



**Caracterización de propiedades térmicas de dos productos obtenidos de la variedad Oryza**

**Sativa de arroz blanco a nivel de laboratorio**

Elaborado por:

Maria Jose Najjar Correa

Edison Fabian Malagón Ramos

Universidad EAN

Seminario de Investigación

Bogotá D.C

3 de septiembre de 2023

## 1. Resumen

Es indiscutible la existencia de diferentes materias primas utilizadas en aplicaciones de transferencia de calor y fuentes energéticas, muchas de estas siguen siendo de gran relevancia, aunque poco sostenibles y nada amigables con el medio ambiente. Por ejemplo, los combustibles fósiles, por esta razón se tiene como objeto indagar y plantear nuevas alternativas para la implementación de materiales orgánicos usualmente considerados residuos en tecnologías de transferencia de calor.

Este informe brinda una investigación sobre el comportamiento de materiales orgánicos como lo son los gránulos de arroz blanco seco comercial y la harina de este, bajo el efecto de la radiación por microondas. Se estudió las propiedades térmicas de cada uno de estos materiales para determinar como este se ve alterado en un tiempo establecido con ayuda de análisis termogravimétricos y de calorimetría diferencial de barrido. Se presentan análisis cuantitativos de la capacidad calorífica no sometida y después de la exposición a microondas de cada uno de estos materiales presentados, determinar temperaturas de degradación de los mencionados y contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías de transferencia de calor, así mismo exponer nuevas formas investigativas para el uso de materiales orgánicos y aprovechamiento de sus propiedades térmicas.

**Palabras clave:** Arroz blanco seco comercial, harina de arroz blanco seco comercial, calor, capacidad calorífica, degradación, materiales orgánicos, TGA, DSC.

## **2. Abstract**

*The existence of different raw materials used in heat transfer applications and energy sources is indisputable; many of these continue to be of great relevance, although unsustainable and not at all friendly to the environment. For example, fossil fuels, for this reason the objective is to investigate and propose new alternatives for the implementation of organic materials usually considered waste in heat transfer technologies.*

*This report provides an investigation into the behavior of organic materials such as commercial dry white rice granules and rice flour, under the effect of microwave radiation. The thermal properties of each of these materials were studied to determine how it is altered in an established time with the help of thermogravimetric analyzes and differential scanning calorimetry. Quantitative analyzes of the non-subjected heat capacity and after exposure to microwaves of each of these materials presented are presented, determining degradation temperatures of the aforementioned and contributing to the development of new heat transfer technologies, as well as exposing new investigative forms. for the use of organic materials and taking advantage of their thermal properties.*

*Keywords: Rice, rice flour, heat, heat capacity, degradation, organic materials.*

## **3. Problema de investigación**

Esta investigación examina como comparar la capacidad calorífica de un grano de arroz blanco seco comercial y una muestra de harina de este, al someterse en intervalos de tiempo a radiación por microondas. La necesidad de utilizar los recursos naturales de manera más efectiva en la vida diaria y aumentar la eficiencia de los recursos en aplicaciones de termistores son las fuerzas impulsoras detrás de esta investigación. En concreto, se inició con la intención de informar

y promover el uso de materiales orgánicos, al tiempo que se brinda nueva información investigativa para contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías de almacenamiento calorífico.

La principal pregunta de investigación de este estudio es: "¿Cómo varía la capacidad calorífica de un mismo material orgánico, en diferente presentación según el tiempo de exposición a la radiación por microondas?" Este estudio compara las capacidades de almacenamiento de calor de los sistemas mencionados e investiga el posible potencial de uso en aplicaciones que involucran métodos de transmisión térmica. A través de esto, se realizaron ensayos a nivel laboratorio para deducir la diferencia en la capacidad de almacenar calor entre el grano de arroz blanco seco comercial y la harina.

Al abordar una cuestión fundamental relacionada con la capacidad calorífica de materiales orgánicos comunes, este proyecto contribuye al conocimiento científico. La relevancia proviene del impacto que esta información puede generar en las prácticas, como en el desarrollo de tecnologías más eficientes para almacenamiento de calor. Además, este estudio presenta una oportunidad para fomentar el uso más eficiente y sostenible de los recursos naturales, apoyando la investigación de materiales orgánicos en el campo de la transmisión de calor.

Las limitaciones del estudio incluyen la elección de dos muestras específicas: grano de arroz y harina de arroz, y el control del tiempo de exposición a la radiación utilizando el microondas como variable independiente. Se esfuerza con estas restricciones para evitar la inclusión de múltiples materiales orgánicos y para simplificar el análisis. Se presupone que, a pesar de que en las prácticas aplicaciones pueden existir otras fuentes de energía, la radiación por microondas es la única fuente de energía para la transferencia de calor en este contexto de laboratorio.

Las técnicas de análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) se utilizan para cuantificar la capacidad calorífica, permitiendo medir la variación de la capacidad calorífica en función del tiempo de exposición a la radiación de microondas. El objetivo final es determinar si esta exposición causa cambios significativos en la capacidad calorífica de las muestras de grano de arroz y harina, y si estos cambios tienen implicaciones prácticas en aplicaciones de transferencia de calor.

#### **4. Objetivos**

##### **4.1. Objetivo general.**

Contribuir al desarrollo de tecnologías de conservación y transferencia de calor, aportar información para modelos futuros de transferencia calorífica y exponer una metodología nueva de estudio.

##### **4.2. Objetivos específicos.**

- Medir y comparar experimentalmente las propiedades de transferencia de calor del grano y del arroz blanco seco comercial.
- Analizar la capacidad calorífica de cada material, siendo sometido a intervalos temporales de radiación por microondas.
- Sustentar la posibilidad de un sistema de transferencia de calor utilizando granos y harina de arroz blanco seco comercial mediante el análisis exhaustivo de los resultados experimentales, modelados y simulaciones.

#### **5. Justificación**

Este estudio explora las propiedades termoquímicas de los materiales orgánicos, en particular, los gránulos y la harina de arroz blanco seco comercial (Arroz Diana Premium), expuestos a radiación de microondas en diferentes intervalos de tiempo. Se enfoca en

comprender la termo conductividad de estos materiales, utilizando análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido para profundizar en su capacidad calorífica bajo estas condiciones (Smith et al., 2020).

El objetivo primordial es optimizar la gestión de recursos naturales y energéticos al considerar el uso de estos materiales como conductores de energía calorífica en sistemas de transferencia térmica regulares. Este enfoque respalda los principios de sostenibilidad y eficiencia energética, lo que puede mejorar los procesos de producción y desarrollar sistemas de almacenamiento y transmisión de calor más eficientes.

Este estudio también propone un método innovador para estudiar la termo conductividad de estos materiales orgánicos, lo que podría ser un marco de referencia para futuras investigaciones en el campo. La relevancia social radica en su contribución a la eficiencia energética, la reducción de costos y la promoción de prácticas sostenibles en diversas industrias (Pérez & Gómez, 2018)..

El impacto potencial en la sociedad es considerable, ya que fomenta la responsabilidad ambiental y un uso más efectivo de los recursos naturales. Además, las posibles aplicaciones de los gránulos y la harina de arroz podrían tener un impacto significativo a largo plazo en la transición energética, tanto en la vida cotidiana como en sectores industriales y económicos.

## **6. Marco teórico**

El almacenamiento de calor ha sido un tema de gran relevancia en diversas aplicaciones de la ingeniería, la búsqueda de materias primas efectivas para el almacenamiento y transferencia de calor ha dado como resultado la obtención de diferentes alternativas. Entre ellas se encuentra la harina y los granos de arroz blanco comercial, resultan ser una solución fácil y viable para la conservación y transferencia de calor de manera sostenible y efectiva.

Los granos de arroz, demuestran ser una solución sostenible, debido a su capacidad de absorber, conducir y almacenar el calor durante tiempos prolongados, liberando dicho calor gradualmente a medida que es necesario. Por otro lado, la harina de arroz al ser la molienda del grano de arroz comparte sus propiedades físicas y químicas por lo cual mantiene una gran similitud en sus propiedades de almacenamiento de calor. Es necesario comprender las propiedades térmicas de ambos materiales y su potencial al ser implementado en las diferentes aplicaciones en las cuales pueda llegar a influir. Este análisis busca demostrar las diferencias y similitudes térmicas de la harina y los granos de arroz, con la finalidad de prologar la vida útil de algunos productos y sistemas con la implementación de un nuevo sistema de almacenamiento eficiente de calor.

A medida que se avanza en esta investigación, se explorará las características únicas de estos materiales y su impacto en aplicaciones prácticas. Además, se considerará cómo los resultados de este análisis pueden contribuir al desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles en el campo de la transferencia de calor y el almacenamiento de energía térmica.

### **6.1. Antecedentes**

Una de las cuestiones fundamentales a las que se enfrenta la sociedad contemporánea es cómo gestionar el calor y la energía. Esto desempeña un papel importante en la mejora de la eficiencia energética y el desarrollo de soluciones energéticas sostenibles. Según Cengel y Boles en su libro *'Thermodynamics: An Engineering Approach'*, el transporte y almacenamiento de calor son elementos esenciales en aplicaciones termodinámicas para alcanzar altos niveles de eficiencia. En este contexto destacan dos recursos naturales: el arroz y la harina de arroz blanco comercial.

En Colombia se han realizado diferentes estudios frente al arroz y su uso como una alternativa en diferentes aplicaciones, por ejemplo, recientemente Ortega y Quispe (2021) realizaron un artículo donde se plantea la cascarilla de arroz como una alternativa de fuente

energética en Colombia. Con el fin de brindar información verídica que de paso al análisis general de uso de energías alternativas y su aporte en la matriz energética.

Según un estudio realizado por Normand (1989) utilizando el método de calorimetría diferencial de barrido (DSC), se obtuvieron curvas térmicas de 20 a 110 °C con velocidades de calentamiento de 0,17-1,33 °C/min a partir de una muestra de referencia y 3 pruebas. Estas pruebas se llevaron a cabo con el grano de arroz y su harina, tras un remojo previo de 45 minutos para alcanzar una humedad relativa del 38-40% a temperatura ambiente. Las curvas térmicas se compararon a lo largo de 270 minutos, y no se observaron diferencias significativas en los resultados. Esto indica que no existe una gran disparidad en los resultados, ya que ambos derivan del arroz. La elección entre ellos dependerá en gran medida de la aplicación específica para la cual se requieran, es decir, qué presentación se ajusta mejor a las necesidades particulares.

## **6.2.Capacidad calorífica**

La capacidad calorífica de una sustancia es una propiedad física que representa la cantidad de energía térmica que puede absorber o liberar cuando se le proporciona una determinada cantidad de calor (Haddad et al., 2005). En otras palabras, es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una sustancia en una cantidad específica. La capacidad calorífica normalmente se expresa en unidades de energía por unidad de temperatura, como julios por kelvin (J/K) o calorías por grado Celsius (cal/°C).

La capacidad de calor es una propiedad importante en termodinámica y se utiliza en una variedad de aplicaciones, incluida la determinación de cambios de temperatura en procesos químicos y físicos, así como la formulación de ecuaciones que describen el comportamiento de gases y sustancias en diversas condiciones.

Esta se puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$q = mc_p\Delta T \quad (1)$$

Donde:

$q$  = flujo de calor

$m$  = la masa de la muestra

$C_p$  = calor específico

$\Delta T$  = diferencia de temperaturas (Temperatura final – Temperatura inicial)

### **6.3. Transferencia de calor**

El proceso mediante el cual la energía térmica se transfiere a través de objetos o espacios se denomina "transferencia de calor" (Kreith et al., 2020). Una idea clave tanto en las ciencias naturales como en la ingeniería es el transporte de calor, que puede ocurrir en una variedad de fenómenos y aplicaciones de ingeniería. Hay tres mecanismos clave que contribuyen al transporte de calor, cada uno con ecuaciones que lo acompañan.

#### **6.3.1. Conducción**

El mecanismo mediante el cual se transfiere calor por medio de colisiones directas entre partículas de un sólido o líquido se llama conducción (Camaraza, 2020). La mayor parte de la producción se produce en materiales puros, y la transmisión de calor entre partículas se produce directamente de un material con mayor transferencia de calor a otro con menor transferencia de calor. La ecuación de Fourier para la conductividad térmica se puede utilizar para expresar la ecuación básica que caracteriza esta transferencia de calor:

Ecuación de Fourier

$$Q = -KA(dT/dX) \quad (2)$$

Donde:

q = flujo de calor

k = coeficiente de conductividad térmica del fluido

A = área de transferencia de calor

dT/dx = gradiente de temperatura a través del fluido

### 6.3.2. Convección

El proceso mediante el cual se transfiere calor dentro de un fluido (gas o líquido) se conoce como convección (Camaraza, 2020). En este proceso, el movimiento de las partículas en el fluido se combina con la transferencia de calor. La transferencia de calor por convección puede ocurrir en diversas circunstancias, como cambios de temperatura atmosférica, congelación y ebullición de líquidos y transmisión de calor en sistemas de calefacción y refrigeración. La ecuación para la transmisión de calor por convección es la siguiente:

$$Q = hA(T_S - T_\infty) \quad (3)$$

Donde:

q = flujo de calor

h = coeficiente de transferencia de calor por convección

A = área de transferencia de calor

T<sub>s</sub> = temperatura de la superficie

$T_{\infty}$  = temperatura del fluido circundante

### 6.3.3. Radiación

El mecanismo en el cual se produce el transporte de calor mediante ondas radiactivas (o electromagnéticas) se llama radiación (Cengel et al., 2019). El proceso por el cual la energía térmica emitida por el espacio o superficie de un objeto es absorbida por otro objeto o superficie se conoce como transferencia de calor radiativa. En zonas de baja temperatura, donde se produce la radiación solar, la calefacción y la transmisión de calor desde fuentes de calor, la transferencia de calor por radiación juega un papel importante. La constante de Stefan-Boltzmann se puede utilizar para expresar la transferencia de calor radiante de las siguientes maneras:

$$q = \sigma \varepsilon A (T_S^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

Donde:

$q$  = flujo de calor

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann

$\varepsilon$  = emisividad de la superficie

$A$  = área de transferencia de calor

$T_S$  = temperatura de la superficie

$T_{\infty}$  = temperatura del entorno circundante

### 6.4. Conservación térmica

El principio físico llamado conservación termodinámica describe cómo se almacena y transforma la energía térmica (Cengel et al., 2019). Esta idea fundamental de la termodinámica es crucial porque ayuda a comprender cómo se transfiere y almacena el calor respetando las leyes de la termodinámica. Los principios básicos de la conservación del calor son los siguientes:

### **7.3.1 Ley de conservación de la energía**

Uno de los principios clave para la conservación del calor es la ley de conservación de la energía. Esta ley establece que la energía no se puede crear ni destruir (Cengel et al., 2019). Por tanto, la cantidad de energía térmica es constante dentro de un sistema termodinámico cerrado. Hay varias formas de transportar energía térmica, pero la energía térmica general de un sistema permanece constante. Esta ley se aplica a los sistemas de transferencia de energía y almacenamiento de calor para pronosticar el flujo de energía.

### **7.3.2. Transferencia de calor**

El mecanismo de transferencia térmica sirve como base para la conservación de energía. Hay tres mecanismos principales que provocan la transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Estos mecanismos explican cómo se transfiere el calor de temperaturas más altas a temperaturas más bajas. La conducción se refiere al movimiento directo de calor entre partículas en un sólido o líquido, mientras que la convección se refiere a la transferencia de calor dentro de un fluido que fluye. El término "radiación" se refiere a la transmisión de calor mediante ondas de radiación electromagnética (ondas de radiación). El mecanismo de transmisión de calor se rige por la ley de conservación del calor y está impulsado por gradientes de temperatura (diferencias de temperatura) (Balaji, 2021).

### **7.3.3. Almacenamiento térmico**

Además del almacenamiento de calor está relacionada la conservación del calor. El proceso de almacenar energía térmica y posteriormente utilizarla se conoce como almacenamiento térmico (Balaji, 2021). Para almacenar energía y luego liberarla según sea necesario, un método de almacenamiento de calor utiliza el principio de conservación del calor. Estos sistemas de

almacenamiento de calor se utilizan en energía solar y geotérmica, así como en sistemas de refrigeración y calefacción de edificios.

#### **7.3.4. Difusión térmica**

La difusión termoiónica está relacionada con la retención de calor. El término "difusión térmica" se refiere a la transferencia de calor desde un área con alta temperatura a un área con baja temperatura (Cengel et al., 2019). Este es uno de los procesos naturales que mantienen el equilibrio termodinámico y tiene lugar de acuerdo con las leyes termodinámicas.

#### **7.4. Granos de arroz**

Los granos de arroz son una buena alternativa para el almacenamiento de calor, así como, su capacidad para absorber y retener calor durante tiempos prolongados y luego liberándolo progresivamente, esto se debe a su composición física y química.

El grano de arroz se compone principalmente de almidón, Las moléculas de almidón son polímeros del monosacárido glucosa. “El almidón de arroz está integrado primeramente por dos polímeros: amilosa y amilopectina. Su composición aproximada es 80% de amilopectina y un 25% de amilosa, pero esta cantidad varía en función de su variedad (integral y blanco) y su procesado. Este es el principal componente del grano de arroz (70-80%) el cual se conserva en el endospermo de este.” (Chen et al. 1998)

El arroz tiene una capacidad calorífica alta en comparación a otros materiales, es decir, este puede absorber una cantidad significativa de calor antes de que su temperatura aumente a niveles críticos. Esto se debe a que se compone principalmente de almidón el factor clave de su capacidad calorífica que se encuentra alrededor de  $8,516 \times 10^{-6} \text{ kJ/g}^\circ\text{C}$ . Por otra parte, es un material de alta densidad que tiene el beneficio de almacenar calor en espacios más reducidos por lo cual se considera una ventaja frente a otros materiales no tan densos. Un material de baja conductividad

térmica baja puede llegar a ser útil dependiendo del caso en el cual se necesita, este tipo de material es fácil de reconocer debido a que libera el calor que mantiene almacenado lentamente.

En la siguiente ilustración se puede evidenciar una aproximación de la composición del arroz de diferentes especies y presentaciones.

Fracciones	Proteína cruda (gN*5,95)	Grasa cruda (g)	Fibra cruda (g)	Ceniza cruda (g)	Carbohidratos presentes (g)	Energía (kcal)	Densidad (g/ml )
Arroz con cáscara	5,8-7,7	1,5-2,3	7,2-10,4	2,9-5,2	64-73	378	1,17-1,23
Arroz integral	7,1-8,3	1,6-2,8	0,6-1,0	1,0-1,5	73,0-87,0	363-385	1,31
Arroz elaborado	6,3-7,1	0,3-0,5	0,2-0,5	0,3-0,8	77,0-89,0	349-373	1,44-1,46
*Salvado de arroz	11,3-14,9	15,0-19,7	7,0-11,4	6,6-9,9	34,0-62,0	399-476	1,16-1,29
**Cáscara de arroz	2,0-2,8	0,3-0,8	34,5-45,9	13,2-21,0	22,0-34,0	265-332	0,67-0,74

**Ilustración 1.** Composición aproximada del arroz con cascara al 14% de humedad. Fuente: Juliano, 1994. Tomado de Rodríguez. M. (2007). Determinación de la composición química y propiedades físicas y químicas del pulido de arroz.

#### 7.4.1. Oryza Sativa

“Especie perteneciente a la familia de las Poaceas (gramineas), comúnmente llamado arroz, cuya semilla es comestible y constituye la base de la dieta de casi la mitad de la población mundial” (INaturalistEC, s,f). Crece con facilidad en climas tropicales, aunque también puede crecer en ambientes diversos.

Se empezó a cultivar simultáneamente en varios países hace más de 8 milenios. Se domesticaron dos especies de arroz, el arroz asiático (*Oryza Sativa*) y el africano (*Oryza glaberrima*). Los cultivos de Secano se establecieron por primera vez en Japón y Corea alrededor del año 1000 a.C. El posterior arroz de inundación utilizado en la agricultura intensiva se originó

en Corea entre el 850 y el 500 a.C. y emigró a Japón a través del pueblo Yayoi alrededor del año 300.

Alrededor del año 800, *O. sativa* comenzó a aclimatarse en Europa del Medio Oriente y el Mediterráneo. Cuando conquistaron la Península Ibérica en el año 711, los árabes la trajeron allí. A partir de mediados del siglo XV, durante las grandes exploraciones europeas, el arroz se extiende por todo el continente, primero a Francia y luego a toda Italia. El arroz, quizás procedente de Madagascar, llegó a Carolina del Sur alrededor de 1694. A principios del siglo XVII, los españoles trajeron el arroz a América del Sur (iNaturalistEc, s.f).



**Ilustración 2.** Ilustración de la especie de arroz *Oryza Sativa*. Tomado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Oryza\\_sativa](https://es.wikipedia.org/wiki/Oryza_sativa)

Se estudiará esta especie de grano de arroz ya que la referencia de arroz comercial que se manejará es el Arroz Diana Premium, el cual proviene de la semilla *Oryza Sativa*, planta de origen asiático que se siembra entre los 0 y 800 metros sobre el nivel del mar, en terrenos planos con retención de humedad. En Colombia esta especie se siembra en casi todos los departamentos, resaltando al centro del país (Tolima Grande) con un porcentaje aproximado de cuarenta de la producción nacional y los Llanos orientales con otro porcentaje igual a cuarenta, el porcentaje restante se distribuye en Costa, Santander, bajo Cauca y otros (Vélez, 2021).

### **7.5. Harina de arroz**

La harina de arroz es una opción sostenible de conservación de calor, de igual forma que el arroz, pero a diferencia de este, la harina no retiene humedad en su interior por sus características físicas.

Este también es encontrado como cascara de arroz la cual tiene ciertas ventajas frente al grano ya que al ser este la molienda elimina en gran manera la humedad que puede llegar a retener el grano. La transformación de las propiedades fisicoquímicas de la cáscara comienza por encima de los 750°C, lo cual le garantiza un amplio rango de estabilidad térmica. (Ortega, 2021).

Además, su composición física y química se mantiene notablemente similar, lo que les confiere características compartidas en términos de almacenamiento, transferencia, composición y conductividad. A pesar de esto, existen diferencias sutiles, especialmente cuando el arroz se muele para convertirse en harina, por lo cual se genera una pérdida de humedad. Estas variaciones pueden resultar beneficiosas en ciertas aplicaciones específicas.

### **7.6. Análisis Termogravimétrico**

La técnica de análisis termogravimétrico (TGA) es un método termodinámico que consiste en medir cómo varía la masa de una muestra a lo largo del tiempo mientras se modifica la temperatura o se mantiene constante durante un período específico. (INFINITIA, 2023) Se utiliza para evaluar diversas propiedades y composición de materiales, como tasas de descomposición, evaporación, oxidación, pureza de la sustancia, entre otras.

El TGA se aplica ampliamente en diversas industrias, como la farmacéutica, alimentaria, medioambiental y petroquímica, para determinar la composición, pureza, reacciones de descomposición, temperaturas de descomposición y absorción de humedad en productos.

En cuanto a la metodología, el proceso de análisis termogravimétrico implica calentar gradualmente una muestra bajo condiciones controladas (como aire, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, He, Ar, etc.) mientras se registra la pérdida de peso causada por sustancias semi-volátiles y contaminantes en descomposición, así como la evaluación de la humedad y cenizas presentes.

Este se lleva a cabo en etapas, donde la temperatura en el horno aumenta linealmente o se mantiene constante en cada una de ellas, provocando reacciones termoiónicas con la sustancia en estudio. La masa de la muestra se monitorea de manera continua para detectar cualquier cambio a lo largo del proceso. De esta manera, se puede identificar y registrar cualquier modificación en el peso de la sustancia, dependiendo de la temperatura o el tiempo transcurrido.

Este análisis se realiza utilizando un dispositivo denominado analizador termogravimétrico, que consiste en un horno que alberga un platillo de muestras y está equipado con una balanza de alta precisión. A medida que se calienta la muestra en el platillo, esta balanza, que es extremadamente sensible y se encuentra fuera del horno, es capaz de registrar incluso las variaciones más mínimas en la masa de la sustancia ubicada en el platillo de la muestra (Infinitia Industrial Consulting, s.f).

Debido a las variaciones en el peso a lo largo del tiempo, existen tres enfoques diferentes en el análisis termogravimétrico, cada uno aplicando calor de manera distinta. Los tres tipos de TGA se describen a continuación:

#### **7.6.1. Termogravimetría isotérmica o estacionaria**

En este método, se mantiene una temperatura constante durante todo el proceso de análisis. La muestra se somete a esta temperatura constante y se registra cualquier cambio en su masa a medida que se produce (Infinitia Industrial Consulting, s.f).

#### **7.6.2. Termogravimetría dinámica**

En este enfoque, se aplican cambios de temperatura de manera lineal y continua. La temperatura aumenta de manera constante a lo largo del tiempo, lo que permite observar cómo la masa de la muestra varía a medida que la temperatura cambia de manera gradual (Infinitia Industrial Consulting, s.f).

### **7.6.3. Termo gravímetro**

Este método implica una serie de incrementos de temperatura. En lugar de mantener una temperatura constante o aumentarla de manera continua, se realizan aumentos de temperatura en etapas o pasos. En cada etapa, la temperatura se mantiene estable durante un período de tiempo antes de aumentar a la siguiente temperatura predefinida. La masa de la muestra se monitorea en cada una de estas etapas para evaluar cómo reacciona a cambios discretos de temperatura (Infinitia Industrial Consulting, s.f).



**Ilustración 3.** Representación gráfica del equipo de Medición Termogravimétrica. Tomado de:

<https://www.directindustry.es/prod/ta-instruments/product-38477-1941304.html>

### **7.7. Calorimetría Diferencial de Barrido**

Mediante la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC), es posible evaluar la estabilidad de proteínas y otras biomoléculas en su estado original. Esto se logra al medir la

variación de temperatura que ocurre durante el proceso de desnaturalización térmica de la molécula, al calentarla a una velocidad constante.

### **7.7.1. Principio de medición**

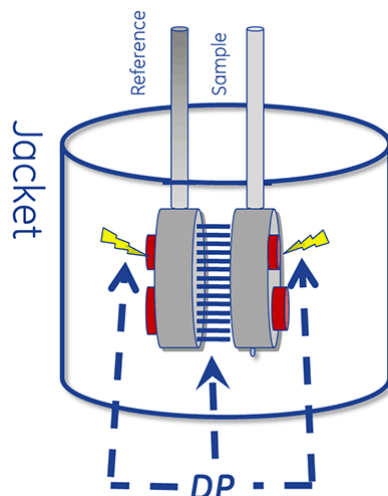
Según Malvern (2023) una biomolécula en solución se encuentra en un equilibrio entre sus formas naturales (plegadas) y desnaturalizadas (desplegadas). La estabilidad de la molécula se relaciona directamente con la temperatura de transición termodinámica ( $T_m$ ), siendo una  $T_m$  más alto indicativa de una mayor estabilidad. La técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC) se utiliza para medir la entalpía ( $H$ ) de des plegamiento, que es el resultado de la desnaturalización causada por el calor, así como para calcular el cambio en la capacidad térmica de la desnaturalización ( $C_p$ ).

El DSC tiene la capacidad de aportar claridad sobre las variables que afectan la estabilidad y el plegamiento de las biomoléculas nativas. Estas variables incluyen interacciones hidrofóbicas, enlaces de hidrógeno, cambios en la entropía conformacional y el entorno físico en el que se encuentra la biomolécula.

Los datos precisos y de alta calidad obtenidos a través de la calorimetría diferencial de barrido (DSC) brindan información esencial sobre la estabilidad de las proteínas en el desarrollo de procesos y en la formulación de posibles candidatos terapéuticos.

Las macromoléculas más grandes, como las proteínas, ácidos nucleicos y lípidos (con un peso molecular superior a 5,000 daltons), tienen la capacidad de formar estructuras bien definidas que pueden experimentar cambios conformacionales inducidos por el calor. Estos reajustes en la estructura dan lugar a la absorción de calor debido a la redistribución de las interacciones no covalentes. La técnica utilizada para medir esta absorción de calor es el calorímetro diferencial de barrido (DSC).

## 7.7.2. Funcionamiento



**Ilustración 4.** Ilustración de ejemplo de distribución interna del equipo DSC. Tomado de:

<https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/microcalorimetry/differential-scanning-calorimetry#:~:text=La%20calorimetr%C3%ADa%20de%20barrido%20diferencial,calienta%20a%20un%20ritmo%20constante.>

### 7.7.2.1. Configuración de las celdas

El núcleo del sistema DSC consta de dos celdas, una de referencia y otra de muestra. El propósito principal de estas celdas es mantenerse a la misma temperatura mientras se someten a un proceso de calentamiento.

### 7.7.2.2. Generación y análisis de datos

Durante la medición, se aplica un flujo de calor constante a ambas celdas. La celda de muestra contiene la biomolécula o sustancia de interés, mientras que la celda de referencia contiene un material inerte o un solvente similar que no experimentará ninguna transición térmica. A medida que se aumenta la temperatura de manera controlada, la celda de muestra absorberá o liberará calor según las transiciones termodinámicas que ocurran, como la desnaturalización de proteínas.

### 7.7.2.3.Registro de datos

La diferencia en la cantidad de calor absorbido o liberado por la celda de muestra en comparación con la celda de referencia se registra como una curva. Esto proporciona información sobre los cambios en la entalpía (energía térmica) a medida que la biomolécula se somete a cambios conformacionales.

### 7.7.2.4.Análisis de datos

Para obtener información más detallada, se normaliza la curva DSC en relación con la concentración de la biomolécula. El área bajo el pico en la curva normalizada se utiliza para determinar la entalpía de la transición, medida en calorías o julios por mol. Además, en ciertas circunstancias, es posible ajustar modelos termodinámicos a los datos para calcular otros parámetros como la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ), la entalpía de Van't Hoff ( $\Delta H_{vH}$ ), la entropía ( $\Delta S$ ) y el cambio en la capacidad calorífica ( $\Delta C_p$ ) asociado con la transición.



**Ilustración 5.** Representación gráfica del equipo de medición de calorimetría diferencial de barrido. Tomado de:

<https://www.tainstruments.com/dsc-250/>

## 8. Diseño metodológico

El enfoque de esta investigación es principalmente cuantitativo, ya que se busca cuantificar y medir de manera precisa la variación en las propiedades térmicas de las muestras de grano de arroz blanco seco comercial y harina de arroz blanco seco sometidas a radiación por microondas en función del tiempo a escala de laboratorio. Este enfoque cuantitativo permite la recopilación de datos numéricos y la aplicación de análisis estadísticos para obtener conclusiones sustentadas en evidencia cuantitativa.

El alcance de la investigación se centra en una comparación detallada de las propiedades termogravimétricas y calorimétricas de estas dos muestras específicas, antes y después de la exposición a radiación por microondas. El estudio no incluye la manipulación de variables ni la realización de experimentos en poblaciones más amplias, lo que lo sitúa dentro de un alcance no experimental. Además, el diseño de investigación es transversal, ya que se recolectan datos en un solo momento, antes y después de la exposición a microondas, sin seguimiento a lo largo del tiempo.

Las variables de este estudio se definen de la siguiente manera:

- Variable independiente: Tiempo de exposición a radiación por microondas.  
Se mide en minutos.
- Variables dependientes:  
Capacidad calorífica de las muestras de grano de arroz y harina. Se mide en julios por gramo por grado Celsius ( $J/g^{\circ}C$ ).  
Temperaturas de degradación de las muestras. Se miden en grados Celsius ( $^{\circ}C$ ).

La población en este caso consiste en todas las muestras de grano de arroz blanco seco comercial y harina de arroz blanco seco comercial disponibles. Dado que el estudio se

lleva a cabo en un entorno de laboratorio, la población es finita y conocida. La muestra se selecciona utilizando un muestreo por conveniencia, ya que se toman muestras de grano de arroz y harina fácilmente accesibles para los experimentos.

En cuanto a la selección de métodos e instrumentos para la recolección de información:

Se utilizan equipos especializados de análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) para medir las variaciones de masa y capacidad calorífica a medida que se calientan las muestras.

Para la exposición a radiación por microondas, se diseña un sistema experimental en el laboratorio, y se controla el tiempo de exposición. La temperatura durante la exposición se mide con precisión para garantizar condiciones de tratamiento controladas.

Para el análisis de datos, se procesan los resultados obtenidos de los experimentos TGA y DSC. Se realiza una comparación de las propiedades térmicas de las muestras antes y después de la exposición a microondas.

La interpretación y conclusiones se basan en la comparación de los resultados experimentales y los modelos matemáticos desarrollados. Se discuten las implicaciones de los hallazgos para el desarrollo de tecnologías de transferencia de calor.

El diseño metodológico de esta investigación se estructura en varias etapas claramente definidas. Comienza con la obtención y preparación de las muestras, que incluyen gránulos de arroz blanco seco comercial y harina de arroz blanco seco comercial (Arroz Diana Premium). Posteriormente, se procede a la realización de análisis termogravimétricos (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) con el fin de evaluar las propiedades termogravimétricas y calorimétricas de las muestras, tanto antes como después de la

exposición a radiación por microondas. La exposición a microondas se lleva a cabo en intervalos predefinidos, y se monitorea cuidadosamente la temperatura durante el proceso para garantizar condiciones de tratamiento precisas. Los datos obtenidos se someten a un análisis minucioso para comparar las propiedades térmicas antes y después de la exposición a microondas. Además, se desarrollan modelos matemáticos que describen la variación de la capacidad calorífica y las propiedades termogravimétricas en función del tiempo de exposición. Esta metodología se emplea con el propósito de mejorar la comprensión de los procesos de transferencia de calor y promover la utilización eficiente de materiales orgánicos en aplicaciones tecnológicas. En las secciones subsiguientes, se detallarán las etapas y procedimientos específicos de cada aspecto de este diseño metodológico para una comprensión más pormenorizada.

### **8.1. Selección y Preparación de Muestras**

- Adquisición de los gránulos de arroz blanco seco comercial y la harina de arroz blanco seco comercial (Arroz Diana Premium) como muestras de estudio.
- Almacenamiento adecuado de las muestras para mantener su integridad antes de los experimentos.
- Determinación de las características físicas iniciales de las muestras, incluyendo masa, estructura y otras variables relevantes.

### **8.2. Análisis Termogravimétrico (TGA)**

- Configuración de un equipo de análisis termogravimétrico (TGA) para medir la variación de masa de las muestras a medida que se calientan.
- Preparación de muestras de tamaño uniforme y peso conocido para su análisis en el TGA.

- Realización de un ensayo TGA.
- Calentamiento gradual de las muestras desde temperatura ambiente hasta un valor máximo definido (por ejemplo, 600°C) a una velocidad controlada.
- Registro continuo de la pérdida o ganancia de masa a medida que se eleva la temperatura.
- Análisis de las curvas TGA resultantes para determinar las temperaturas de degradación y los cambios de masa en función de la temperatura.

### **8.3. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)**

- Configuración de un equipo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) para evaluar las transiciones térmicas y la capacidad calorífica de las muestras.
- Preparación de muestras para el análisis DSC, asegurando la homogeneidad y la uniformidad del tamaño. Debido al tamaño del pan a utilizar en el DSC, se adaptaron los tamaños del grano y se midió el peso en una balanza buscando que las muestras tuvieran homogeneidad en el respectivo peso.
- Realización de experimentos DSC para cada una de las ocho muestras. 2 sin exposición a la radiación y una con exposición a la radiación en intervalos de 20, 25 y 30 segundos respectivamente.
- Calentamiento gradual de las muestras desde temperatura ambiente hasta una temperatura máxima definida.
- Registro de los cambios de calor específico diferencial en función de la temperatura.
- Análisis de las curvas DSC para determinar las temperaturas de transición y las entalpías asociadas.

### **8.4. Exposición a Radiación por Microondas**

- Diseño de un sistema experimental para exponer las muestras a radiación por microondas durante intervalos de tiempo definidos.
- Realización de ensayos de exposición a microondas para ambas muestras, controlando el tiempo de exposición.
- Medición de la temperatura durante la exposición para controlar las condiciones de tratamiento.

### **8.5. Análisis de Datos**

- Procesamiento de los datos recopilados durante los experimentos TGA y DSC.
- Comparación de las propiedades térmicas de las muestras antes y después de la exposición a microondas.
- Interpretación de los resultados para determinar cómo la capacidad calorífica y las temperaturas de degradación se ven afectadas por la radiación por microondas.

### **8.7. Interpretación y Conclusiones**

- Interpretación de los resultados experimentales y comparación con los modelos desarrollados.
- Conclusiones sobre cómo varía la capacidad calorífica de los materiales orgánicos en diferentes presentaciones en función del tiempo de exposición a la radiación por microondas.
- Discusión de las implicaciones de los hallazgos para el desarrollo de tecnologías de transferencia de calor.

### **8.8. Documentación y Presentación**

- Documentación detallada de todos los procedimientos y resultados obtenidos.

- Preparación de informes y presentaciones para comunicar los hallazgos de la investigación.

### **8.9. Evaluación de la Validación y Reproducibilidad**

- Realización de experimentos de validación y verificación de la reproducibilidad de los resultados.

## **9. Análisis de Resultados**

A continuación, se presentan los análisis de los resultados obtenidos a través de los experimentos. Estos análisis se centran en las variaciones en la capacidad calorífica y las propiedades térmicas de las muestras de gránulos de arroz blanco seco y harina de arroz blanco seco, tanto antes como después de la exposición a radiación por microondas. Los resultados se discutirán en detalle en las siguientes secciones para identificar tendencias, cambios significativos y su relevancia en el contexto de las tecnologías de transferencia de calor y la gestión de recursos naturales.

### **9.1. Análisis Termogravimétrico TGA**

Se efectuó un análisis termogravimétrico (TGA) del grano de arroz seco (Ilustración 6), revelando una temperatura de degradación inicial de aproximadamente 312.5°C, donde se observa como su porcentaje de peso disminuye considerablemente. Este hallazgo proporcionó la base para realizar un análisis posterior utilizando calorimetría diferencial de barrido (DSC) para investigar las propiedades caloríficas del grano antes de alcanzar su temperatura de degradación. Se sometió el grano a un rango de temperaturas desde ambiente hasta 200°C, permitiendo la medición precisa de su capacidad calorífica en este intervalo térmico.

Sin embargo, es importante señalar que durante el análisis TGA, se presentaron ciertas inconsistencias en el porcentaje de cambio de masa. Estas discrepancias se atribuyen a vibraciones externas que afectaron el equipo TGA, ya que este es altamente sensible a tales condiciones. El entorno donde se realizaron las pruebas estaba constantemente expuesto a movimientos de maquinaria pesada, lo que explicaría el comportamiento anormal observado en las gráficas. Además de las vibraciones externas causadas por la maquinaria pesada, diversas condiciones ambientales, como fluctuaciones en la humedad, cambios abruptos de temperatura, presencia de contaminantes atmosféricos y la exposición prolongada de la muestra a estas condiciones antes del análisis, podrían haber contribuido a las inconsistencias observadas en las gráficas del análisis termogravimétrico (TGA). La sensibilidad del equipo TGA a estos factores ambientales subraya la importancia de considerar cuidadosamente el entorno de prueba y la calibración del equipo para interpretar de manera precisa los resultados obtenidos durante el estudio de la degradación térmica del grano de arroz.

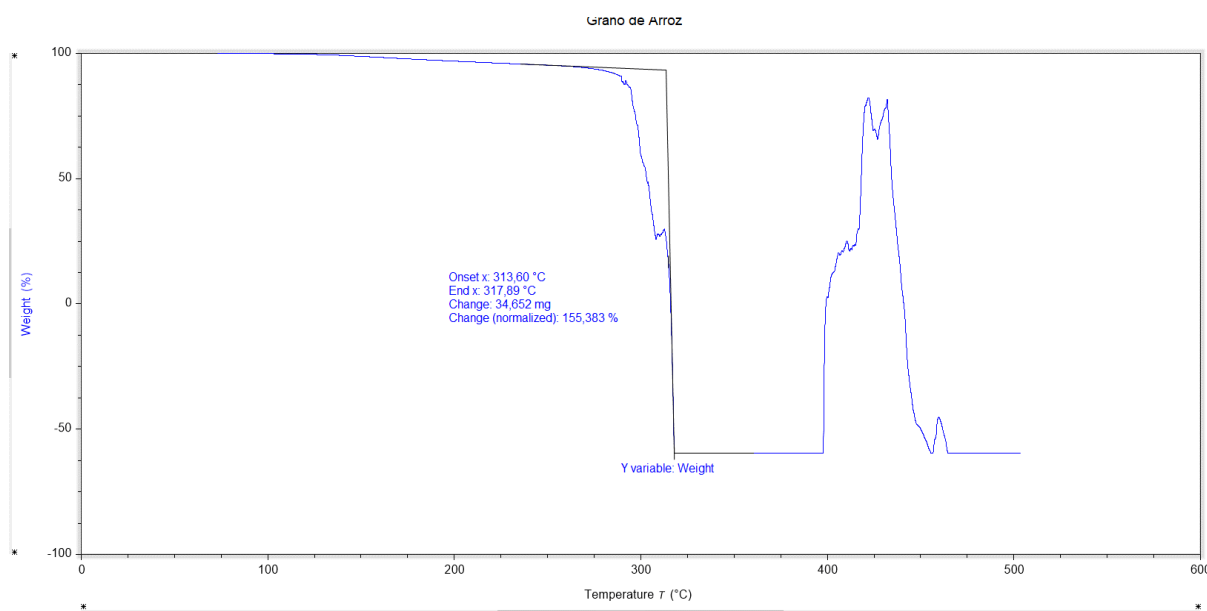
En cuanto a la muestra de harina de arroz, se enfrentó a un desafío particular debido a su estructura altamente dispersa. Esto dificultó significativamente la realización de un análisis termogravimétrico exitoso, ya que el equipo no pudo estabilizarse, lo que impidió la lectura precisa de los datos. Por lo tanto, se decidió basar la experimentación del DSC de la harina de arroz únicamente en la temperatura de degradación obtenida en el análisis del grano de arroz, lo que proporcionó un marco de referencia sólido para la comparación. La decisión de basar la experimentación del DSC de la harina de arroz únicamente en la temperatura de degradación obtenida en el análisis del grano de arroz se fundamenta en la necesidad de establecer un punto de referencia coherente y confiable. Dada la estructura altamente dispersa de la muestra de harina de arroz, que presentó desafíos para la realización de un

análisis termogravimétrico exitoso, la falta de estabilización del equipo dificultó la obtención de datos precisos. Al utilizar la temperatura de degradación del grano de arroz como punto de referencia, se proporciona un marco sólido para la comparación entre las propiedades caloríficas de ambas muestras. Esta estrategia permite contextualizar los resultados de la harina de arroz en relación con el grano, aprovechando la información confiable obtenida previamente y asegurando una interpretación más precisa y significativa de las propiedades térmicas de la harina en ausencia de datos termogravimétricos directos.

Finalmente, con relación a la ilustración 6 que muestra el aumento del porcentaje de masa en cierto punto del análisis, se postula que esto podría haber sido causado por la inflación del grano de arroz. La inflación del grano de arroz, como se postula a partir de la observación del aumento del porcentaje de masa en cierto punto del análisis termogravimétrico (TGA) y respaldada por la evidencia de un aumento en el tamaño físico y el proceso de carbonización al retirar la muestra, sugiere un fenómeno específico que afecta la muestra durante el análisis térmico. La inflación del grano de arroz podría estar relacionada con la liberación de gases o vapores internos debido a procesos térmicos, como la descomposición de componentes orgánicos. Este aumento de volumen podría influir directamente en el porcentaje de masa registrado durante el TGA, generando un incremento puntual. La carbonización posterior de la muestra sugiere que la inflación podría estar asociada con cambios químicos y estructurales significativos en el grano. La comprensión de este fenómeno es crucial para interpretar con precisión las mediciones del TGA y proporciona información valiosa sobre la respuesta del grano de arroz a condiciones térmicas específicas. Esta suposición se respalda con la evidencia de que la muestra, al ser retirada del

análisis, presentaba un tamaño físico mayor y había experimentado un proceso de carbonización.

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar factores externos y las características de las muestras al realizar análisis térmicos, al tiempo que destacan la necesidad de contar con un ambiente de prueba controlado y estable para obtener resultados precisos y significativos.



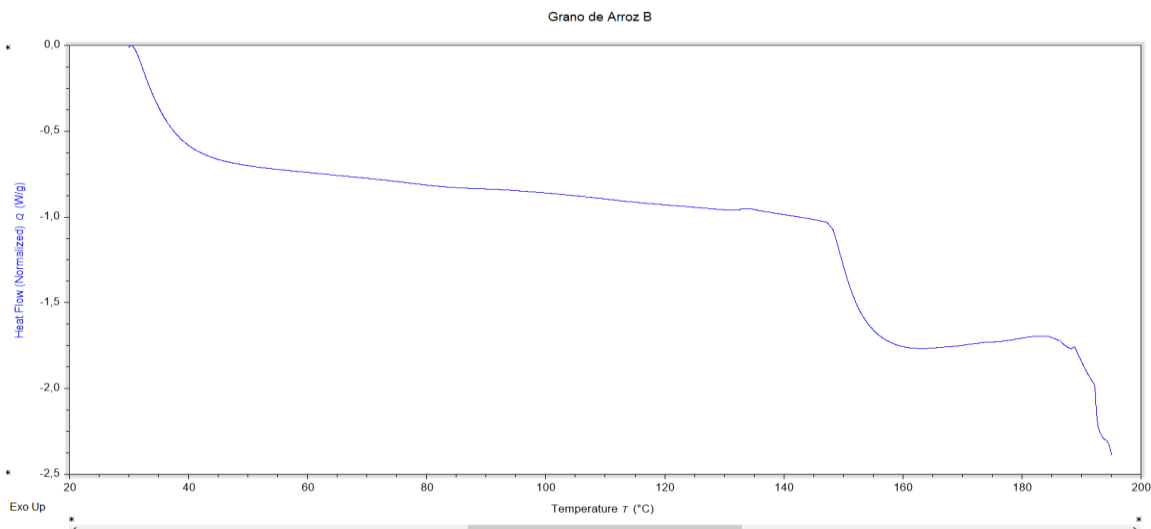
**Ilustración 6.** Grafica representativa de Análisis Termogravimétrico del grano de arroz blanco seco comercial. Elaboración propia

## 9.2. Análisis de Calorimetría diferencial de Barrido

Durante el análisis termogravimétrico (TGA), se obtuvo una temperatura base de degradación del grano de arroz blanco seco, lo que sirvió como punto de partida para la experimentación con la calorimetría diferencial de barrido (DSC). En el análisis DSC, se sometió la muestra a un calentamiento gradual desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 200°C, lo que permitió observar su comportamiento térmico.

Al observar la Ilustración 7, se puede notar que la curva permanece relativamente estable hasta alcanzar una temperatura de alrededor de 150°C, momento en el cual se produce un cambio notable en el flujo calorífico, representado como "Q". Se deduce que este cambio en la curva puede deberse a la degradación de componentes internos del grano de arroz, como el almidón o los carbohidratos presentes en su composición. Este proceso puede ser responsable de las variaciones en la capacidad calorífica de la muestra.

Después de esta degradación inicial, la curva se estabiliza nuevamente antes de experimentar otro declive, que se atribuye a la razón anteriormente mencionada. Es importante señalar que, en este ensayo, no se llevaron a cabo evaluaciones detalladas de los cambios químicos que podrían estar ocurriendo en la composición interna del grano de arroz. La ausencia de evaluaciones detalladas de los cambios químicos en la composición interna del grano de arroz implica que no se realizaron análisis específicos para identificar y caracterizar las transformaciones moleculares y químicas subyacentes durante el proceso de degradación térmica. Esta omisión limita la profundidad de la comprensión respecto a las reacciones químicas específicas que ocurren en el grano de arroz a medida que experimenta cambios térmicos. La falta de un análisis químico detallado impide la identificación de compuestos específicos que podrían estar contribuyendo a las distintas etapas de la curva termogravimétrica, obstaculizando así una interpretación más precisa y mecánica de las variaciones observadas en el peso de la muestra. En consecuencia, la información proporcionada se restringe a una descripción fenomenológica, careciendo de la fundamentación química necesaria para una comprensión exhaustiva de los procesos de degradación térmica en el grano de arroz.



**Ilustración 7.** Grafica representativa de análisis de calorimetría diferencial de barrido para el arroz. Elaboración propia.

Durante el primer ensayo de DSC, se analizó la muestra de arroz sin haber estado expuesta previamente a la radiación por microondas. Luego, se realizaron varios experimentos donde esta muestra se expuso a diferentes intervalos de tiempo en un horno microondas Whirlpool, modelo WM1807B, con una potencia de 700 watts. Se registró la temperatura alcanzada por la muestra después de cada intervalo de exposición, como se muestra en la siguiente tabla:

Masa (g)	Tiempo (seg)	Temperatura (°C)
5,003	5	60,8
5,006	10	78,9
5,004	15	95,4
5,002	20	127,5
5,001	25	156,6
5,001	30	162,75

**Tabla 1.** Datos experimentales de muestras de granos de arroz blanco seco comercial a exposición por intervalos de tiempo a radiación por microondas. Elaboración propia.

El objetivo principal de esta serie de experimentos era determinar cuánto tiempo de exposición se requería para que la muestra alcanzara una temperatura de 140°C. Una vez que se

estableció que, por ejemplo, la muestra alcanzaba 160°C después de 30 segundos de exposición al microondas, se definió un rango de tiempo adecuado para realizar un análisis DSC isotérmico. Este enfoque permitió examinar cualquier cambio en el flujo calorimétrico de la muestra cuando se sometía a estas condiciones específicas de temperatura, lo que arrojaría luz sobre las propiedades térmicas del material bajo el efecto de la radiación de microondas.

Después de obtener los resultados relacionados con las temperaturas alcanzadas durante la exposición a la radiación de microondas, se procedió a realizar tres experimentos de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). En estos experimentos, se seleccionaron muestras que habían estado expuestas al microondas durante 20 segundos, 25 segundos y 30 segundos, respectivamente. El propósito de estos ensayos era obtener una comprensión más detallada de cómo variaba la capacidad calorífica en función del tiempo de exposición a la radiación. Estos análisis permitieron explorar de manera más precisa las propiedades térmicas del material en relación con la duración de la exposición a microondas.

La Ilustración 8 ofrece una comparativa entre las muestras de grano de arroz que fueron sometidas a diferentes tiempos de radiación: 20 segundos (grano 1), 25 segundos (grano 2) y 30 segundos (grano 3). En general, se observa un comportamiento bastante similar entre estas muestras, con excepción de la muestra sometida a 30 segundos. En esta última, se aprecia una reducción en su flujo calorífico, seguida de una posterior estabilización. Esta variación inusual podría atribuirse a reacciones internas que provocan la liberación de energía interna en la muestra, lo que se refleja en el pico descendente observado en el gráfico.

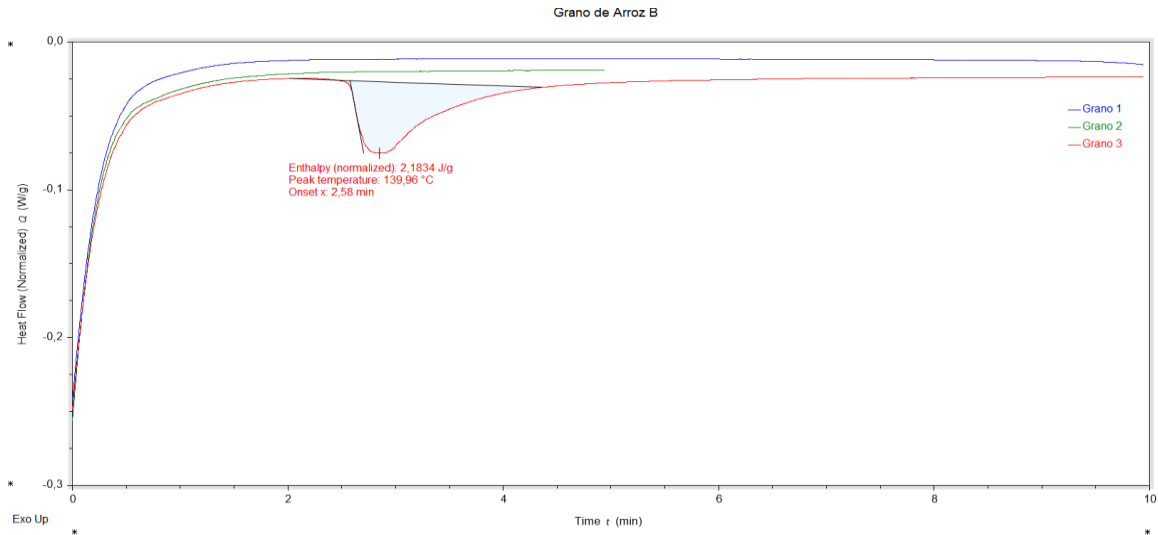


Ilustración 8. Grafica comparativa de análisis de calorimetría diferencial de barrido para tres muestras de arroz. Elaboración propia.

Posteriormente, se replicaron los experimentos en la harina de arroz siguiendo el mismo procedimiento que se aplicó al grano de arroz seco. Se evaluaron tanto la transición térmica en el mismo intervalo de temperatura, desde la temperatura ambiente hasta los 200°C, como los ensayos DSC isoterma a una temperatura de 140°C. En este caso, se observó un comportamiento similar al del grano de arroz, pero con una variación del flujo calorífico mucho más pronunciada a medida que aumentaba la temperatura del sistema. A continuación, en la Ilustración 10 se presenta un gráfico comparativo que ilustra las diferencias entre la muestra de grano de arroz y la de harina de arroz.

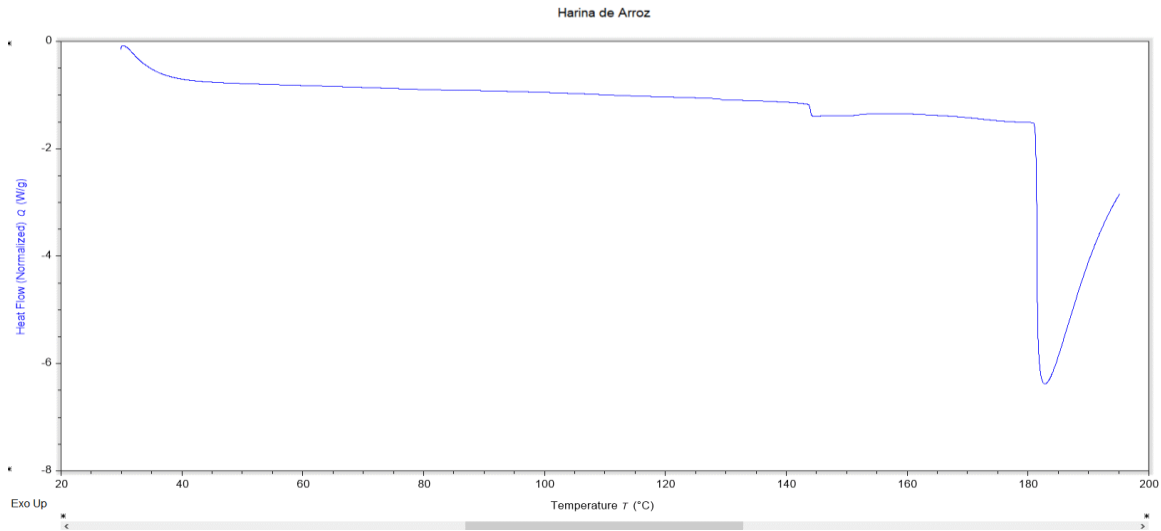


Ilustración 9. Grafica comparativa de análisis de calorimetría diferencial de barrido para la harina arroz. Elaboración propia.

En la Ilustración 10, se presenta un análisis comparativo detallado entre el grano de arroz y la harina de arroz en términos de su respuesta al calor. Esta observación sugiere similitudes notables en el comportamiento térmico de ambas muestras, aunque con matices distintivos que poseen un respaldo fundamentado.

El grano de arroz, en virtud de su estructura más voluminosa y compacta, manifiesta un fenómeno peculiar. La variación de su flujo calorífico se caracteriza por un decrecimiento gradual a medida que la temperatura se eleva. Este perfil se atribuye, en parte, a la limitada capacidad del calor para adentrarse en el interior del grano, demorando el proceso de afectación de su composición. El resultado es la manifestación de una curva DSC que conserva su estabilidad durante un lapso antes de experimentar una disminución apreciable en el flujo calorífico.

Por otro lado, la harina de arroz, con su estructura pulverizada y compacta, evidencia una marcada y rápida respuesta en su flujo calorífico al aumentar la temperatura. Este

comportamiento se origina en la eficiente distribución de calor a lo largo de la muestra, ocasionando una respuesta térmica inmediata y pronunciada.

Estos descubrimientos se sustentan en la divergencia de la capacidad de las muestras para gestionar el calor interno. El grano de arroz, debido a su densidad, demanda un intervalo temporal significativo para permitir la penetración del calor y la consecuente modificación de su estructura interna. Contrariamente, la harina de arroz, con su estructura dispersa, responde con sensibilidad a las alteraciones térmicas.

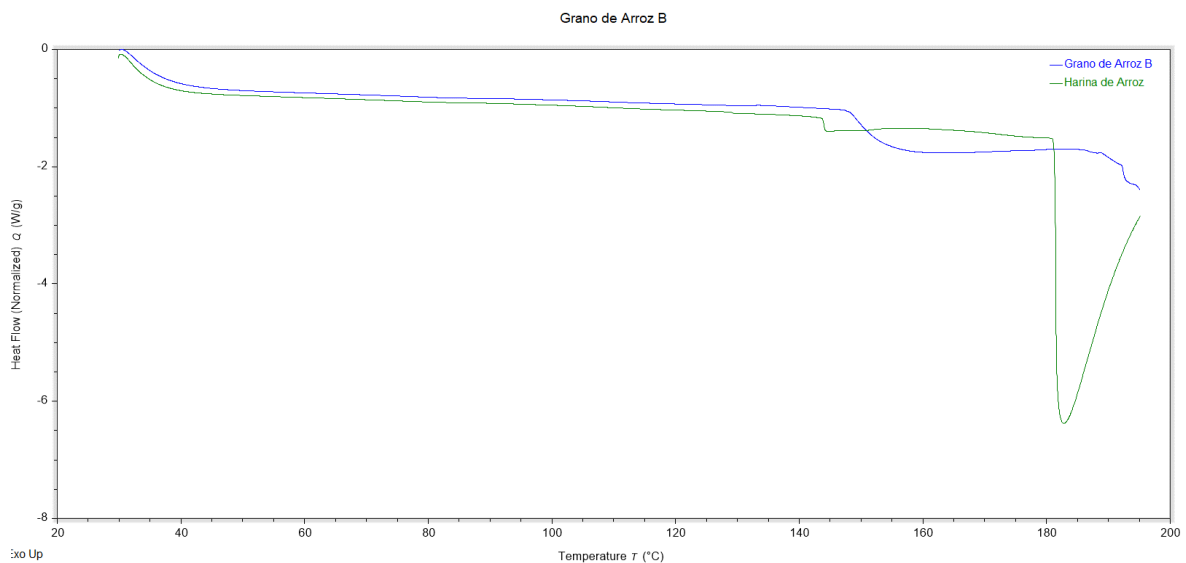


Ilustración 10. Gráfica comparativa de análisis de calorimetría diferencial de barrido del arroz y la harina de arroz. Elaboración propia.

En lo que respecta a la harina de arroz, se aplicaron las mismas condiciones experimentales que en el caso de los granos de arroz. Concretamente, se estudiaron tres muestras de harina sometidas a diferentes intervalos de tiempo en el horno microondas: 20 segundos (harina 3), 25 segundos (harina 2) y 30 segundos (harina 1). De acuerdo con los datos registrados y presentados en la tabla correspondiente, estas muestras alcanzaron temperaturas cercanas al

objetivo establecido. No obstante, se observó una distinción clave. Los datos obtenidos son los siguientes:

Masa (g)	Tiempo (seg)	Temperatura (°C)
5,001	5	52,6
5,002	10	64,8
5,001	15	82,4
5,003	20	115,8
5	25	141,3
5,001	30	153,9

**Tabla 2.** Datos experimentales de muestras de harina de arroz blanca seca comercial a exposición por intervalos de tiempo a radiación por microondas. Elaboración propia.

La variabilidad significativa en la respuesta térmica de la harina de arroz en comparación con los granos de arroz es fundamental. A pesar de que los valores de temperatura logrados en las muestras de harina se asemejaban a los obtenidos con los granos, se identificó una menor temperatura alcanzada debido a la dispersión inherente de la harina.

Este hallazgo subraya la importancia de considerar la presentación de un material, ya que la harina, con su naturaleza pulverizada y dispersa, responde de manera distinta al estímulo de microondas en términos de transferencia de calor. Por tanto, estos resultados plantean cuestiones sustanciales sobre la influencia de la estructura y morfología en la eficiencia de la transferencia de calor y la distribución de temperatura en materiales particulados como la harina de arroz.

La Ilustración 11 detalla un comportamiento estable en las muestras de harina de arroz, con un flujo calorimétrico constante sin importar el tiempo de exposición a microondas. Sin embargo, se destacan diferencias notables en comparación con las muestras de granos de arroz.

En el caso de los granos de arroz, se observa que un aumento en el tiempo de exposición a microondas provoca una disminución en su flujo calorimétrico. Esto se debe a la mayor

complejidad de la estructura de los granos, que requiere más tiempo para que la temperatura se distribuya uniformemente, resultando en una reducción del flujo calorimétrico.

En contraste, las muestras de harina de arroz muestran un comportamiento opuesto. A medida que aumenta el tiempo de exposición, aumenta su flujo calorimétrico en comparación con otras muestras. Esto se debe a la naturaleza más dispersa y pulverizada de la harina, que permite una distribución de temperatura más rápida y homogénea.

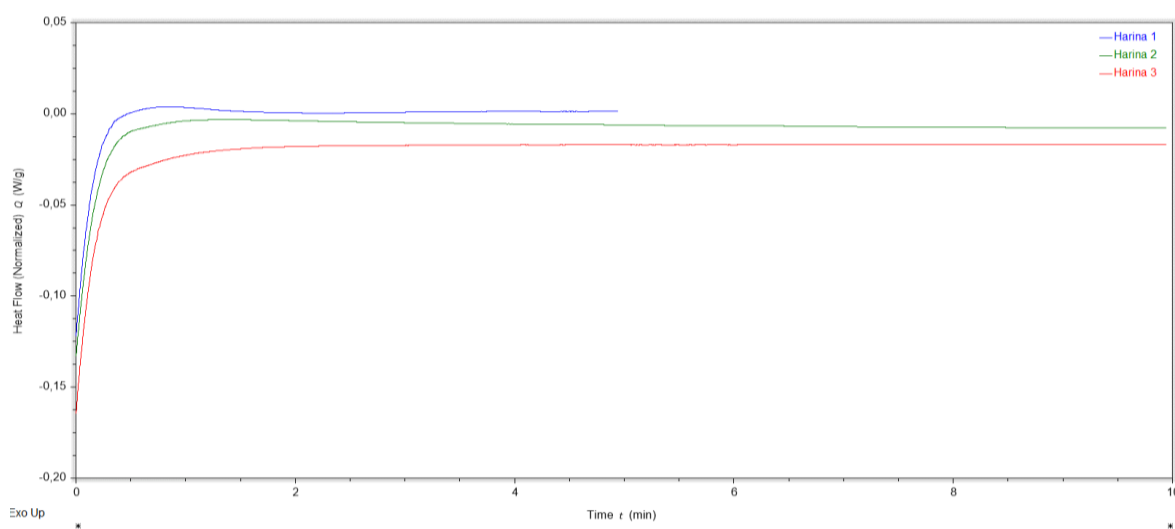


Ilustración 11. Grafica comparativa de análisis de calorimetría diferencial de barrido para tres muestras de harina de arroz. Elaboración propia.

### 9.3. Cálculos de $C_p$ .

Los cálculos de la capacidad calorífica ( $C_p$ ) se llevaron a cabo utilizando los datos recopilados durante las pruebas experimentales. Para determinar  $C_p$ , empleamos una expresión derivada de la ecuación de calor  $q = m * C_p * \Delta T$ , donde  $q$  ya había sido estandarizado previamente con respecto al peso del grano y la harina de arroz. En este sentido, obtuvimos la capacidad calorífica  $C_p$  a partir de la relación  $C_p = q / \Delta T$ , aprovechando el valor de  $q$  que se obtiene directamente de la prueba experimental.

### 9.3.1. DSC grano de arroz blanco

$$t = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$q = -0.986 \frac{W}{g}$$

$$c_p = \frac{q}{t} \quad (5)$$

$$c_p = \frac{-0.986 \frac{W}{g}}{140 \text{ }^{\circ}\text{C}} = -0.00654 \frac{W}{g \cdot ^{\circ}\text{C}} \quad (6)$$

### 9.3.2. DSC grano de arroz blanco muestra #1

$$t = 139.97 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$q = -0.015 \frac{W}{g}$$

$$c_p = \frac{-0.015 \frac{W}{g}}{139.97 \text{ }^{\circ}\text{C}} = -0.00010716 \frac{W}{g \cdot ^{\circ}\text{C}} \quad (7)$$

### 9.3.3. DSC grano de arroz blanco muestra #2

$$t = 139.97 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$q = -0.019 \frac{W}{g}$$

$$c_p = \frac{-0.019 \frac{W}{g}}{139.97 \text{ }^{\circ}\text{C}} = -0.00013574 \frac{W}{g \cdot ^{\circ}\text{C}} \quad (8)$$

### 9.3.4. DSC grano de arroz blanco muestra #3

$$t = 139.97 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q = -0.024 \frac{W}{g}$$

$$c_p = \frac{-0.024 \frac{W}{g}}{139.97 \text{ } ^\circ\text{C}} = -0.00017146 \frac{W}{g * ^\circ\text{C}} \quad (9)$$

### 9.3.5. DSC harina de arroz blanco

$$t = 140^\circ\text{C}$$

$$q = -1.131 \frac{W}{g}$$

$$c_p = \frac{-1.131 \frac{W}{g}}{140 \text{ } ^\circ\text{C}} = -0.00807 \frac{W}{g * ^\circ\text{C}} \quad (10)$$

### 9.3.6. DSC harina de arroz blanco muestra #1

$$t = 139.97^\circ\text{C}$$

$$q = 0.001 \frac{W}{g}$$

$$c_p = \frac{0.001 \frac{W}{g}}{139.97 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0.000007144 \frac{W}{g * ^\circ\text{C}} \quad (11)$$

### 9.2.7. DSC harina de arroz blanco muestra #2

$$t = 139.97^\circ\text{C}$$

$$q = -0.008 \frac{W}{g}$$

$$c_p = \frac{-0.008 \frac{W}{g}}{139.97 \text{ } ^\circ\text{C}} = -0.000057155 \frac{W}{g * ^\circ\text{C}} \quad (12)$$

### 9.2.8. DSC harina de arroz blanco muestra #3

$$t = 139.97^\circ\text{C}$$

$$q = -0.017 \frac{W}{g}$$

$$c_p = \frac{-0.017 \frac{W}{g}}{139.97 \text{ } ^\circ\text{C}} = -0.00012145 \frac{W}{g * ^\circ\text{C}} \quad (13)$$

Los valores de  $C_p$  varían entre las muestras de arroz, disminuyendo de la muestra 1 a la muestra 3. Esto indica posibles diferencias en las capacidades caloríficas entre distintas muestras de arroz, lo que puede estar relacionado con factores como la humedad, calidad del grano y la preparación de las muestras.

Por otro lado, las muestras de harina de arroz muestran valores más bajos y menos variabilidad en sus  $C_p$ , aunque estos valores se sitúan muy cercanos a cero e incluso varían entre negativos y positivos. Este fenómeno podría vincularse con el procesamiento del grano antes de la molienda, el cual podría influir en su capacidad calorífica. La primera muestra de harina de arroz (ecuación 11) exhibe un valor positivo, sugiriendo una capacidad calorífica ligeramente mayor en comparación con otras muestras de harina de arroz.

Estos resultados indican que las muestras de arroz presentan valores de  $C_p$  negativos, lo que sugiere liberación de calor al calentarse. Por el contrario, las muestras de harina de arroz muestran valores de  $C_p$  cercanos a cero o negativos, lo que indica liberación mínima de energía calorífica al calentarse. Estas diferencias podrían asociarse con variaciones en la estructura y composición entre el grano de arroz y la harina de arroz, así como con el proceso de preparación y molienda del grano.

## 10. Referencias

- Arroz (*Oryza sativa*). iNaturalist Ecuador. (s.f). [https://ecuador.inaturalist.org/taxa/61381-Oryza-sativa#cite\\_note-2](https://ecuador.inaturalist.org/taxa/61381-Oryza-sativa#cite_note-2). Consultado el 22 de septiembre de 2023.
- Balaji, C. (2021). *Essentials of radiation heat transfer (1st ed. 2021.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62617-4>
- Bedoya-Hincapie, C. ., Pineda-Gomez, P., & Rosales-Rivera, A. (2009). Optimización de propiedades mecánicas y térmicas de un aglomerado sintético por el Método de Taguchi. *Ingeniería y ciencia (Medellín, Colombia)*, 5(10), 155–.
- Boletín de Arqueología Experimental, 10( 2013-2015)
- Calorimetría de barrido diferencial (DSC). 2014. Malvernpanalytical.com; Malvern Panalytical. <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/microcalorimetry/differential-scanning-calorimetry>
- Camaraza Medina, Y. (2020). *Transferencia de calor por conducción.*. Editorial Universitaria. <https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/lc/bibliotecaean/titulos/126028>
- Camaraza Medina, Y. (2020). *Transferencia de calor por convección.*. Editorial Universitaria. <https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/lc/bibliotecaean/titulos/126029>
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., Kanoglu, M., Navarro Salas, R., & Rojas Tapia, A. (2019). *Termodinámica (9a edición)*. McGraw-Hill.
- Frontmatter. (2008). In *Principles and Applications of Thermal Analysis*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470697702.fmatter>
- Haddad, W. M., Chellaboina, V., & Nersesov, S. G. (2005). *Thermodynamics a dynamical systems approach (Course Book)*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400826971>
- Helloauto.com. Recuperado Septiembre 25, 2023, de <https://helloauto.com/glosario/DSC>

- Iguaz, A ., Arroqui, C ., Esnoz, A ., Vírveda, P. (2004). *Modelling and Simulation of Heat Transfer in Stored Rough Rice with Aeration*. Science Direct. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.05.001
- Infinitiaresearch.com. Recuperado Septiembre 25, 2023, de <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/tga-que-es-el-analisis-termogravimetrico/>
- International Rice Research Institute. (1979). *Chemical aspects of rice grain quality*. IRRI.
- K. G. Mansaray A. E. Ghaly. (1999). *Thermal degradation of rice husks in an oxygen atmosphere*. Energy Sources, 21(5), 453–466. <https://doi.org/10.1080/00908319950014759>
- Kim, A.-N., Kim, O. W., & Kim, H. (2022). *Degradation kinetics of physicochemical and sensory properties of rice during storage at different temperatures*. Lebensmittel-Wissenschaft Und Technologie [Food Science and Technology], 164(113688), 113688. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113688>
- Kreith, F. Manglik, R. M. & Bohn, M. S. (2012). *Principios de transferencia de calor (7a. ed.)*. Cengage Learning. <https://elibro-net.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/es/lc/bibliotecaean/titulos/93216>
- López-Hernández, M. B., López-Castañeda, C., Kohashi-Shibata, J. K.-S., Miranda-Colín, S., Barrios-Gómez, E. J., & Martínez-Rueda, C. G. (2018). Tolerancia a sequía y calor en arroz (*Oryza sativa*). Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 5(15), 373–385. <https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1558>
- Luo, J., Qi, Y., Zhao, Q., Tan, L., Xiang, W. y Rohn, J. (2018). Investigación de las características de flujo y transferencia de calor en granito fracturado. Energías (Basilea) , 11 (5), 1228–. <https://doi.org/10.3390/es11051228>
- Mansaray, K. G., & Ghaly, A. E. (1998). *Thermal degradation of rice husks in nitrogen atmosphere*. Bioresource Technology, 65(1–2), 13–20. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(98)00031-5)
- Marina, Villanueva. Joanna, Harasym. José, Muñoz. Felicidad Ronda. (2018) Microwave absorption capacity of rice flour. Impact of the radiation on rice flour microstructure, thermal and viscometric properties. Journal of Food Engineering. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877417305575>
- Normand, F. L. Marshall, W. E. (1989). Calorimetría diferencial de barrido de arroz molido integral y harina de arroz molido. Cereal. [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1989/Documents/66\\_317.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1989/Documents/66_317.pdf)
- Normand, F. L., & Marshall, W. E. (n.d.). *Differential scanning calorimetry of whole grain milled rice and milled rice Flour*. Cerealsgrains.org. Recuperado Septiembre 25, 2023, de [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1989/Documents/66\\_317.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1989/Documents/66_317.pdf)
- Ortega, Angie. Quispe, María. (2021) Alternativas del uso de la cascarilla de arroz como fuente energética. FUENTES. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8362704>
- «Oryza sativa». Tropicos.org. *Missouri Botanical Garden*. (s.f). Consultado el 22 de septiembre de 2023.

- Perdon, A., Siebenmorgen, T. J., & Mauromoustakos, A. (2000). *Glassy state transition and rice drying: Development of a brown rice state diagram*. *Cereal Chemistry*, 77(6), 708–713. <https://doi.org/10.1094/cchem.2000.77.6.708>
- Propiedades térmicas. (2023). Retrieved from <https://www.infinitiaresearch.com/laboratorio-ingenieria-industrial/propiedades-termicas/>
- “Propiedades Térmicas de las Rocas”. En *Geología de los Cuerpos Ígneos. Correlación Geológica 15*: 11-26. Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán- CONICET. [http://insugeo.org.ar/libros/cg\\_15/capitulo\\_1.htm](http://insugeo.org.ar/libros/cg_15/capitulo_1.htm).
- Saif, S. M. H., Lan, Y., & Sweat, V. E. (2003). *Gelatinization properties of rice flour*. *International Journal of Food Properties*, 6(3), 531–542. <https://doi.org/10.1081/jfp-120021457>
- Tran, T. T. B., Shelat, K. J., Tang, D., Li, E., Gilbert, R. G., & Hasjim, J. (2011). *Milling of rice grains. The degradation on three structural levels of starch in rice flour can be independently controlled during grinding*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8), 3964–3973. <https://doi.org/10.1021/jf105021r>
- Uthumporn, U., Nadiyah, N. I., Koh, W. Y., Zaibunnisa, A. H., & Azwan, L. (2016). Effect of microwave heating on corn flour and rice flour in water suspension. *International Food Research Journal*, 23(6), 2493-2503. Retrieved from <https://login.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/login?url=https://www-proquest-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/scholarly-journals/effect-microwave-heating-on-corn-flour-rice-water/docview/1859446533/se-2>
- Vélez, S. (2021, May 27). Grupo Diana. <https://grupodiana.co/noticia-larga-1/#:~:text=El%20arroz%20marca%20Diana%20proviene,planos%20con%20retenci%C3%B3n%20de%20humedad.>
- Wunderlich, B. (2011). *Do biopolymers behave the same as synthetic high polymers?* *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 106(1), 81–84. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1306-2>
- Xu, Y., Yao, W., Wang, S., & Xia, K. (2020). *Investigation of the Heat-Treatment Effect on Rock Fragmentation Characteristics Using the Dynamic Ball Compression Test*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(5), 2095–2108. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-02038-6>
- Zhao, S., Xiong, S., Qiu, C. y Xu, Y. (2007). Efecto de las microondas en la calidad del arroz. *Revista de investigación de productos almacenados*, 43 (4), 496-502.
- Zhong, Yejun, et al. "Efecto de la irradiación de microondas sobre la composición, estructura y propiedades del arroz (*Oryza sativa* L.) con diferentes grados de molienda". *Revista de Ciencias de los Cereales* 58.2 (2013): 228-233.
- Zhong, Yejun, et al. "Envejecimiento acelerado del arroz mediante tratamiento controlado con microondas". *Química de los alimentos* 323 (2020): 126853.