

Optimización agroindustrial basada en análisis econométrico de humedad e impurezas en granos

Agro-industrial optimization based on econometric analysis of moisture and impurities in grains

Carlos Elio Céspedes Jiménez* ccarlos.eliocespedes@gmail.com ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0009-0002-1959-3056>

Norberto Justiniano Gallardo norberjust@gmail.com ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0009-0008-0231-4210>

Manuel Vega Almaguer vegam4242@gmail.com ⁽²⁾

<https://orcid.org/0000-0002-8083-4106>

Edson Huanca Cayoja huanacayojaedson@gmail.com ⁽¹⁾

<https://orcid.org/0009-0009-7539-5047>

Daniel Palomino Cuesta Danielpalomino@newlinks.es

<https://orcid.org/0009-0003-4101-2833> ⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidad Privada Domingo Savio, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

⁽²⁾ Universidad de la Habana, La Habana, Cuba. ⁽³⁾ Newlinks Consulting SL, Madrid, España

* Autor para la correspondencia

Resumen: El estudio analiza la distribución de impurezas y humedad en granos, así como la relación entre ambas variables, con el propósito de formular recomendaciones que optimicen la gestión agroindustrial, mejoren la calidad del producto y reduzcan las pérdidas económicas. Se empleó un diseño descriptivo, analítico e inferencial basado en 4.651 observaciones seleccionadas aleatoriamente. Para la medición de impurezas y humedad se aplicaron métodos estandarizados, complementados con análisis estadísticos descriptivos y modelos econométricos. Los resultados evidenciaron que aproximadamente el 70 % de las impurezas se concentró en niveles cercanos al 1 %, dentro de una distribución predominantemente comprendida entre el 1 % y el 4 %, con un peso neto total de 142.476 toneladas. La humedad de los granos se ubicó principalmente entre el 13 % y el 16 %. Los modelos econométricos determinaron que tanto la humedad como las impurezas son variables estadísticamente significativas, con capacidades explicativas del 50,11 % y el 65 %, respectivamente. Asimismo, las

simulaciones confirmaron una relación inversa entre ambas variables. Se concluye que el control adecuado de la humedad, especialmente durante el almacenamiento, puede contribuir a reducir el porcentaje de impurezas y mejorar la calidad de los granos. Se recomienda fortalecer las prácticas de monitoreo y manejo de la humedad, además de desarrollar investigaciones adicionales que permitan identificar otros factores asociados con esta relación.

Palabras clave: econometría, análisis estadístico, planificación agrícola, economía agraria, producto agrícola

Abstract: This study analyzes the distribution of impurities and moisture in grains, as well as the relationship between both variables, with the aim of proposing recommendations in order to optimize the agro-industrial management, improving the quality of the product and reducing economic losses. A descriptive, analytical and inferential design is used, based on 4,651 randomly selected observations. Standardized methods were applied for the measurement of impurities and moisture, supplemented by descriptive statistical analysis and econometric models. The results showed that approximately 70 % of the impurities were concentrated at levels close to 1 %, within a predominantly 1-4 % distribution, with a total net weight of 142,476 tons. Grain moisture was mainly between 13 % and 16%. Econometric models determined that both moisture and impurities are statistically significant variables, with explanatory capacities of 50.11% and 65 %, respectively. In addition, the simulations confirm an inverse relationship between both variables. It is concluded that proper control of moisture, especially during storage, help reducing the percentage of impurities and improve grain quality. It is recommended to strengthen the monitoring practices and humidity management, as well as developing additional research that allows identifying other factors associated with this relationship.

Keywords: economic measurement, statistical analysis, agricultural planning, land economics, agricultural products

1. Introducción

La calidad de los granos es un factor crítico en la agroindustria, ya que influye directamente en la rentabilidad y la seguridad alimentaria (Rodríguez-Pérez *et al.*, 2023; Pedreros-Gómez *et al.*, 2024; Morán *et al.*, 2025; Madhukar *et al.*, 2025). Entre

los principales determinantes de la calidad del grano, la humedad y las impurezas juegan un papel fundamental. La humedad inadecuada puede favorecer el crecimiento de microorganismos y deteriorar el producto, mientras que las impurezas no solo afectan la calidad sensorial del grano, sino que también pueden disminuir su valor comercial (Moreira-Vera *et al.*, 2024; Moseley *et al.*, 2024; Sosa-Yañez *et al.*, 2024; Osorio *et al.*, 2024; Duque-Aldaz *et al.*, 2024).

Varios estudios han abordado la relación entre humedad e impurezas, sugiriendo que un control efectivo de la humedad reduce significativamente las impurezas presentes en los granos (Huang *et al.*, 2020; Alvarez-Parra *et al.*, 2020; Moreira Menéndez *et al.*, 2023; Atencio Solano *et al.*, 2024). Sin embargo, se requieren investigaciones más profundas que analicen esta relación de manera cuantitativa y que ofrezcan modelos predictivos que optimicen los procesos de manejo y almacenamiento.

Este estudio tiene como objetivo analizar la distribución de humedad e impurezas en granos mediante un enfoque estadístico y econométrico. A través de un conjunto de 4651 observaciones, se busca establecer la relación entre estas variables y proporcionar recomendaciones prácticas para mejorar la calidad del grano en la agroindustria. Los hallazgos de este estudio no solo contribuirán al conocimiento científico en el área, sino que también ofrecerán herramientas útiles para la gestión de calidad en el sector agroindustrial.

2. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo con un diseño descriptivo y analítico, utilizando un enfoque cuantitativo para evaluar las variables de interés: humedad e impurezas en granos. Se seleccionó una muestra representativa de 4651 observaciones provenientes de diferentes lotes de granos, recolectados en condiciones controladas para asegurar la validez de los datos. En la Tabla 1 se especifica la distribución de impurezas y humedad en granos a partir del análisis de las observaciones, destacándose que el 70 % de las impurezas se concentra en el rango de 1 % a 4 %; el 2 % representa la impureza más común, lo que indica una calidad aceptable en la mayoría de los lotes.

Tabla 1. Distribución porcentual de impurezas

Intervalo	% Impureza	Frecuencia	Porcentaje	Peso Neto Toneladas	Peso Líquido Toneladas
0	1	818	17.6%	25,058	24,021
1	2	1078	23.2%	33,023	31,656
2	3	914	19.7%	27,999	26,840
3	4	639	13.7%	19,575	18,764
4	5	454	9.8%	13,908	13,332
5	5	275	5.9%	8,424	8,075
5	6	149	3.2%	4,564	4,375
6	7	108	2.3%	3,308	3,171
7	8	83	1.8%	2,543	2,437
8	9	36	0.8%	1,103	1,057
9	10	31	0.7%	950	910
10	20	66	1.4%	2,022	1,938
Total		4651	100%	142,476	136,578

En detalle, la impureza con mayor frecuencia fue del 2%, registrando 1.078 casos, lo que representa un 23,2 % del total. En términos de peso, el peso neto total analizado fue de 142.476 toneladas, mientras que el peso líquido total fue de 136.578 toneladas, indicando una reducción atribuible a la impureza presente.

La figura 1 exhibe un pico en el intervalo de humedad de 13 % a 16 %, predominio de estos niveles de humedad en las muestras analizada. Se observa un descenso abrupto en la frecuencia para humedades superiores al 16 %, alcanzando valores mínimos para humedades entre el 24 % y el 28 %.

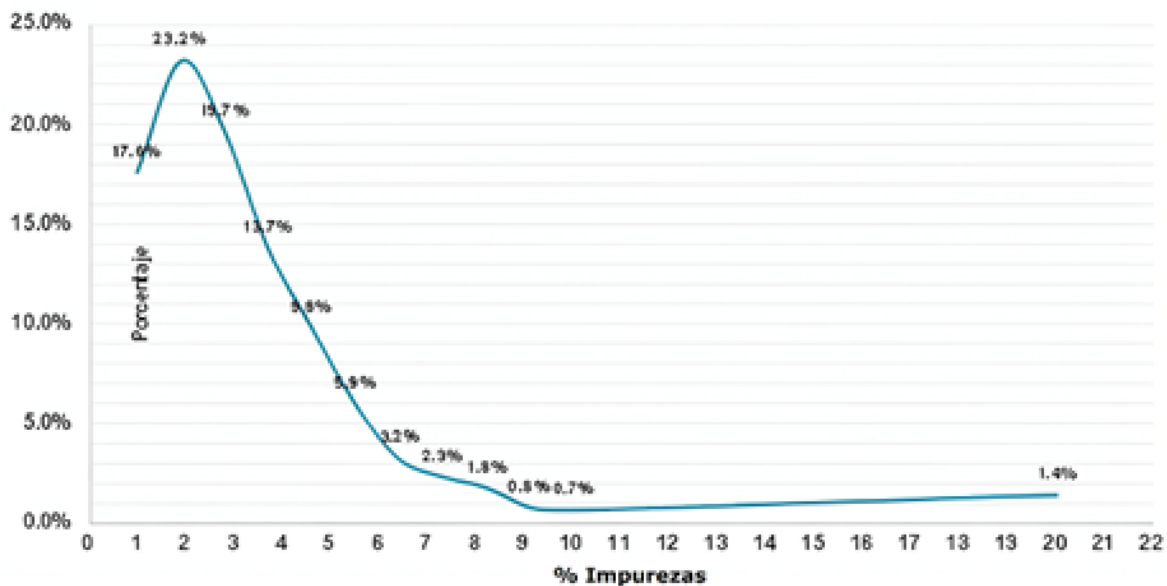


Figura 1. Distribución porcentual de impurezas.

En la tabla 2 se presenta la distribución porcentual de la humedad registrada en la muestra. Se observa una concentración notable de valores en los intervalos que van del 13 % al 16 %, los cuales, en conjunto, representan más del 80 % del total de los casos analizados.

Tabla 2. Distribución porcentual de humedad

Intervalos de % Humedad		Frecuencia	Porcentaje	Peso Neto Toneladas	Peso Líquido Toneladas
9	13	779	16.7%	23,863	22,876
13	16	2973	63.9%	91,073	87,303
16	20	834	17.9%	25,548	24,491
20	24	60	1.3%	1,838	1,762
4	28	5	0.1%	153	147
Total		4.651	0.00%	142,476	136,578

La figura 2 exhibe un pico en el intervalo de humedad de 13 % a 16 %, indicando la predominancia de estos niveles de humedad en la muestra analizada. Posteriormente, se observa un descenso abrupto en la frecuencia para humedades superiores al 16%, alcanzando valores mínimos para humedades entre el 24 % y el 28 %.

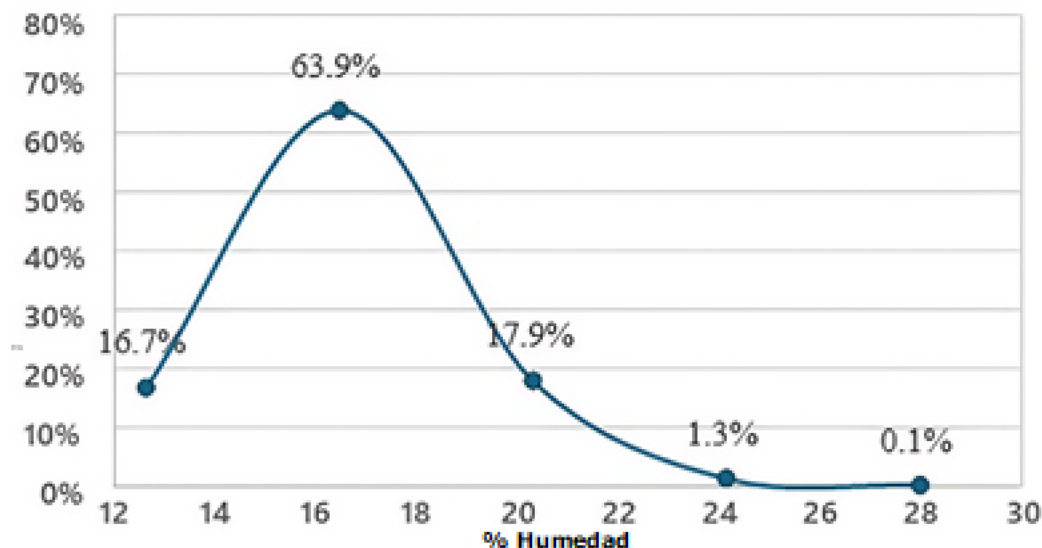


Figura 2. Distribución porcentual de humedad.

Esta distribución es importante para optimizar los procesos de recepción, almacenamiento y secado del grano, proporcionando información valiosa para decidir técnicamente estrategias de flexibilización de parámetros de calidad, reducir pérdidas económicas y mejorar la eficiencia operativa en la gestión agroindustrial.

2.1. Análisis Inferencial modelos econométricos

2.1.1. Porcentaje de impureza

El análisis econométrico utiliza un modelo predictivo, cuyo objetivo es explicar cómo distintas variables afectan al porcentaje de impurezas en el grano recibido (variable dependiente P8). Para determinar e inferir en la relación de las variables en estudio se utilizó el programa *EViews*, cuya capacidad para manejar datos complejos, realizar análisis avanzados y presentar resultados de manera clara y efectiva contribuye significativamente a la calidad y rigor del estudio sobre la relación entre humedad e impurezas en granos.

En modelación econométrica de series temporales, la estacionariedad es un supuesto clave para obtener modelos robustos y consistentes. Para evaluarla en la serie P8, se aplicó la prueba de raíz unitaria Augmented Dickey-Fuller (ADF), ampliamente usada en la literatura (Dickey y Fuller, 1979; MacKinnon, 1996).

La prueba ADF contrasta la hipótesis de que la serie tiene raíz unitaria (proceso integrado de orden uno o mayor) frente a la alternativa de estacionariedad. Formalmente, se plantea:

$H_0: \rho = 1$ (la serie presenta raíz unitaria; no es estacionaria)

$H_1: \rho < 1$ (la serie es estacionaria)

Los resultados obtenidos en el programa *EViews* se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Valores para la prueba de raíz unitaria (Dickey y Fuller, 1979)

Parámetro	Valor
Estadístico t-ADF	-1.785628
Probabilidad asociada (p)	0
Valor crítico al 1 %	-3.431575
Valor crítico al 5 %	-2.861966

3. Resultados

3.1. Interpretación estadística

Para determinar la estacionariedad, se compara el estadístico t-ADF con los valores críticos de MacKinnon (1996):

Si $|t\text{-ADF}| > |\text{valor crítico}|$, se rechaza H_0 y se concluye que la serie es estacionaria. Si $|t\text{-ADF}| \leq |\text{valor crítico}|$, no se rechaza H_0 y, por tanto, la serie presenta una raíz unitaria.

En este caso: $t\text{-ADF} = -1.7856 > -2.8619$ (valor crítico al 5 %)

Por consiguiente, no se rechaza la hipótesis nula a niveles de significancia del 1 %, 5 % y 10 %. Esto implica que la serie P8 no es estacionaria en niveles.

En la Tabla 4 se describen las variables con sus leyendas, introducidas en EViews y procesadas para obtener las salidas de regresión y bondad de ajuste del modelo.

Tabla 4. Descripción de variables introducidas al programa EViews

Variable	Descripción de la variable	Variable	Descripción de la variable
p1	Centro Origen	p9	Calor
p1_1	Granorte Cereales Gravel	p10	Partido
p1_2	Gravel Puerto Quijarro	p11	Dañado
p1_3	Pailón	p12	Verde
p1_4	Río Grande Nevada	p13	Enfermo
p1_5	San José	p14	Otro color
p1_6	Silo del Valle	p15	Mes
p1_7	Tres Cruces	p15_1	febrero
p2	Fecha	p15_2	marzo
p3	Proveedor	p15_3	abril
P3_1	Proveedor Alto Valor	p16	Día
P3_2	Proveedor Frecuente	p16_1	Lun/Ma
P3_3	Proveedor Moderado	p16_2	Mie/Jue
P3_4	Proveedor Ocasional	p16_3	Vie/Sab
P3_5	Proveedor Esporádico	p16_4	domingo
p4	Peso Neto	p17	Procedencia
p5	Descuento	p17_1	Procedencia de alto valor
p6	Peso Líquido	p17_2	Procedencia frecuente
p7	Humedad	p17_3	Procedencia moderada
p8	Impureza	p17_4	Procedencia ocasional
p9	Calor	p17_5	Procedencia esporádica

3.1.1. Salidas de regresión del modelo

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la regresión, los cuales son significativamente aceptables.

Tabla 5. Salidas de regresión

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	4.319	0.179	24.12	0.0000
P1_2	-1.390	0.120	-11.54	0.0000
P1_3	1.369	0.071	19.17	0.0000
P1_5	0.769	0.094	8.17	0.0000
P3_2	0.292	0.060	4.90	0.0000
P5	-1.059	0.017	-63.31	0.0000
P7	-0.197	0.012	-16.74	0.0000

Los coeficientes en el modelo reportan signos y magnitudes coherentes con la teoría y la evidencia empírica previa, confirmando la correcta especificación funcional. Las pruebas de significancia individual y conjunta arrojaron p-valores altamente robustos ($p < 0,01$), descartando problemas de multicolinealidad grave.

Tabla 6. Bondad de ajuste

R-squared	0.501	Mean dependent var	2.819
Adjusted R-squared	0.500	S.D. dependent var	2.239
S.E. of regression	1.58	Akaike info criterion	3.758
Sum squared resid	11623.89	Schwarz criterion	3.772
Log likelihood	-8729.63	Hannan-Quinn criter.	3.763
F-statistic	518.04	Durbin-Watson stat	2.013
Prob(F-statistic)	0.00		
Inverted AR Roots	,40		-,21

El estadístico Durbin-Watson, cercano a 2,0 en ambos modelos ($DW = 2,013$ para impureza), confirmó la ausencia de autocorrelación significativa, sin distorsiones por heterocedasticidad ni dependencia serial. El ajuste global mostró R^2 ajustados del 50 % para el porcentaje de impureza, errores estándar controlados y estadísticos F altamente significativos ($p < 0,01$), lo que refuerza la robustez del marco inferencial.

3.1.2. Modelo matemático P7 (Humedad)

El análisis estadístico refleja que todas las variables estudiadas son significativas ($p\text{-valor} = 0,0000$), lo que confirma su relevancia dentro del modelo:

Descuento (P5): Tiene un coeficiente negativo (-1,059), lo que indica que cuando aumentan los descuentos aplicados, se tiende a reducir el porcentaje de impureza.

Humedad (P7): Presenta un coeficiente negativo (-0,197), mostrando que un aumento en la humedad se relaciona con una reducción en los niveles esperados de impureza.

Centros acopio:

Gravetal Puerto Quijarro (P1_2): Coeficiente negativo (-1,390), indica menores niveles de impureza en comparación con otras localidades.

Pailón (P1_3): Coeficiente positivo (1,369), refleja mayores niveles promedio de impureza en comparación con otras zonas.

San José (P1_5): Coeficiente negativo (-0,769), con menores niveles de impureza.

Tabla 7. Salida de regresión de la variable dependiente humedad				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob
C	16.627	0.077	214.718	0.0000
P1_2	0.440	0.090	4.878	0.0000
P4	-0.070	0.002	-32.509	0.0000
P5	-1.562	0.021	-75.728	0.0000
P8	-0.278	0.008	-33.657	0.0000
P9	-0.241	0.030	-8.061	0.0000
P10	-0.103	0.005	-19.089	0.0000
P11	-0.046	0.006	-8.057	0.0000
P12	-0.119	0.005	-24.867	0.0000
P15_1	-0.506	0.122	-4.155	0.0000
P17_3	-1.170	0.116	-10.083	0.0000
AR(1)	0.252	0.013	19.605	0.0000
AR(2)	0.108	0.013	8.285	0.0000
AR(4)	0.114	0.014	8.276	0.0000
SIGMASQ	1.648	0.029	56.859	0.0000

Los coeficientes en el modelo reportan signos y magnitudes coherentes con la teoría y la evidencia empírica previa, confirmando la correcta especificación funcional. Las pruebas de significancia individual y conjunta arrojaron p-valores altamente robustos ($p < 0,01$), descartando problemas de multicolinealidad grave.

Para la humedad se confirmó la ausencia de autocorrelación significativa. Además, la inclusión de términos AR(1), AR(2) y AR(4) permitió corregir potenciales distorsiones asociadas a heterocedasticidad y dependencia serial.

Tabla 8. Tabla de bondad de ajuste de la humedad

R-squared	0.65	Mean dependent var	14.692
Adjusted R-squared	0.65	S.D. dependent var	2.166
S.E. of regression	1.29	Akaike info criterion	3.344
Sum squared resid	7666.86	Schwarz criterion	3.365
Log likelihood	-7761.92	Hannan-Quinn criter,	3.352
F-statistic	610.80	Durbin-Watson stat	2.024
Prob(F-statistic)	0		
Inverted AR Roots	,71	,05+,53i	,05-53i -,57

3.2. Clasificación del proveedor

Proveedor moderado (P3_2): Coeficiente positivo (0,292), lo que indica que estos proveedores suelen entregar grano con niveles ligeramente superiores de impureza.

El modelo presenta una capacidad explicativa del 50,11 % (R^2 ajustado = 50,02 %), mostrando un buen ajuste estadístico. Esto significa que aproximadamente la mitad de la variabilidad en el porcentaje de impureza puede explicarse por las variables analizadas.

Humedad: Se determinó utilizando un horno de secado a 105°C durante un período de 24 horas, siguiendo el protocolo establecido por la Asociación Americana de Oficiales de Granos (AACC).

Impurezas: Se cuantificaron a través de un análisis visual y mecánico, separando y pesando las impurezas visibles, tales como granos dañados, piedras y otros contaminantes.

3.3. Análisis estadístico

Los datos se analizaron con software estadístico (SPSS o R) mediante tres etapas:

Análisis descriptivo: se calcularon medidas de tendencia central (media, mediana) y de dispersión (desviación estándar, rango) para ambas variables.

Correlación: se usó el coeficiente de Pearson para evaluar la relación entre humedad e impurezas.

Modelos econométricos: se desarrollaron regresiones lineales múltiples para analizar el impacto de la humedad y otras variables sobre el porcentaje de impurezas, verificando los supuestos de normalidad de residuos y homocedasticidad.

3.4. Simulaciones

Se llevaron a cabo simulaciones para explorar diferentes escenarios de humedad e impurezas, utilizando técnicas de Valor esperado. Estas simulaciones permitieron observar cómo variaciones en los niveles de humedad podrían influir en el porcentaje de impurezas, proporcionando una comprensión más profunda de la dinámica entre estas variables.

3.5. Validación de resultados

La fiabilidad de los resultados fue validada mediante comparaciones con estudios previos y análisis de consistencia interna. Se realizaron pruebas de significancia (p-valor) para determinar la validez estadística de los modelos propuestos. Además, se llevaron a cabo análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los hallazgos ante cambios en los supuestos del modelo.

3.6. Recomendaciones prácticas

A partir de los resultados obtenidos, se desarrollaron recomendaciones prácticas para la gestión de la humedad en el almacenamiento y procesamiento de granos, con el objetivo de mejorar la calidad del producto final y minimizar las pérdidas económicas en la agroindustria.

4. Discusión

4.1. Distribución de impurezas

Se observó que la mayor frecuencia se encuentra en el 2 % de impurezas, representando el 23,2 % de los casos. El 70 % de las muestras presentaron impurezas entre 1 y 4 %.

El peso neto total llegó a 142.476 toneladas, mientras que el peso líquido registrado fue de 136.578 toneladas.

4.2. Distribución de humedad

El 63,9 % de las muestras presentó humedad entre 13 y 16 %, con una caída marcada en la frecuencia de muestras superiores al 16 %.

4.3. Modelos econométricos

Los modelos arrojaron un R^2 ajustado de aproximadamente 0,50 para impurezas y cerca de 0,65 para humedad.

Se evidenció que la humedad y las impurezas están inversamente relacionadas. Factores como los descuentos, la ubicación de los centros de acopio y el tipo de proveedor mostraron ser relevantes en el análisis.

4.4. Simulaciones

Se comprobó que mantener niveles óptimos de humedad ayuda a reducir impurezas y mejora la calidad final.

4.5. Análisis y discusión

La relación entre humedad e impurezas en granos es crítica en la gestión agroindustrial, ya que la calidad del producto afecta directamente la rentabilidad y sostenibilidad del sistema. Los resultados de este estudio, que evidencian una concentración de impurezas entre 1 % y 4 % y humedad entre 13 % y 16 %, coinciden con rangos óptimos reportados por Camacho *et al.*, (2001) para estabilidad y conservación de granos.

La humedad, como variable determinante en la calidad postcosecha, influye en la migración de agua dentro de la masa de grano, lo que puede generar condensación, proliferación microbiana y deterioro físico-químico. En este contexto, la medición precisa de la humedad se vuelve indispensable. Bianco *et al.* (2014) proponen el uso de hornos de microondas como método accesible y confiable para determinar el contenido de humedad en harina precocida de maíz, mientras que Sánchez (2021) establece procedimientos metrológicos rigurosos que garantizan la trazabilidad y comparabilidad de los datos en ambientes industriales.

La innovación tecnológica ha permitido el desarrollo de sensores dielcométricos de alta frecuencia que correlacionan la permitividad dieléctrica con el contenido de humedad, mejorando la eficiencia del monitoreo en tiempo real (Kalandarov, 2022; Flor *et al.*, 2022). Estas tecnologías, junto con el uso de imágenes capturadas por smartphones y algoritmos de aprendizaje automático, han demostrado ser eficaces para determinar el momento óptimo de cosecha y reducir pérdidas por humedad excesiva (Yang *et al.*, 2021).

Desde el punto de vista de la gestión del almacenamiento, Navarro y Noyes (2001) destacan que la aireación controlada, basada en principios físicos de transferencia de masa y energía, es esencial para mantener condiciones estables, especialmente en climas tropicales. Esta estrategia permite reducir impurezas y preservar la calidad del grano.

Los modelos econométricos aplicados en este estudio evidencian una relación inversa significativa entre humedad e impurezas, con una capacidad explicativa del 50,11 % y 65 %, respectivamente. Onofri (2024) subraya que los modelos econométricos en agricultura permiten estimar con precisión el impacto de variables como la humedad sobre la calidad del grano y las pérdidas económicas asociadas. Además, Su y Chen (2022) proponen enfoques que consideran la adaptación de los productores, lo que mejora la robustez de los modelos frente a condiciones cambiantes.

La modelación de sistemas agrícolas, como lo plantea Ahmed *et al.* (2022), permite integrar variables como clima, suelo, prácticas de manejo y tecnología, generando simulaciones que anticipan riesgos y optimizan decisiones. En el caso del arroz, Sarkar *et al.* (2024) destacan que el secado inmediato tras la cosecha es esencial para preservar su calidad, lo que refuerza la importancia del control de humedad en la etapa postcosecha.

En conjunto, los hallazgos de este estudio y la literatura convergen en la recomendación de optimizar el control de humedad en la cadena agroindustrial, no solo para preservar la calidad del grano, sino también para reducir costos operativos, mejorar la trazabilidad y aumentar la competitividad del sector.

5. Conclusiones

Se estableció una relación inversa significativa entre los niveles de humedad y el porcentaje de impurezas en los granos. Los modelos econométricos aplicados demostraron que un aumento en la humedad se asocia con una disminución en los niveles esperados de impureza, evidenciando que la gestión adecuada de la humedad puede ser clave para mejorar la calidad del grano.

El análisis de 4651 observaciones reveló que el 70 % de las impurezas se concentraron en un rango del 1 % al 4 %, con un peso neto total de 142.476 toneladas. Esto indica que la mayoría de los granos analizados presentan niveles de impurezas relativamente bajos, lo que sugiere que, con una adecuada gestión, es posible mantener la calidad del producto.

Los modelos econométricos mostraron que tanto la humedad como las impurezas son estadísticamente significativas, explicando el 50,11 % y el 65 % de la variabilidad de las variables, respectivamente. Esto refuerza la validez de los modelos utilizados y su capacidad para capturar la dinámica entre las variables estudiadas.

Las simulaciones exploratorias confirmaron la relación inversa entre humedad e impurezas, sugiriendo que la optimización de los niveles de humedad durante el almacenamiento puede mejorar la calidad del grano. Las validaciones con estudios previos proporcionaron una base empírica sólida para los hallazgos.

Se recomienda implementar estrategias de control de humedad en el almacenamiento y procesamiento de granos para reducir las impurezas y mejorar la calidad del producto final. Estas estrategias deben incluir el monitoreo continuo de los niveles de humedad y la adopción de prácticas de secado adecuadas.

El estudio sugiere la necesidad de realizar investigaciones adicionales para explorar otros factores que puedan influir en la relación entre humedad e impurezas, así como para evaluar la efectividad de las recomendaciones propuestas en diferentes contextos agroindustriales.

Los resultados de este estudio tienen implicaciones relevantes para la gestión agroindustrial, pues ofrecen un marco para decisiones informadas que mejoren la

calidad del grano y reduzcan pérdidas económicas. Aplicar prácticas basadas en estos hallazgos podría aumentar la eficiencia operativa y la sostenibilidad de la producción agrícola.

Referencias bibliográficas

- Ahmed, Z., Gui, D., Qi, Z., Liu, Y., Liu, Y., & Azmat, M. (2022). Agricultural system modeling: current achievements, innovations, and future roadmap. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(4), 363. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09654-7>
- Alvarez-Parra, R., Garcia-Mendoza, P., Reyes-Ramone, E., Acevedo-Barona, M., & Torres-Angarita, O. (2020). Efecto de la humedad de cosecha sobre la calidad del grano en arroz (*Oryza Sativa* L.). *Revista Peruana de Innovación Agraria*, 1(1), 79-95. <https://revistas.inia.gob.pe/index.php/REVINIA/article/view/6>
- Atencio Solano, L., Tapia Coronado, J., Barragán Hernández, W., Suárez Paternina, E., Tulio Diaz Cabadiáz, A., & Pastrana Vargas, I.J. (2024). Evaluation of some physical and physiological quality attributes of sweet corn (*Zea mays sacharata*) seeds under different storage conditions and harvesting season. *ACI Avances en Ciencias E Ingenierías*, 16(2), 15. <https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3295>
- Bianco, H.W., Capote, T.L., & Garmendia, C.G. (2014). Determinación de humedad en harina precocida de maíz blanco utilizando un horno de microondas doméstico. *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, 45(2), 60–65. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-04772014000200004
- Camacho, C., Alfonzo, B., Ortiz de Bertorelli, L., & De Venanzi, F. (2001). Estudio de la estabilidad de las características químicas, microbiológicas y sensoriales de mazorcas refrigeradas de híbridos de maíz super dulce. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 51(2), 165–170. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222001000200010

- Dickey, D.A., & Fuller, W.A. (1979). Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American statistical association*, 74(366a), 427-431.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1979.10482531>
- Duque-Aldaz, F.J., Moreno, E.R.H., Aspiazu, L.A.Z., & Choque, F.C. (2024). Predicción del contenido de humedad en el proceso de secado del cacao mediante regresión lineal simple. *Ingeniería Química y Desarrollo*, 6(02), 20-30.
<https://doi.org/10.53591/iqd.v6i02.348>
- Flor, O., Palacios, H., Suárez, F., Salazar, K., Reyes, L., González, M., & Jiménez, K. (2022). New sensing technologies for grain moisture. *Agriculture*, 12(3), 386.
<https://doi.org/10.3390/agriculture12030386>
- Huang, Z., Xue, J., Ming, B., Wang, K., Xie, R., Hou, P., & Li, S. (2020). Analysis of factors affecting the impurity rate of mechanically-harvested maize grain in China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering (IJABE)*, 13, 17-22.
<https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/6038>
- Kalandarov, P.I. (2022). High-frequency moisture meter for measuring the moisture content of grain and grain products. *Measurement Techniques*, 65, 297-303.
<https://doi.org/10.1007/s11018-022-02082-9>
- MacKinnon, J.G. (1996). Numerical Distribution Functions for Unit Root and Cointegration Tests. *Journal of Applied Econometrics*, 11(6), 601-618.
<http://www.jstor.org/stable/2285154>
- Madhukar, P., Pandey, L.M., & Dixit, U.S. (2025). Post-harvest grain storage: Methods, factors, and eco-friendly solutions. *Food Control*, 174, 111236.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111236>
- Morán, E., Barreno, C., & Morales, Y. (2025). Simulación del Sistema Transportador de una Máquina Trilladora para el mejoramiento de procesos de producción agroindustrial. *Revista Social Fronteriza*, 5(4), 805.
[https://doi.org/10.59814/resofro.2025.5\(4\)805](https://doi.org/10.59814/resofro.2025.5(4)805)

- Moreira Menéndez, C.M., Mancheno Padilla, E.M., Jácome Vélez., W.J., Herrera Rentería, E.A., & Poveda Kusmirczak, J.M. (2025). Evaluación de las Propiedades y el Aseguramiento de la Calidad en el Proceso de Secado del Maíz. *Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica*, 5(3), 4694-4708. <https://doi.org/10.61384/r.c.a..v5i3.1497>
- Moreira-Vera, T., Bravo-Mero, T., Mendoza-Talledo, O., & Macías-Zambrano, T., (2023). Comportamiento y Calidad de los Granos de Maíz (Zea Mays) Almacenados en Graneros Construidos con Diferentes Materiales. *593 Digital Publisher CEIT*, 8(4), 202-214. <https://doi.org/10.33386/593dp.2023.4.1879>
- Moseley, Q., Colindres, O., Caballero, C., Serrano, A., Gallardo, J., Moreno, I., & Serracín, J. (2024). Procesos de secado del café y su impacto en la industria. *I+D Tecnológico*, 20(2), 63-74. <https://doi.org/10.33412/idt.v20.2.4059>
- Navarro, S., & Noyes, R. T. (2001). *The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420040333>
- Onofri, L. (2024). Application of econometrics in agricultural production. *Agriculture*, 14(9), 1467. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091467>
- Osorio, V., Pabón, J., & Gómez, C.R. (2024). Efecto del porcentaje de humedad del café en la actividad de agua. *Revista Cenicafé*, 75(1), e75104. <https://doi.org/10.38141/10778/75104>
- Pedrerós-Gómez C.L., Maldonado-Mateus L.Y., & Caballero-Pérez, L.A. (2024). Atributos Fisicoquímicos de Granos de Cacao Fec-2 (*Theobroma Cacao* L.) producidos en Norte de Santander (Colombia). @*Limentech Ciencia Y Tecnología Alimentaria*, 22(2), 220-244. <https://doi.org/10.24054/limentech.v22i2.3637>
- Rodríguez-Pérez, G., Cervantes-Ortiz, J.F., Gámez-Vázquez, A.J., Reynaga-Franco, F. D.J., Torres-Velázquez, J.R., & Ávila-Perches, M.Á. (2023). Valor nutritivo en granos de triticale como alternativa en la industria alimentaria. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 14(3), 351-362. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/en/article/view/2870>

Sánchez, C. (2021). *Guía para la determinación de humedad en granos*. Instituto Nacional de Metrología de Colombia. https://www.researchgate.net/publication/357535689_Guia_para_la_determinacion_de_humedad_en_granos

Sarkar, S., Roy, S., & Bhattacharya, S. (2024). Postharvest processing of rice. In *Rice: Production, Processing and Marketing*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3224-5_7

Sosa-Yañez, L.C., López-Ahumada, G.A., & García-Hernández, J.L. (2024). Gradiente de humedad en el comportamiento agronómico del centeno cultivado en ambiente de zonas áridas. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 11(2). <https://doi.org/10.19136/era.a11n2.4052>

Su, X., & Chen, M. (2022). Econometric approaches that consider farmers' adaptation in estimating the impacts of climate change on agriculture: A review. *Sustainability*, 14(21), 13700. <https://doi.org/10.3390/su142113700>

Yang, M.D., Hsu, Y.C., Tseng, W.C., Lu, C. Y., Yang, C. Y., Lai, M.H., & Wu, D.H. (2021). Assessment of grain harvest moisture content using machine learning on smartphone images for optimal harvest timing. *Sensors*, 21(17), 5875. <https://doi.org/10.3390/s21175875>

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que puedan haber influido en los resultados obtenidos o en las interpretaciones propuestas.

Contribución de autoría según taxonomía CRediT

Carlos E. Céspedes Jiménez: Conceptualización/Metodología/Investigación/Redacción-revisión y edición

Norberto Justiniano: Redacción-revisión y edición/Validación/Metodología

Manuel Vega Almaguer: Análisis formal de datos /Metodología/Conceptualización

Edson Huanca Cayoja: Redacción-borrador original/Metodología/Validación

Daniel Palomino Cuesta: Análisis formal de datos/Validación/Redacción-revisión y edición