

Cuantificación de la porosidad en pan de molde mediante análisis digital de imágenes bidimensionales y su relación con la cinética de secado

Quantification of porosity in sliced bread using two-dimensional digital image analysis and its relationship with drying kinetics

Luis Egas¹

Resumen: Este estudio cuantifica la porosidad de la miga de pan de molde mediante análisis digital bidimensional y vincula la microestructura con la cinética de secado durante el horneado. Se elaboraron panes con cuatro niveles de levadura (0.5; 1.0; 1.5; 2.0 %), manteniendo constante la formulación base. La cinética de pérdida de humedad se modeló mediante la ecuación de Page a partir de la relación de humedad (MR); los parámetros k (constante global de secado) y n (curvatura asociada a las resistencias internas) se estimaron mediante regresión no lineal. La microestructura se caracterizó por rebanadas escaneadas (400 ppp, formato TIFF), calibradas en ImageJ/FIJI; las imágenes RGB se convirtieron a 8 bits y se segmentaron con un umbral fijo (100–155). Con Analizar→Partículas se extrajeron el área, la circularidad y las frecuencias por clases (0.2–5.0 mm²). El diseño completamente al azar se evaluó mediante ANOVA y la prueba LSD ($p < 0,05$). Los histogramas mostraron altas frecuencias de poros pequeños (<1 mm²) en todos los tratamientos, con diferencias significativas cercanas a 0.38 mm². La levadura moduló directamente el alveolado: 1.0 % produjo poros finos y homogéneos y alcanzó el mejor ajuste cinético ($k=1.864$; $n=0.1579$; $R^2=0.8707$); 0.5 % generó miga densa y secado rápido ($k=1.929$; $n=0.132$); 1.5 % presentó mayor contribución difusiva con retención interna ($k=1.827$; $n=0.1807$; $R^2=0.7978$); 2.0 % mostró poros grandes y canales preferenciales ($k=1.916$; $n=0.1523$). Se evidencia que los niveles intermedios (1.0–

Published

Edwards Deming Higher Technological Institute. Quito - Ecuador

Periodicity

October - December
Vol. 1, No. 27, 2025
pp. 65-
<http://centrosuragraria.com/index.php/revista>

Dates of receipt

Received: July 30, 2025
Approved: September 12, 2025

Correspondence author

legasa@uteq.edu.ec

Creative Commons License

Creative Commons License, Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Facultad de Ciencias de la Industria y Producción (FCIP), Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador legasa@uteq.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8815-5063>

1.5 %) optimizan la textura y la deshidratación. El flujo 2D propuesto es no destructivo, reproducible y útil para el control de calidad y la formulación, al correlacionar métricas morfológicas con parámetros cinéticos.

Palabras clave. Porosidad de la miga; análisis de imágenes 2D; cinética de secado; modelo de Page; relación de humedad (MR).

Abstract: This study quantifies the porosity of sandwich-bread crumbs using two-dimensional (2D) digital image analysis and links the microstructure to drying kinetics during baking. Breads were produced with four yeast levels (0.5%, 1.0%, 1.5%, and 2.0%), keeping the base formulation constant. Moisture loss kinetics were modeled using the Page equation based on the moisture ratio (MR); parameters k (overall drying constant) and n (curve shape related to internal resistances) were estimated by nonlinear regression. Microstructure was characterized on scanned slices (400 dpi, TIFF), calibrated in ImageJ/FIJI; RGB images were converted to 8-bit grayscale and segmented with a fixed threshold (100–155). Using Analyze → Particles, we extracted area, circularity, and frequency by size classes (0.2–5.0 mm²). A completely randomized design was evaluated with analysis of variance (ANOVA) and the Least Significant Difference (LSD) test ($p < 0.05$). Histograms revealed high frequencies of small pores (<1 mm²) across treatments, with significant differences at approximately 0.38 mm². Yeast level directly modulated the cell structure: **1.0%** yielded fine, homogeneous pores and the best kinetic fit ($k = 1.864$; $n = 0.1579$; $R^2 = 0.8707$); **0.5%** produced a denser crumb and faster initial drying ($k = 1.929$; $n = 0.132$); **1.5%** exhibited a stronger diffusive contribution with internal moisture retention ($k = 1.827$; $n = 0.1807$; $R^2 = 0.7978$); **2.0%** produced larger pores and preferential vapor channels ($k = 1.916$; $n = 0.1523$). Intermediate yeast levels (1.0–1.5%) optimized texture and dehydration. The proposed 2D workflow is non-destructive, reproducible, and valuable for quality control

and formulation, as it correlates morphometric metrics with kinetic parameters.

Keywords. Crumb porosity; two-dimensional (2D) image analysis; drying kinetics; Page model; moisture ratio (MR).

Introducción

La industria panificadora busca constantemente mejorar la calidad del pan de molde, un alimento básico de consumo mundial (Olahanmi et al., 2023). La calidad panadera se define por atributos sensoriales y físicos (volumen, textura de la miga, porosidad) que inciden en la aceptación del consumidor (Dong & Karboune, 2021). En particular, la microestructura de la miga (tamaño y distribución de alvéolos y proporción de vacíos) determina propiedades texturales como la suavidad o firmeza del pan. Estudios recientes indican que la incorporación de harinas ricas en fibra puede alterar la porosidad y la textura de la miga. Niveles elevados de sustitución con ingredientes vegetales ricos en fibra aumentan la densidad y la dureza de la miga, lo que afecta negativamente la calidad del pan (Manjarrez et al., 2024; Domínguez et al., 2019). Por otro lado, la tecnología alimentaria ha incorporado métodos instrumentales avanzados para evaluar objetivamente estos parámetros de calidad. En años recientes, el análisis digital de imágenes se ha consolidado como una herramienta no invasiva y eficiente para caracterizar la estructura interna del pan; mediante el procesamiento de imágenes de rebanadas de miga es posible cuantificar el número, tamaño y forma de los poros, así como la fracción porosa total, con alta reproducibilidad (Torres, et al. (2024).; Reile et al., 2022). Este enfoque complementa las técnicas tradicionales de análisis de textura y proporciona indicadores morfológicos vinculados a la percepción sensorial del consumidor (Akbarian, et al., 2022)). En consecuencia, la presente investigación tiene como objetivo analizar las estructuras porosas que se forman en el pan de molde cuando se le aplican diferentes concentraciones de levadura, mediante medidas de análisis digital 2D, con el fin de determinar con precisión la morfología del poro en el pan de molde y relacionarla con sus propiedades físicas.

Metodología

El estudio se llevó a cabo en el laboratorio de bromatología de la Finca Experimental “La María” perteneciente a la Universidad Técnica

Estatal de Quevedo, ubicada en el kilómetro 7.5 de la vía Quevedo–El Empalme, entrada al cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador. Esta finca se encuentra situada a $01^{\circ} 05' 20''$ de latitud sur y $79^{\circ} 27' 21''$ de longitud oeste, a una altitud promedio de 110 metros sobre el nivel del mar.

La harina utilizada en la elaboración del pan de molde correspondió a harina de trigo fortificada “Santa Lucía”; la levadura empleada fue de tipo comercial prensada “Levapan” adquirida en supermercados de la ciudad de Quevedo, provincia de Los Ríos.

Se pesaron los ingredientes de acuerdo con la formulación estándar propuesta por Yarza, I. (2013). La harina de trigo (58 %), mantequilla (3 %), leche (16 %), agua (16 %), sal (1 %) y azúcar (4 %) se mantuvieron constantes para cada concentración de levadura evaluada (0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 %).

Luego, se incorporaron estos ingredientes al tazón de la batidora. La masa se homogeneizó a 50 RPM para el movimiento en espiral del gancho y a 5 RPM para el movimiento de rotación del tazón. Una vez alcanzada la homogeneización inicial, la masa se retiró de la batidora, se cubrió y se dejó reposar durante 15 minutos.

Transcurrido el reposo, el tazón fue nuevamente colocado en la amasadora y se realizó un amasado a 100 RPM para el movimiento del gancho en espiral y 8 RPM para el movimiento de rotación del tazón, durante un tiempo total de 10 minutos. La masa obtenida se transfirió a los moldes previamente engrasados, procurando un llenado uniforme.

Posteriormente, las unidades fueron sometidas a fermentación controlada durante 1 hora y 45 minutos. Finalizada la fermentación, las masas se llevaron al horno doméstico Mabe, modelo EM7640, a 180°C durante 35 minutos.

Una vez completado el horneado, los panes se retiraron del horno y se dejaron enfriar en condiciones ambientales durante aproximadamente 3 horas, evitando la condensación superficial.

Durante el horneado, se estableció la cinética de secado; a los panes obtenidos se les determinaron la porosidad, el área, la forma y el tamaño del poro mediante análisis digital de imágenes 2D.

Durante el proceso de horneado, se determinó la evolución del contenido de humedad de la masa/pan en función del tiempo. Para ello, se registró la masa inicial de la muestra antes de entrar al horno (m_o) y su contenido de agua inicial (g de agua/g de muestra, base seca). Posteriormente, en puntos definidos durante el horneado, se retiraron muestras y se registró la masa instantánea (m_t) con una balanza analítica. Con estos datos, se calculó el contenido de agua residual de la muestra (X_{wt}) en cada momento t mediante la ecuación (1):

$$X_{wt} = \frac{m_o * X_w^o - (m_o - m_t)}{m_o * (1 - X_w^o)} \quad (1)$$

Con el valor de X_{wt} se calculó la relación de humedad o moisture ratio (MR), la variable típica utilizada para modelar la cinética de secado en matrices alimentarias porosas, similares a masas panificadas. MR se define según la ecuación (2):

$$MR = \frac{X_{wt} - X_{we}}{X_{wo} - X_{we}} \approx \frac{X_{wt}}{X_{wo}} \quad (2)$$

Donde:

X_{wt} , X_{wo} y X_{we} indican el contenido de agua (g de agua/g de muestra, db) en el tiempo t , en el tiempo 0 y en equilibrio, respectivamente. Los valores de equilibrio del contenido de agua suelen ser muy bajos y la ecuación (2) a menudo se simplifica asumiendo $X_{we} = 0$, sin un cambio significativo en el valor de MR. Esta aproximación se utiliza ampliamente en el ajuste de modelos cinéticos de secado de productos alimentarios porosos (Egas-Astudillo et al., 2018).

La evolución de MR en función del tiempo de horneado se ajustó al modelo tipo Page (Ecuación 3) (Meenu et al., 2021; Page, 1949).

$$MR = \exp(-k \cdot t^n) \quad (3)$$

donde k y n son parámetros empíricos:

- k Se asocia a la velocidad global de secado bajo las condiciones de temperatura y ventilación del horno,
- n Se relaciona con la dinámica de transferencia interna de humedad en la matriz del alimento, vinculada a la estructura celular y a la porosidad desarrolladas durante la fermentación y el horneado.

Análisis de imagen digital bidimensional (2D)

Las muestras se procesaron en distintos días de elaboración para asegurar la representatividad por lote.

Posteriormente, los panes fueron cortados manualmente con un cuchillo de hoja tipo sierra, obteniéndose rebanadas rectas de 1.5 cm de espesor uniforme. Cada rebanada se manipuló lo menos posible para no deformar el poro. Para conservar la humedad original de la estructura interna y evitar la deshidratación antes del análisis de imagen, cada rebanada se envasó individualmente en una bolsa hermética de polietileno hasta el momento de la adquisición de las imágenes (Wyrwisz et al., 2024).

Las imágenes de las rebanadas de pan de molde se obtuvieron mediante un escáner de cámara plana EPSON L380. Provisto de un dispositivo fotoeléctrico CMOS con sensor de imagen de contacto (CIS), con una resolución de 400 ppp, obteniendo archivos de imagen en formato TIFF (Tagged Image File Format), ampliamente empleado en análisis morfométricos y texturales de alimentos debido a su estabilidad a distintas escalas y a la ausencia de artefactos de compresión (Farrera-Rebollo et al., 2012; Gonzales-Barron et al., 2006). Durante el escaneo, la tapa se mantuvo cerrada y en absoluta ausencia de luz incidente externa, para evitar reflejos, sobreexposiciones y variaciones de brillo entre las muestras.

Antes del análisis, se realizó la calibración espacial en ImageJ (Fiji/ImageJ, versión 1.8). Para ello, se incluyó en la misma cámara del escáner una regla o patrón métrico conocido y se definió la equivalencia píxel–distancia (por ejemplo, ≈ 40 píxeles/mm en las condiciones de captura). Esta etapa es necesaria dado que permite comparar tratamientos de forma objetiva y reproducible (Russ. J.C, 2005).

Las imágenes en color (RGB) se convirtieron a escala de grises de 8 bits. Posteriormente, se aplicó un proceso de umbralización (“thresholding”) para separar la fase gaseosa (los alvéolos o poros) de la fase sólida (la matriz del pan). El umbral se fijó manualmente y se mantuvo constante en todas las muestras del experimento, a fin de asegurar la comparabilidad entre los tratamientos. Una vez binarizada la imagen (blanco = poro; negro = matriz sólida, o viceversa), se aplicó una limpieza morfológica básica (eliminación de ruido, relleno de pequeños huecos) para corregir discontinuidades o píxeles espurios debidos a la textura superficial del corte.

Para cada imagen binaria final, se calcularon las siguientes variables morfológicas de poro mediante las rutinas de medición de partículas de ImageJ.

- Área del poro (mm²).
- Circularidad (adimensional, 0 a 1). (Sahin and Gülüm., 2006).
- Frecuencia relativa de los poros por clase de tamaño.

Para el análisis estadístico descriptivo y comparativo entre tratamientos, se construyeron distribuciones de frecuencia del tamaño de poro agrupadas en clases geométricas crecientes (por ejemplo: 0.2–0.5; 0.5–1.0; 1.0–1.5; 1.5–2.5; 2.5–5.0 mm²). Este enfoque permite identificar si el pan presenta una microestructura dominada por poros pequeños y uniformes o, por el contrario, tiende a generar poros más grandes y heterogéneos, lo cual está directamente relacionado con atributos de textura como la firmeza y la esponjosidad percibida (Egas-Astudillo et al., 2018; Scheuer et al., 2015).

El conteo y la clasificación de poros mediante análisis digital de imágenes constituyen una metodología no destructiva y reproducible para caracterizar la estructura interna de productos de panadería y han sido propuestos recientemente como herramienta objetiva de control de calidad panadera y de evaluación de formulaciones en tecnología alimentaria (Schneider et al., 2012; Lassoued, et al., 2007).

El efecto del nivel de levadura sobre las propiedades estructurales y físicas del pan de molde se evaluó mediante un diseño completamente al azar (DCA). Se consideraron cuatro tratamientos experimentales, definidos por el porcentaje de levadura incorporado en la formulación: T1 (0,5 %), T2 (1,0 %), T3 (1,5 %) y T4 (2,0 %), con base en la masa de harina. Cuando el ANOVA mostró diferencias significativas entre los tratamientos, las medias se compararon mediante la prueba de Diferencia Mínima Significativa (Least Significant Difference, LSD), con un umbral de decisión de $p < 0.05$. STATGRAPHICS versión 16.1.03.

Para cada tratamiento, se ajustó el modelo tipo Page mediante regresión no lineal de mínimos cuadrados. El ajuste matemático se realizó en MATLAB versión R2022a.

Resultados

En la Figura 1 se muestran, a modo de ejemplo, la menor (a) y la mayor (b) concentración de levadura, que representan la evolución experimental de la relación de humedad (MR) en función del tiempo de horneado, junto con las curvas de ajuste obtenidas mediante el modelo de Page. En todos los casos, el modelo describió adecuadamente la tendencia decreciente de MR con el tiempo, evidenciando un buen ajuste, lo que se observa por la cercanía de los puntos experimentales a las curvas ajustadas y por los intervalos de confianza estrecho

Figura 1.

Ajuste del modelo de Page para la relación de humedad (MR) del pan con 0.5 % de levadura en función del tiempo de horneado (a).

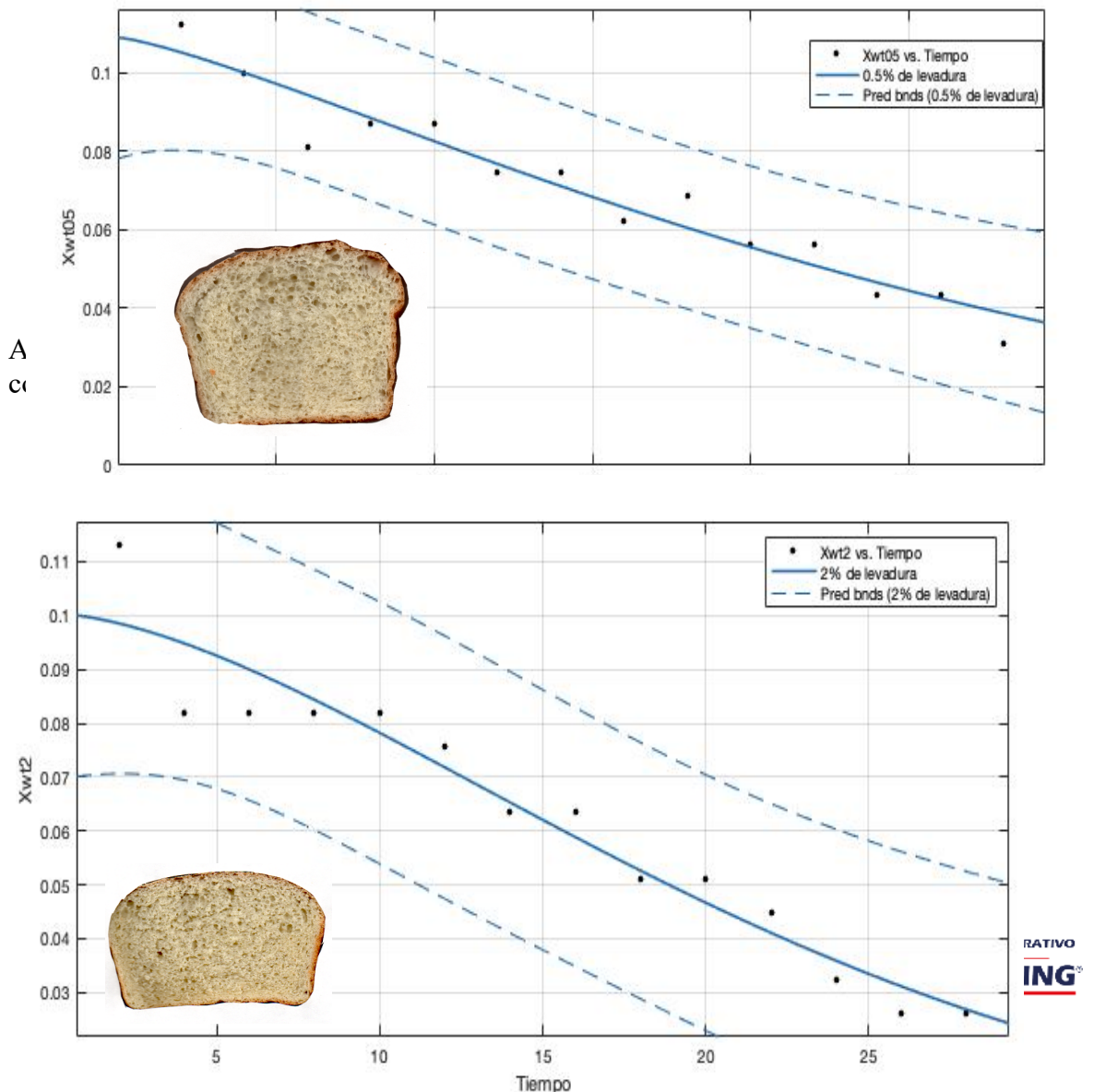


Tabla 1.

Parámetros del modelo de Page y coeficiente de determinación (R^2), calculados mediante regresión de los datos experimentales de cinética de secado.

Tratamientos	Modelo cinético	k	n	R^2
T1	$\exp(-K*t^n)$	1.929	0.132	0.82343618
T2	$\exp(-K*t^n)$	1.864	0.1579	0.87065494
T3	$\exp(-K*t^n)$	1.827	0.1807	0.79776893
T4	$\exp(-K*t^n)$	1.916	0.1523	0.7975928

La tabla 1 muestra que, en panes con muy poca levadura (T1=0.5 %), la masa genera un poro más denso, con celdas de gas menos desarrolladas y menos retención interna de vapor. Eso facilita que el agua salga más rápidamente durante el horneado, y se refleja en un k alto (1.929). Asociado con un n bajo (0.132), respalda la idea de una estructura menos aireada y más densa, típica de formulaciones con poca levadura (Scanlon et al., 2001).

En panes con levadura alta (T4 = 2 %), aunque se forma más porosidad, esta también puede conectarse con canales de salida de vapor. Es decir, ya no es solo “esponjoso”, sino “abierto” (Lampignano et al., 2013), por lo que el vapor tiene vías de escape y se seca rápido. Sin embargo, presenta igualmente un n bajo (0,1523), lo cual muestra que, con demasiada levadura, la miga ya no es finamente distribuida; puede tener alveolos grandes o coalescidos que generan vías de escape de vapor. Secado rápido, pero menos uniforme por dentro.

En cambio, los tratamientos intermedios T2 y T3 muestran k más bajos, 1.864 y 1.827, respectivamente; esto indica una pérdida de humedad algo más gradual (Erbay et al., 2010), compatible con una miga más estable, con poros más pequeños y distribuidos de manera más uniforme, que retienen agua por más tiempo dentro de la estructura (Mathieu, et al., 2016). Sin embargo, si $n = 0.1579$ (T2), esto sugiere una textura agradable para el consumo (suave pero no gomosa). Por el contrario, si $n = 0.1807$ (T3), la difusión interna es más importante. Eso puede indicar una miga con alvéolos más desarrollados y heterogéneos, que retiene humedad en zonas internas; el horno seca las capas externas y luego va drenando el interior (Wagner et al., 2007). Esto puede dar panes más esponjosos, pero también con un riesgo de zonas ligeramente más húmedas.

Esto es interesante porque T2 y T3 (1,0 % y 1,5 % de levadura) parecerían ser condiciones en las que la estructura interna modera la deshidratación durante el horneado.

Los resultados encontrados están alineados con lo que se discute en tecnología panadera moderna: la cinética de pérdida de agua durante el horneado está fuertemente condicionada por la microestructura gas-sólido generada durante la fermentación, y dicha microestructura depende directamente del nivel de levadura y del desarrollo de la masa (Wang, et al., 2024; Lu et al., 2020; Purlis, E. (2011)).

Las imágenes de las rebanadas de pan (Figura 2) se procesaron en ImageJ (Fiji Is Just ImageJ). Cada archivo **RGB** (A) se convirtió a escala de grises de 8 bits (B) y, a partir del histograma, se aplicó una umbralización manual (rango 100–155) (C) que separó de forma estable los alvéolos de la matriz de miga. Con la herramienta **Analizar** → **Analizar partículas**, se cuantificaron los poros dentro del intervalo **0.2–5.0 mm²** y con **circularidad 0.1–1.0** (D), obteniéndose recuentos y métricas geométricas por imagen (área, perímetro y circularidad). Este flujo produjo máscaras limpias, preservando la geometría de los alvéolos y minimizando el ruido de fondo, lo que permitió construir una tabla de frecuencias de tamaños de poro y su distribución de formas (Schindelin et al., 2012; Schneider et al., 2012).

Estos parámetros (área y circularidad) son indicadores reconocidos de la microestructura de la miga y se han asociado con propiedades de textura y con la capacidad de retención de humedad durante y después del horneado: estructuras con alvéolos más pequeños y de forma más uniforme suelen corresponder a migas más estables y suaves, mientras que conjuntos de poros más desarrollados y heterogéneos se vinculan con mayor esponjosidad y gradientes internos de humedad (Lassoued et al., 2007).

Los resultados obtenidos son, por tanto, coherentes con metodologías estandarizadas de análisis digital de imágenes de panificados y con la literatura sobre las relaciones microestructura-propiedades (Scanlon & Zghal, 2001; Rathnayake et al., 2018; Mathieu et al., 2016).

Figura 2.
Esquema de la segmentación en pan de molde con 1.5 % de levadura procesado por ImageJ (FIJI).

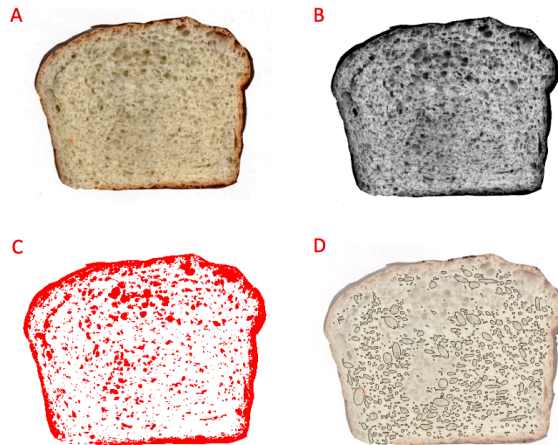
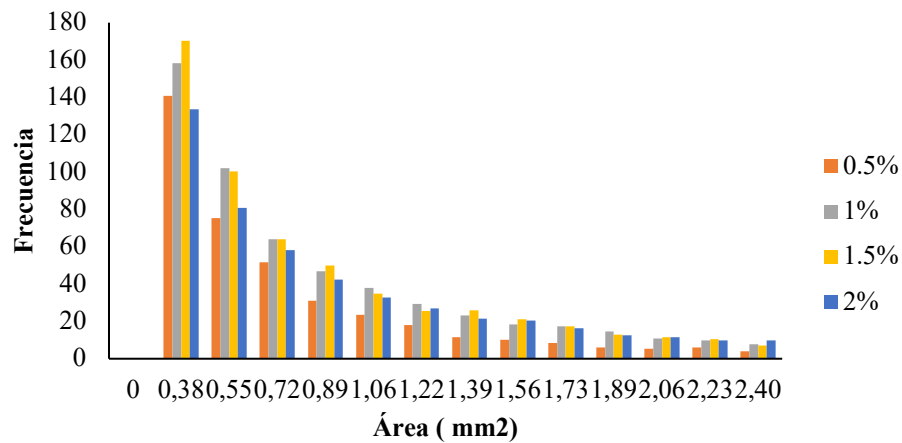


Figura 3.
Frecuencia de área obtenidas de acuerdo al porcentaje de levadura incorporado al pan de molde.



La figura 3 muestra la **distribución de frecuencia del tamaño de poro** en el pan de molde para los distintos niveles de levadura (0,5 %, 1 %, 1,5 % y 2 %). En todos los casos, se observa una alta concentración de poros pequeños (<1 mm), seguida de una disminución progresiva hacia tamaños mayores, lo cual es característico de estructuras panarias con

expansión controlada por la fermentación (Vain, S. P., & Young, L. S., 2015).

El tratamiento con 1.5 % de levadura presentó la mayor frecuencia de poros finos (~0.38 mm), lo que indica una microestructura más homogénea y aireada, mientras que el tratamiento con 2 % mostró una mayor proporción de poros grandes, asociados a la coalescencia de gas y a una expansión irregular (Miś, A., et al., 2018). Estos resultados coinciden con la cinética de secado obtenida, en la que la variación en el nivel de levadura afectó directamente la densidad estructural y la retención de humedad del pan.

Además, se observa que cuando las áreas son de aproximadamente 0.38 mm², las diferencias entre los tratamientos son significativas (LSD, $p < 0.05$). Es así que los tratamientos 1 y 1.5 % no son diferentes significativamente al tomar en cuenta sus medias; sin embargo, los tratamientos 0.5 % y 2 % sí presentan diferencias significativas (LSD, $p < 0.05$) con el resto de los tratamientos, lo que establece que los poros más estables y con mejor estructura se encuentran con una concentración de 1 a 1.5% de levadura.

a. Relación del área del poro y los parámetros cinéticos

La distribución del tamaño de poro, cuantificada mediante análisis de imagen, mostró que el porcentaje de levadura modula directamente la microestructura de la miga: el tratamiento con 1.0 % presentó una alta frecuencia de poros pequeños y homogéneos, mientras que 0.5 % generó una estructura más densa y 2.0 % produjo poros de mayor tamaño con indicios de coalescencia (Wang et al., 2024; Jiang et al., 2025; Tagliasco et al., 2024; Tsatsaragkou et al., 2023).

Estas diferencias estructurales **se reflejaron en la cinética de deshidratación** modelada con la **ecuación de Page**, el tratamiento con **1.0 %** mostró **$k = 1.864$ y $n = 0.1579$** , junto con el mayor **coeficiente de determinación ($R^2 = 0.8707$)**, indicando **liberación de humedad progresiva y predecible**; en contraste, **0.5 %** presentó **$k = 1.929$ y $n = 0.132$** , asociados a **pérdida rápida** de agua inicial y miga más **compacta**; **1.5 %** mostró el valor más alto de **$n (0.1807)$** y el menor de **$k (1.827)$** , lo que sugiere un **secado más dominado por difusión interna** en una miga muy aireada (aunque su **$R^2 = 0.7978$** indica **heterogeneidad** espacial del proceso); finalmente, **2,0 %** combinó un **valor elevado de $k (1.916)$** con un **intermedio-bajo (0.1523)**,

consistente con **poros grandes y canales preferenciales** de salida de vapor que aceleran la deshidratación inicial (Buzrul, 2022; Popescu et al., 2023; Zeng et al., 2024).

Este patrón es coherente con la física del horneado, en la que la corteza se seca primero y el interior drena después; la porosidad y la conectividad de los alvéolos condicionan los gradientes de temperatura y humedad y, por ende, la trayectoria de k y n durante el horneado (Chakraborty et al., 2023; Zhang et al., 2025).

Cuantitativamente, a partir de la tabla de frecuencias de la Figura 3, la **mediana (rango intercuartílico, IQR) del área de poro** fue:

- **0.5 % (T1): 0,55 mm² (IQR = 0,38–1,06 mm²), con un 72 % de poros menores de 1 mm² y clase modal de 0,38 mm² (141 poros).**
- **1.0 % (T2): 0.72 mm² (IQR = 0.38–1.39 mm²), un 63 % de poros menores de 1 mm², con un modo de 0.38 mm² (158 poros).**
- **1.5 % (T3): 0.72 mm² (IQR = 0.38–1.39 mm²), un 63 % de poros menores de 1 mm², con un modo de 0.38 mm² (170 poros).**
- **2.0 % (T4): 0.72 mm² (IQR = 0.55–1.56 mm²), un 59 % de poros menores de 1 mm², con un modo de 0.38 mm² (134 poros).**

Estos resultados confirman que los niveles intermedios de levadura (1.0–1.5 %) favorecen una microestructura más fina y homogénea, coherente con una liberación de humedad más gradual, mientras que 0.5 % conduce a una miga más compacta y 2.0 % a un alveolado más abierto e irregular, con mayor heterogeneidad en el secado.

Conclusiones

La quebrada Las Abras presenta una condición ambiental comprometida, donde confluyen múltiples fuentes de contaminación: expansión agrícola, ganadería, vertidos industriales (planta lechera), descargas domésticas y acumulación de residuos sólidos. Los índices ICA-NSF, ABI y ETP evidencian que la calidad del agua es mala en la mayor parte del tramo, inadecuada para riego agrícola o cualquier uso sin tratamiento previo.

Los hallazgos concuerdan con investigaciones similares realizadas en las microcuencas de los ríos Chambo (Freire Rosero et al., 2020) y Mocha (Mosquera Guilcapi & Núñez Moreno, 2023), donde se reportan impactos comparables de las actividades humanas sobre los cuerpos hídricos.

En suma, los resultados de la quebrada Las Abras reflejan un ecosistema altamente perturbado, con alteración de sus propiedades fisicoquímicas, pérdida de biodiversidad acuática y disminución del caudal, confirmando un deterioro integral del recurso hídrico.

Referencias

- APHA/AWWA/WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.).
- Anavitarte, E. J. (2020). *El diseño de investigación no experimental*. AcademiaLab. <https://academia-lab.com/a/rev.lab.derecho/el-diseno-de-investigacion-no-experimental>
- Amaya Lema, M. (2025). *Evaluación del medio físico de la microcuenca del río Guano* [Informe/estudio]. (Referencia citada en el texto; agrega editorial/enlace si lo tienes).
- Brito Noboa, J. P., Merino Gavilanes, D. C., & Patiño Vaca, N. E. (2025). Determinación de curvas de nivel y pendientes con LiDAR para modelar crecidas en la quebrada Las Abras. *Revista Científica Multidisciplinaria InvestiGo*, 6(14), 749–767. <https://doi.org/10.56519/WFW0S854>
- CEPAL. (2023). *Manual para la evaluación de desastres*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/df2fa48c-418c-4b2a-957c-0bdd97181d27/content>
- Collay Acan, L. M., & Pilco Álvarez, N. S. (2025). *Evaluación de la calidad del agua de riego en la quebrada Las Abras de la comunidad de San Pablo perteneciente al cantón Guano* [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Facultad de Ciencias, Carrera de Ingeniería Ambiental.
- Escalona Domenech, R. Y., Infante Mata, D., García Alfaro, J. R., Ramírez Marcial, N., Ortiz Arrona, C. I., & Barba Macías, E. (2022). Evaluación de la calidad del agua y de la ribera en la cuenca del río Margaritas, Chiapas, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 37–56. <https://doi.org/10.20937/RICA.54092>
- Escandón Guachichulca, C. G., & Cáceres Vintimilla, M. E. (2022). *Análisis de la calidad del agua mediante parámetros físicos*,

- químicos y macroinvertebrados bentónicos, en la microcuenca del río San Francisco-Gualaceo.*
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21649>
- Espinoza Sarmiento, F. J. (2020). *Evaluación de la calidad del agua en la quebrada El Salado mediante la aplicación del índice de calidad de agua (NSF), parroquia El Valle, cantón Cuenca* [Tesis, Universidad de Cuenca].
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34103>
- FAO. (2020). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura (SOLAW)*.
www.mundiprensa.com
- Fernández Cirelli, A. (2020). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*.
<https://www.redalyc.org/pdf/863/86325090002.pdf>
- Freire Rosero, R. del P., Pino Vallejo, M., Andrade, P., & Mejía López, A. (2020). Chambo river water quality assessment in time of stretching using the ICA-NSF water quality index. *Perfiles*, 1(23). <https://doi.org/10.47187/perf.v1i23.248>
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Chimborazo. (2018). *Coordinación de Gestión de Riego: Rehabilitación y mejoramiento del sistema de riego Las Abras (conducción principal tramo Hacienda San Pablo-La Esperanza)*.
www.chimborazo.gob.ec
- González Pérez, E., Ortega Escobar, H. M., Yáñez Morales, M. J., & Rodríguez Guillen, A. (2019). Diagnóstico de indicadores de calidad físico-química del agua en afluentes del río Atoyac. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(1), 30–51.
<https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2019-01-02>
- Gudiño Sosa, L. F., Escalera Gallardo, C., Cruz Cárdenas, G., Moncayo Estrada, R., Silva García, J. T., Flores Magallón, R., Damián Arroyo, M., & Chávez Tinoco, M. A. (2022). Evaluación de la calidad del agua en un río subtropical y tributarios utilizando índices fisicoquímicos y macroinvertebrados acuáticos. *Hidrobiológica*, 32(1), 33–50.
<https://doi.org/10.24275/UAM/IZT/DCBS/HIDRO/2022V32N1/GUDINO>

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista, P. (2023). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.).
- ISO. (2012). *ISO 9308-2:2012. Water quality—Enumeration of Escherichia coli and coliform bacteria—Part 2: Most probable number method*.
- Lazo Oscanoa, C. A., Piscoya Torres, J. A., & Roa Changana, P. J. (2022). Análisis crítico del uso de macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de la calidad del agua en el Sistema Nacional de Gestión Ambiental. *Revista Kawsaypacha*, 9, 140–153. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202201.007>
- Llangari Rivera, C. J. (2023). *Dinámicas socioespaciales y mapeo participativo en la quebrada “Las Abras” de Riobamba/Guano, Ecuador* [Tesis, PUCE]. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/43084>
- MAATE (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica). (2024). *Situación de la calidad de las fuentes hídricas superficiales en Ecuador* [Comunicado/portal institucional]. <https://www.ambiente.gob.ec/>
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Revisión del Anexo 1 del Libro VI del TULSMA: Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua*.
- OMS. (2022). *Calidad del agua y salud: Informe/nota técnica*. (Referencia institucional citada en el texto; añade URL o número de informe si lo tienes).
- ONU-Agua. (2023). *Informe sobre la gobernanza hídrica y prácticas agrícolas sostenibles*. (Referencia institucional citada; añade URL/título exacto si lo dispones).
- Pérez Gómez, G., Alvarado García, V., Rodríguez Rodríguez, J. A., Herrera, F., & Sánchez Gutiérrez, R. (2021). Calidad fisicoquímica y microbiológica del agua superficial del río Grande de Tárcoles, Costa Rica: Un enfoque ecológico. *Cuadernos de Investigación UNED*, 13(1), 17. <https://doi.org/10.22458/URJ.V13I1.3148>
- Pesántez Quintuña, M. K., & Roldán Arias, A. P. (2021). *Relación de la calidad del agua de la quebrada El Salado con el uso de suelo*

- urbano y periurbano de la parroquia Baños* [Tesis].
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/36142>
- Quiroz Fernández, L. S., Izquierdo Kulich, E., & Menéndez Gutiérrez, C. (2020). Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v38n3/riha04317.pdf>
- Quishpe Vázquez, C., García Valdecasas Ojeda, M., Gámiz Fortis, S. R., Castro Díez, Y., & Esteban Parra, M. J. (2018). Variabilidad estacional de los caudales en Ecuador en el período 1964–2014. (Comunicación/capítulo de congreso citado; añade datos completos si los tienes). <https://doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-09>
- Tenesaca Saca, M. E., Reyes Zambrano, J. L., Vallejo Vizhuete, D. P., & Chavarría Párraga, J. E. (2024). Modelación hidrológica e hidráulica para la identificación de zonas de inundación en la quebrada Las Abras, Riobamba. *Revista Científica INGENIAR*, 7(14). <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0220>
- Vásquez Venegas, N. Y., Soria Noroña, L. C., & Chacha Coles, A. L. (2023). Evaluación de calidad del agua en dos puntos de muestreo del río Blanco a través de macroinvertebrados. *Polo del Conocimiento*, 8(3), 705–722. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i3.5331>