_w + m_{ss}} \times 100 \quad (1)$$

Donde %H es el porcentaje de humedad en base húmeda (%), m es el peso de agua (kg H₂O) y m_s es peso de sustancia seca (kg s.s.)

Contenido de humedad en base seca que es la relación de masa de la agua y masa de los sólidos secos [9].

$$X = H_{bs} = \frac{m_w}{m_{ss}} \quad (2)$$

Donde X=H es la humedad en base seca (kgH₂O/kg s.s.).

Un sólido húmedo cuando está libre de humedad y sus cambios de volumen durante el proceso de secado, no es conveniente expresar la humedad contenido en términos de volumen. El contenido de humedad de un sólido generalmente se expresa como el contenido de humedad en peso

de material en el sólido seco, X. El agua puede convertirse en sólido por la retención en los capilares, estructuras celulares o por adsorción química o física en la superficie del sólido, la humedad en un material higroscópico es la humedad en exceso al equilibrio. El método para la determinación de humedad en base húmeda fue AOAC (2005). Los dos contenidos de humedad están relacionados por la expresión [4]:

Fuente: Análisis en el laboratorio de Operaciones Unitarias

$$X = H_{bs} = \frac{H_{bh}}{1 - H_{bh}} \quad (3)$$

Donde H_{bs} humedad en base húmeda (kg H₂O/kg).

La curva de secado interpreta la eliminación de la humedad de un producto alimenticio típico sigue una serie de velocidades de secado. Las zonas de velocidad de secado existentes en diferentes etapas [10]:

En los procesos de secado, los datos se obtienen generalmente como el cambio en el peso del producto con el tiempo. Sin embargo, los datos a veces de secado se pueden expresar en términos de velocidad de secado, como sigue:

El contenido de humedad del producto se define como la relación entre la cantidad de agua en el alimento y la cantidad de sólidos secos, y se expresa como [3]

$$X = M_t = \frac{m_t - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (4)$$

Donde m, es el peso total en un momento dado (kg), m_{ss} es el peso de sustancia seca (kgs.s.) m_t y es la razón de humedad (kg H₂O/kg s.s.)

Este caso existe cuando el secado del producto en su totalidad se lleva a cabo en el periodo de velocidad de secado constante.

Es casi siempre es posible cuando el sólido contiene la humedad libre o no unido, una variable muy importante en el proceso de secado es el denominado contenido de humedad libre,, una curva de secado típico es obtenida mediante el trazado del contenido de humedad libre M contra el tiempo de secado que es definido como [11]:

$$M_l = M_t - M_e \quad (5)$$

Donde M_i , es la humedad libre (kg H₂O/ kg s.s.) y M_i es la humedad de equilibrio (kg H₂O/kg s.s.).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis del tiempo de secado se muestra en la tabla 2, se calcula con los valores promedios de peso y la humedad en base seca se determinó con la ecuación 4.

Tabla 2: Humedades en base seca de secado de los cuatro tratamientos

Tiempo (h)	Humedad base seca (kg agua/kg s.s.)			
	Ventilador	Ventilador y Extractor	Extractor	Sin extractor ni ventilador
0	2.2	2.19	2.2	2.2
2	1.98	1.85	2.05	2.12
4	1.62	1.45	1.9	2.01
6	1.35	1.12	1.68	1.82
8	1.04	0.92	1.49	1.73
10	0.81	0.69	1.27	1.61
12	0.64	0.47	1.18	1.45
14	0.43	0.26	1.04	1.37
16	0.29	0.14	0.94	1.32
18	0.13		0.77	1.25
20			0.65	1.14
22			0.48	1.1
24			0.41	1
26			0.32	0.9
28			0.29	0.82
30			0.22	0.76
32			0.17	0.72
34			0.14	0.64
36			0.11	0.58
38				0.54
40				0.46
42				0.39
44				0.33
46				0.3
48				0.23
50				0.15
52				0.09

Fuente: Análisis en el laboratorio de Operaciones Unitarias

En la tabla 2, se consideró para el cálculo del tiempo de secado y se trabajó con granos húmedos de 118 g de peso, y se analizó la humedad de los granos frescos que contiene aproximadamente 68,7 % de agua en base

húmeda y la humedad de equilibrio aproximado de los granos es de 12,5% en base húmeda que representa 0,143 kg agua/kg s.s., con los valores de la tabla 2 se construye la figura 1 como se muestra.

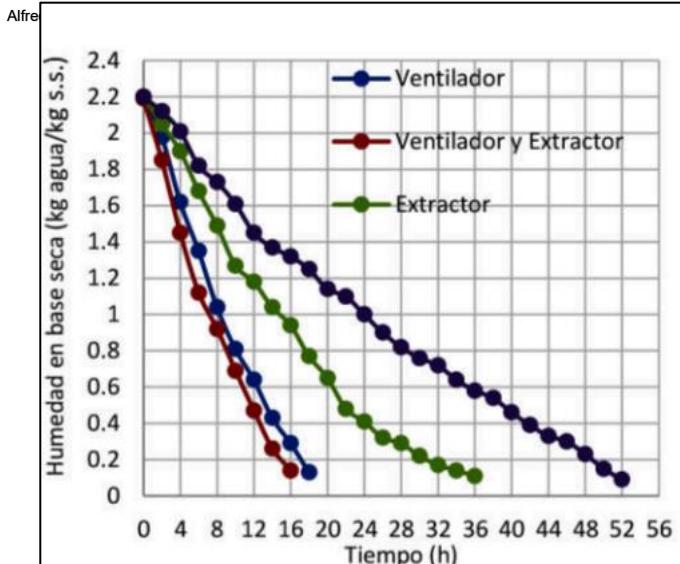


Figura 2: Diagrama de curvas de secado de humedad en base seca y tiempo

De la figura 2, se puede observar claramente que los 4 tratamientos influyen en el tiempo de secado a medida que el tiempo incrementa la humedad en base seca disminuye, el tiempo de secado menor es de ventilador y extractor, seguido de ventilador, posteriormente de extractor de aire húmedo y finalmente cuando no se utiliza los 2 ventiladores o sea solo funciona la cámara de combustión del gas propano, según [3] indica que la temperatura, la humedad inicial y las características de materia prima son los que influye en el tiempo de secado. Además [12], indica que la mayor variación se da en los primeros tiempos de secado y luego va decreciendo, específicamente por el contenido de agua en la estructura del alimento el mecanismo de difusión en el secado es debido al gradiente de concentración de agua existente entre el alimento y el ambiente

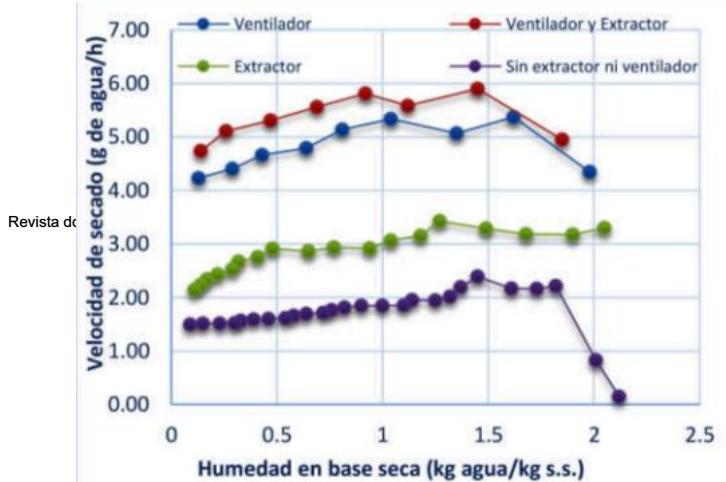


Figura 3: Diagrama de curvas de velocidad de secado en función a humedad en base seca

Para determinar el tiempo de secado en cada uno de los tratamientos se usó como referencia de los autores, [13], indica que la humedad de equilibrio aproximado es de 13,5% base húmeda. Para el análisis en nuestra localidad la humedad de equilibrio de maíz alcanzo cuando llega a un peso de 12,5% que representa 0,143 kg agua/kg de materia seca y también en la figura 3 muestra la velocidad de evaporación de agua de maíz donde con el uso de ventilador y extractor tiene mejor la capacidad de eliminación de agua.

En la tabla 3, se muestra el tiempo de secado de los 4 tratamientos, donde resultó el menor tiempo de secado cuando funciona el ventilador y extractor de aire en un tiempo promedio de 14,7 h seguidos de ventilador de 16,8 h, el extractor y finalmente cuando no funciona ningún elemento mecánico.

Tabla 3: Tiempo de secado de los cuatro tratamientos

Repetición	Tiempo (h)			
	Ventilador	y extractor	Extractor	Sin extractor ni ventilador
1	17,0	15,0	34,3	49,5
2	16,8	14,2	35,8	51,2
3	16,6	14,9	32,0	50,0
Promedio	16,8	14,7	34,0	50,2

4. CONCLUSIONES

El menor tiempo de secado hasta llegar a la humedad de equilibrio resultó cuando se utiliza el ventilador y extractor de aire en un tiempo promedio de 14,7 h con la ecuación de forma exponencial con un coeficiente de correlación R^2 de 0,9488; si solo se utiliza el ventilador el tiempo de secado fue de 16,8 h con R^2 de 0,9388; utilizando el extractor fue de 34,0 h y si no se utiliza

ningún equipo auxiliar el tiempo de secado es de 50,2 h.

Las curvas de secado permiten identificar claramente un periodo de calentamiento, uno de velocidad de secado constante y otro decreciente para cada una uno de los elementos de máquinas estudiadas.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac de la escuela académico profesional de Ingeniería Agroindustrial por facilitarnos el laboratorio de Operaciones Unitarias para realizar el trabajo de la investigación.

REFERENCIAS

- Alfredo Fernandez Ayma, Revista de Investigación C&T Ríobamba, Vol. 1, Edición 1, Mayo 2018, ISSN 2706-543X
- [1] J. Rodríguez, «<http://www.cosechaypostcosecha.org>,» 01 01 2006. [En línea]. Available: http://www.cosechaypostcosecha.org/data/folletos/FolletoSecad_oGranos.pdf. [Último acceso: 03 09 2018].
- [2] E. Satorre, R. Bench, G. Siafer, E. De La Fuente, D. Miralles, M. Otegui y R. Savin, Producción de granos. Bases funcionales para su manejo, Argentina: Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, 2003.
- [3] A. & G. Ibarz, Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos, España: Mundiprensa, 2014.
- [4] A. S. Mujumdar, Manual de secado industrial, Londres Nueva York: CRC Press, 2015.
- [5] Á. H. Restrepo y J. C. Burbano, «Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos,» *Scientia et Technica*, vol. 12, nº 17, pp. 127-132, 2005.
- [6] M. Gur y M. Gur, «La comparación de maíz secado en secador de lecho fluido y convectiva bandeja Secadora,» Avances en la exergía, Energía y Medio Ambiente, vol. 1, nº 1, pp. 687-694, 2014.
- [7] M. A. Martinello, «Modelado del secado de granos en lecho fijo a bajas temperaturas de aire,» Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 2015.
- [8] S. Revelo, «Rediseño del secador de granos proyecto senescyt TT-08-00001,» Escuela Politécnica Nacional en Ingeniería Mecánica, Quito Ecuador, 2016.
- [9] J. Wernecke y J. Wernecke, Humedad industrial y Medición-Una guía práctica, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.J. Wernecke y J. Wernecke, Humedad industrial y Medición-Una guía práctica, Alemania: Wiley-VCH Verlag Co,2014
- [10] P. Singh y D. Heldman, Introducción a la Ingeniería de los Alimentos, Zaragoza-España: Acribia, S.A, 2014.
- [11] J. M. Delgado y . A. Barbosa de Lima, «Fenómenos de Transporte y el secado de sólidos y materiales particulados,» *Biosystems Engineering*, vol. 2, 92, p. 237-245, 2014.
- [12] G. V. Barbosa, H. Vega-Mercado y A. Ibarz Ribas, Deshidratación de alimentos, España: Acribia, 2000
- [13] R. Bresani, C. Lezama, E. Gudiel, B. Rodas, C. Villatoro y G. Alvarado, «El uso de los productos agrícolas locales,» *En el desarrollo de los alimentos complementarios*, vol. 1, }\$ 17, p. 39, 2006.

BIOGRAFÍAS

Alfredo Fernandez Ayma, Graduado en la Universidad Nacional del Altiplano 2001, Ingeniero Agroindustrial con estudios de Postgrado en Agricultura Andina, especialidad Postcosecha y Marketing. Docente Asociado en la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac-Perú.