

**Artículo Original**

***DISEÑO EXPERIMENTAL DE MEZCLAS PARA MOLDEO DE  
PIEZAS FUNDIDAS EN UNA FUNDICIÓN FÉRREA***

***EXPERIMENTAL MIXTURE DESIGN FOR MOLDING  
CASTING IN A FERROUS FOUNDRY***

Jany Granado Ojito<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4197-6590>  
Mayra Caridad Morales Pérez<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7506-0145>  
Pedro Jorge Mollinedo Nodarse<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9974-0935>  
Elena R. Rosa Domínguez<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5371-0976>

<sup>1</sup> Centro Universitario Municipal "Mario Rodríguez Alemán", Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Sagua la Grande, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas", Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Marzo 2, 2026; Revisado: Marzo 17, 2026; Aceptado: Marzo 28, 2026

**RESUMEN**

**Introducción:**

Las fundiciones férreas son sitios significativos de contaminación debido a procesos manuales de moldeo y desmoldeo que generan grandes volúmenes de arena residual, lo que justifica reforzar políticas de desarrollo sostenible mediante alternativas de reutilización.

**Objetivo:**

Evaluar, mediante diseño experimental, mezclas para moldeo de piezas fundidas de hierro en la fábrica "9 de abril" de Sagua la Grande.

**Materiales y Métodos:**

Se aplicó un diseño de experimento basado en el método de enrejado simplex incorporando la arena residual en las nuevas mezclas. El software STATGRAPHIC Centurion 16.1.8 permitió analizar la influencia de cada componente en las propiedades del molde, obtener modelos matemáticos y realizar la optimización multivariable.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Jany Granado, Email: [janygranado90@gmail.com](mailto:janygranado90@gmail.com)



### **Resultados y Discusión:**

El análisis estadístico mostró que el modelo cúbico especial presenta el mejor ajuste para permeabilidad y resistencia, mientras que el modelo cuadrático fue el más adecuado para humedad. La optimización técnica determinó una mezcla con 38 % de arena de retorno, 34 % de arena Arimao y 28 % de bentonita. Sin embargo, la optimización económica redujo costos en 35,4 % al aumentar la arena de retorno (49,1 %) y disminuir bentonita (14,1 %), manteniendo las propiedades dentro de los parámetros de calidad establecidos.

### **Conclusiones:**

La incorporación de arena residual a las mezclas de moldeo resultó técnicamente factible al satisfacer los parámetros de calidad exigidos, alcanzando una reutilización del 49,1 % de arena retorno, una reducción de los costos del 35,4 % y consolidando esta alternativa como una práctica de economía circular.

**Palabras clave:** arena residual; enrejado simplex; fundición; moldeo; optimización.

## **ABSTRACT**

### **Introduction:**

Ferrous foundries are significant pollution sites due to manual molding and shakeout processes that generate large volumes of waste sand, justifying the need to reinforce sustainable development policies through reuse alternatives.

### **Objective:**

To evaluate an experimental mixture design for molding iron castings at the "9 de Abril" Factory in Sagua la Grande.

### **Materials and Methods:**

A designed experiment based on the simplex lattice method was applied, incorporating waste sand into new mixtures. The software STATGRAPHIC Centurion 16.1.8 was used to analyze the influence of each component on mold properties, obtain mathematical models, and perform multivariable optimization.

### **Results and Discussion:**

Statistical analysis showed that the special cubic model provides the best fit for permeability and strength, while the quadratic model was most suitable for moisture. Technical optimization determined a mixture with 38% return sand, 34% arimao sand, and 28% bentonite. However, economic optimization reduced costs by 35.4% by increasing return sand (49.1%) and decreasing bentonite (14.1%), while keeping properties within established quality parameters.

### **Conclusions:**

Incorporating waste sand into molding mixtures proved technically feasible, meeting the required quality parameters, achieving a 49.1% reuse of return sand, a 35.4% cost reduction, and consolidating this alternative as a circular economy practice.

**Keywords:** waste sand; simplex lattice; foundry; molding; optimization.

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los residuos sólidos industriales representan un desafío ambiental global, especialmente los generados por sectores como la metalurgia, la minería, la construcción y la manufactura.

En Europa, la industria de la fundición genera cerca 9 millones de toneladas anuales de arena residual, de las cuales sólo un 25 % se recicla, fundamentalmente en sectores como el cementero, la restauración de suelos o el sellado de vertederos (Saetta & Fratta, 2025). En Cuba, aunque no existen registros oficiales, se estima que las fundiciones producen miles de toneladas de arena usada, principalmente de tipo sílice-bentonita. Estos residuos suelen acumularse en patios o verterse sin tratamiento, provocando pasivos ambientales como lixiviados, emisión de polvo de sílice y contaminación del suelo.

La Unidad Empresarial de Base (UEB) Fábrica “9 de abril” de Sagua la Grande, con más de un siglo de explotación y sin una reconversión tecnológica, enfrenta problemas en la gestión de la arena de moldeo. La arena de retorno, generada en grandes volúmenes, constituye un residuo crítico que incrementa costos e impactos ambientales si no se gestiona adecuadamente.

Ante esta problemática, resulta necesario adoptar un enfoque de economía circular que priorice la valorización y regeneración in situ de la arena, prolongando su vida útil y reduciendo la extracción de arena virgen. Para optimizar la composición de mezclas, el diseño de experimento, particularmente el diseño de mezclas, constituye una herramienta eficaz. Esta metodología, ha evolucionado hacia enfoques avanzados que permiten abordar problemas con restricciones y modelos no lineales, siendo la función de deseabilidad una de las técnicas más empleadas para la optimización multivariable (Cardoso et al., 2023). En el contexto industrial, el diseño de mezclas ha sido ampliamente utilizado en sectores como alimentos, polímeros, concreto y cerámica (Moreno et al., 2023).

En el ámbito de la industria de fundición, en el desarrollo de tecnologías de regeneración de arenas de fundición, según Zhang et al. (2025), la optimización de procesos mediante el diseño de experimentos (DOE) se ha consolidado como una herramienta esencial para mejorar la calidad de las piezas fabricadas. Estudios como el de Pons et al. (2024) demuestran la eficacia de metodologías como la superficie de respuesta (RSM) y el diseño Box-Behnken para identificar y ajustar parámetros claves como el contenido de arcilla, humedad y dureza del molde el fundido, logrando una reducción significativa de piezas defectuosas. Investigaciones recientes han evaluado el efecto de los aglutinantes sobre propiedades específicas del molde. Primaninytyas et al. (2023) analizaron mediante ANOVA la influencia de bentonita y miel de purga en la permeabilidad de arenas verdes, encontrando que la adición de miel de purga incrementa la permeabilidad directamente proporcional, mientras que la bentonita produce el efecto contrario.

Estos trabajos evidencian que el diseño de experimentos permite además de la caracterización sistemática de los factores del proceso, la obtención de configuraciones óptimas que elevan la eficiencia y la calidad de los entornos de la fundición, fundamentando así su aplicación en investigaciones orientadas a la mejora continua en este sector.

Por ello, este estudio tiene como objetivo evaluar, mediante diseño experimental, mezclas para moldeo de piezas fundidas de hierro en la fábrica “9 de abril” de Sagua la Grande.

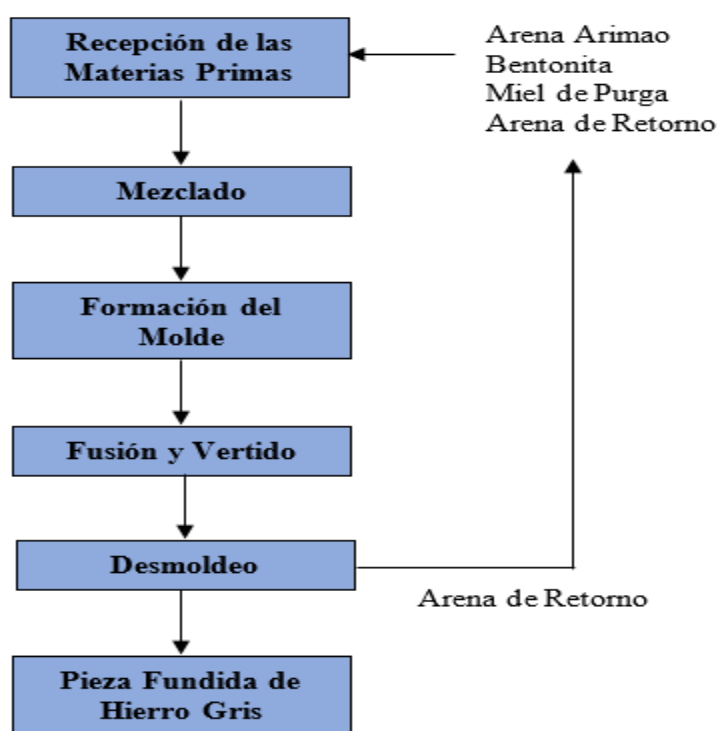
---

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en la UEB Fábrica “9 de abril” ubicada en el municipio de Sagua la Grande en la provincia de Villa Clara, Cuba. Esta industria se especializa en la producción de componentes para la industria azucarera que incluyen mazas, couplings, catalinas y bombas, fundidos en moldes de arena.

### 2.1. Descripción de la etapa de moldeo de piezas fundidas

El proceso tradicional de fundición en moldes de arena comienza con la preparación de la mezcla, compuesta por arena Arimao, arena de retorno, bentonita como aglomerante y miel de purga como aglutinante orgánico. Una vez homogenizada, la mezcla se compacta alrededor del modelo en cajones de moldeo, se retira el modelo y se vierte el hierro fundido para obtener la pieza sólida. En la figura 1 se representa el diagrama de flujo del proceso tecnológico.



**Figura 1.** Diagrama de flujo del proceso de fundición de hierro en la fábrica “9 de abril” de Sagua la Grande

### 2.2. Materiales empleados

La arena Arimao es arena natural de sílice, con granulometría controlada, suministrada por canteras locales, mientras que, la arena de retorno es la regenerada tras el desmoldeo del proceso de fundición, con contenidos de finos acumulados. La bentonita es una arcilla coloidal utilizada como aglomerante y la miel de purga es un subproducto de la industria azucarera.

### 2.3. Diseño experimental

Se desarrolló un diseño experimental de mezclas para determinar la proporción óptima de los componentes principales de arena de moldeo (arena Arimao, arena de retorno,

bentonita y miel de purga), garantizando el cumplimiento de los parámetros de calidad: permeabilidad, resistencia a la compresión y humedad.

Se utilizó un diseño enrejado simple modificado, basado en un modelo centroide simplex, adecuado para estudiar mezclas ternarias (y cuaternarias cuando un componente se mantiene constante) (Cardoso et al., 2023). Este modelo permite evaluar el comportamiento no lineal de las propiedades con un número mínimo de experimentos (Ortega et al., 2015). Se planificó un diseño enrejado simple (3,3) con tres réplicas en el centroide según la tabla 1.

**Tabla 1.** Plan experimental del diseño de mezclas simplex modificado

<i>Corridas</i>	<i>Composición (% p/p)</i>		
	<i>Arena Arimao</i>	<i>Arena de retorno</i>	<i>Bentonita</i>
1	1,000	0,000	0,000
2	0,000	1,000	0,000
3	0,050	0,050	0,900
4	0,500	0,500	0,000
5	0,500	0,000	0,500
6	0,000	0,500	0,500
7	0,333	0,333	0,333
8	0,333	0,333	0,333
9	0,333	0,333	0,333
10	0,333	0,333	0,333

La relación entre las variables de composición y las respuestas se modeló mediante un polinomio de segundo grado con términos de interacción (ecuación 1).

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 \quad (1)$$

Donde  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  representan las fracciones peso de arena Arimao, arena de retorno y bentonita respectivamente, manteniéndose constante la cantidad de miel de purga (200 g en todas las mezclas), componente que tiene un efecto lineal y predecible sobre la permeabilidad. La bentonita presenta interacciones no lineales críticas, su dosificación está establecida industrialmente y fijar este parámetro constante permite utilizar un diseño de mezclas ternarios con modelo cúbico especial reduciendo experimentos

En la tabla 2 se especifica la cantidad de materia prima utilizada en función de la composición del diseño de mezcla y los rangos permisibles de las variables respuestas.

**Tabla 2.** Materias primas y variables respuestas

<i>Composición</i>		0,000	0,050	0,333	0,500	0,900	1,000
$X_1$	Arena Arimao (AA) (kg)	0,0	0,1	0,660	1,0	1,8	2,0
$X_2$	Arena retorno (AR) (kg)	0,0	0,1	0,660	1,0	1,8	2,0
$X_3$	Bentonita (B) (kg)	0,0	0,1	0,660	1,0	1,8	---
$X_4$	Miel	200 g constante en todas las mezclas					
<i>Variables respuestas</i>		<i>Unidad de medida</i>		<i>Valores permisibles</i>			

y1	Permeabilidad	mmH <sub>2</sub> O	≥100
y2	Resistencia	kg/cm <sup>2</sup>	0,8 ≤ y <sub>2</sub> ≤ 1,20
y3	Humedad	%	7,0 ≤ y <sub>3</sub> ≤ 8

\*Nota: Los valores permisibles provienen del Manual Práctico del taller de fundición de la entidad (comunicación personal, 2026)

#### 2.4. Procedimiento experimental

1. Preparación de la mezcla: Se pesaron los componentes según las proporciones definidas en el diseño experimental (tabla 2). La mezcla se preparó siguiendo la secuencia operacional estándar de la fábrica: mezcla inicial de arena (2 min), adición de bentonita (3 min), incorporación de miel de purga (5 min), hasta la homogenización completa.
2. Compactación de probetas: Se utilizó un molde cilíndrico estándar (ø 50 mm x ø 50 mm). La mezcla se compactó manualmente, se niveló y se extrajo de la probeta con un pistón expulsor, verificando su integridad superficial.
3. Medición de propiedades: La permeabilidad se determinó en un permeámetro, registrando el flujo de aire bajo presión controlada. La resistencia a la compresión se midió con una máquina universal, aplicando carga hasta la fractura. La humedad se calculó a partir de la pérdida de peso tras el secado en estufa a 110 °C hasta peso constante.

#### 2.5. Optimización multivariable y análisis de costos

La optimización se realizó mediante dos enfoques complementarios.

##### 2.5.1 Optimización técnica con SATGRAPHICS Centurion

La optimización multivariable se realizó mediante el módulo de optimización de múltiples respuestas del software STATGRAPHICS Centurion 16.1.8, utilizando el método de deseabilidad global de Derringer & Suich, (1980), conforme a la implementación descrita por Cardoso et al. (2023). Este método encuentra la composición que mejor satisface simultáneamente las restricciones establecidas para las propiedades, dentro del espacio del diseño de mezcla simplex, utilizando los modelos estadísticos previamente ajustados para estas variables. Basado en los requerimientos del proceso de moldeo se establecieron las siguientes restricciones:

- Humedad: 7-8 %, Permeabilidad: 100-500 mmH<sub>2</sub>O, Resistencia: 0,8-1,2 kg/cm<sup>2</sup>.
- Las proporciones de los componentes (AA, AR, B) suman 1, con límites no negativos y un máximo de 0,9 para la bentonita.

##### 2.5.1. Optimización económica con Excel Solver

Para incorporar el criterio económico al análisis, se implementó una optimización complementaria mediante Microsoft Excel Solver, utilizando el algoritmo GRG no lineal. La función objetivo de costos se definió a partir de los precios unitarios de las materias primas, obtenidos de las fichas de costos internas de la entidad (UEB Fábrica “9 de abril”, comunicación personal enero 2026).

$$\text{Costo total} = 0,6699 * AA + 0,3349 * AR + 5,7478 * B \quad (2)$$

Donde los coeficientes corresponden a la arena Arimao (0,6699 \$/kg), la bentonita (5,7478 \$/kg) y la arena de retorno (0,3349 \$/kg). Para esta última, se estimó un costo equivalente al 50 % de la arena virgen, considerando que su reincorporación al proceso implica operaciones de recuperación como cribado y transporte, lo que genera un costo inferior al de adquirir material nuevo.

El proceso consistió en exportar los modelos matemáticos ajustados en STATGRAPHICS a Excel, configurar el Solver con las restricciones derivadas de los rangos permisibles de permeabilidad, resistencia a la compresión y humedad, referidas en la tabla 2 y ejecutar la optimización tomando como valores iniciales los puntos óptimos reportados por STATGRAPHIC, con el fin de asegurar la convergencia hacia un óptimo global.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados experimentales presentados en la tabla 3, revelaron una variabilidad significativa en las propiedades de las mezclas en función de su composición. Las mezclas correspondientes al punto central del diseño simplex (corrida 7 a 10) con proporciones iguales de arena Arimao, arena de retorno y bentonita (0,33:0,33:0,33), mostraron los valores más equilibrados, cumpliendo con los rangos permisibles establecidos para las tres variables respuestas.

**Tabla 3.** Resultados de las mediciones experimentales

#	<i>Componentes de la mezcla (kg)</i>			<i>Variables respuestas</i>		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
	<i>Arena Arimao</i>	<i>Arena retorno</i>	<i>Bentonita</i>	<i>Permeabilidad (mmH<sub>2</sub>O)</i>	<i>Resistencia (kg/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Humedad (%)</i>
1	2,0	0,0	0,0	500	0,00	6,0
2	0,0	2,0	0,0	180	0,10	8,0
3	0,1	0,1	1,8	40	0,00	9,5
4	1,0	1,0	0,0	240	0,18	7,5
5	1,0	0,0	1,0	0	1,40	5,0
6	0,0	1,0	1,0	0	1,70	11,5
7	0,66	0,66	0,66	500	1,34	6,5
8	0,66	0,66	0,66	450	1,20	8,0
9	0,66	0,66	0,66	480	1,30	6,5
10	0,66	0,66	0,66	485	1,30	8,0

#### 3.1. Modelado estadístico de las propiedades

El procesamiento de los datos permitió seleccionar, para cada variable respuesta, el modelo de mejor ajuste según los criterios estadísticos.

##### 3.1.1. Permeabilidad

El modelo cúbico especial resultó el más adecuado para la permeabilidad, con un  $R^2 = 99,6956\%$  ( $p < 0,05$ ). La ecuación obtenida fue:

$$\text{Permeabilidad (mmH}_2\text{O)} = 500,0 * AA + 180,0 * AR + 56,42 * B - 400,0 * AA * AR - 1112,85 * AA * B - 472,85 * AR * B + 12255,6 * AA * AR * B \quad (3)$$

La figura 2 muestra la superficie de respuesta estimada, donde se evidencia un comportamiento coherente con la teoría de medios porosos aplicadas a materiales de moldeo. La bentonita reduce drásticamente la permeabilidad debido a su capacidad de hinchamiento y alta superficie específica, que restringe los canales de flujo entre partículas (Qin et al., 2021). En contraste, la arena Arimao, con su granulometría uniforme, favorece un empaquetamiento granular con mayor conectividad interporos. La arena de retorno, al contener finos acumulados, muestra un comportamiento intermedio. Estas interacciones no lineales, demuestran que la proporción equilibrada (punto central del diseño) optimiza la microestructura del moldeo, permitiendo un escape de gases adecuado sin comprometer la integridad del sistema, aspecto crítico para la calidad de las piezas fundidas.

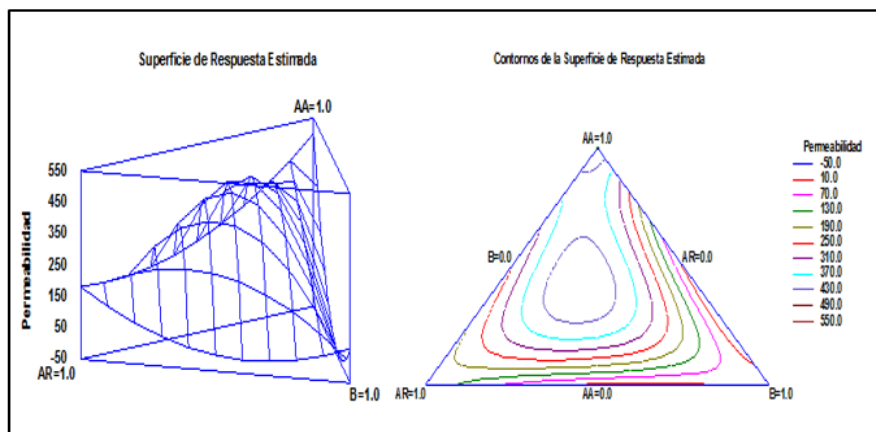


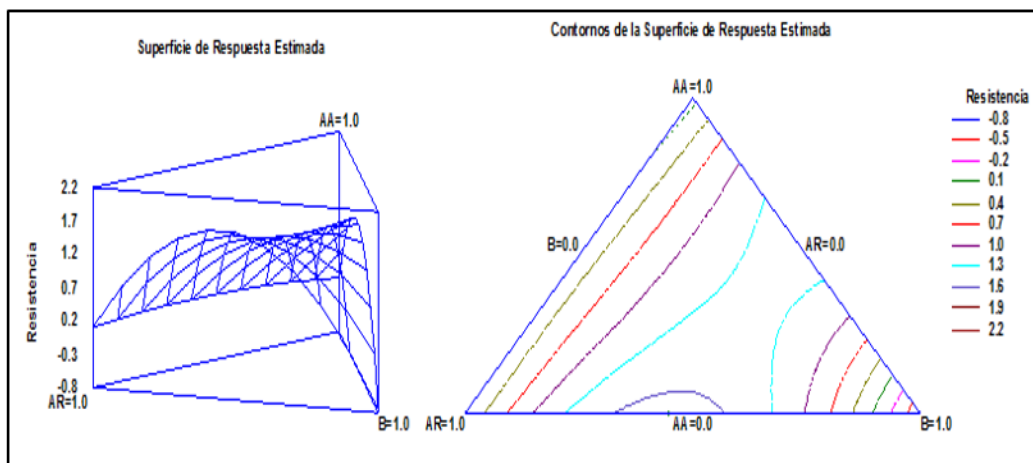
Figura 2. Superficie de respuesta estimada para la permeabilidad

### 3.1.2. Resistencia a la compresión

Para la resistencia a la compresión, el mejor ajuste correspondió también a un modelo cúbico especial ( $R^2 = 99,7482\%$ ,  $p < 0,05$ ) representado por la ecuación 4.

$$\begin{aligned} \text{Resistencia (kg/cm}^2\text{)} \\ = 0,1 * AR - 0,75 * B + 0,52 * AA * AR + 7,101 * AA * B \\ + 8,101 * AR * B - 6,61 * AA * AR * B \end{aligned} \quad (4)$$

La figura 3 evidencia que la resistencia se maximiza en mezclas con alto contenido de bentonita y arena de retorno. La arena Arimao pura no aporta resistencia por carecer de aglomerantes. El punto central del diseño proporciona valores dentro del rango óptimo ( $0,8-1,2 \text{ kg/cm}^2$ ), confirmando que la bentonita es esencial para la cohesión, aunque en exceso afecta negativamente a la permeabilidad.



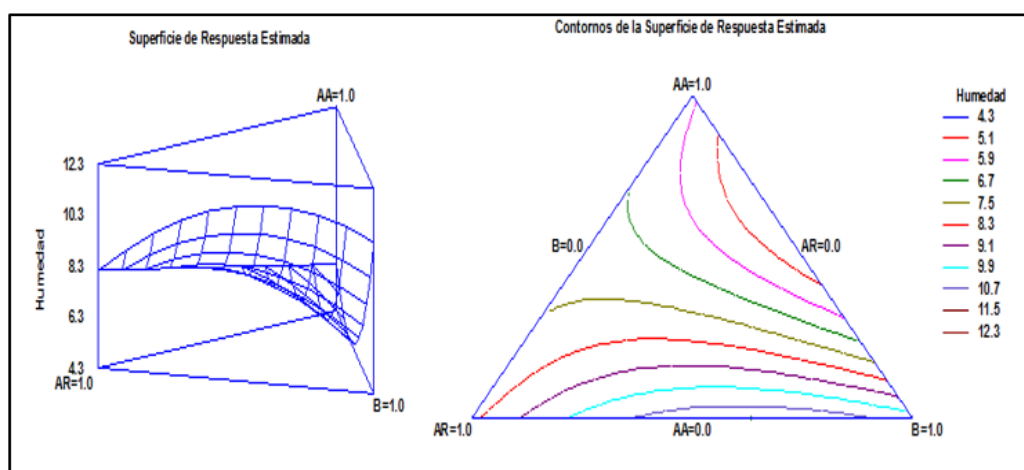
**Figura 3.** Superficie de respuesta estimada para la resistencia

### 3.1.3. Humedad

La humedad se ajustó a un modelo cuadrático con un  $R^2 = 90,4\%$  ( $p = 0,0341$ ). La ecuación resultante fue:

$$\text{Humedad (\%)} = 6,095 * AA + 8,095 * AR + 10,22 * B + 0,17 * AA * AR - 14,16 * AA * B + 7,83 * AR * B \quad (5)$$

La superficie respuesta para la humedad (figura 4) evidencia un comportamiento que puede explicarse mediante las propiedades higroscópicas de los componentes y su interacción en sistemas granulares. La bentonita, debido a su alta capacidad de intercambio catiónico y estructura laminar, adsorbe y retiene significativas cantidades de agua, lo que explica los valores elevados de humedad cuando su proporción es alta (Gatabin et al., 2016). Por otro lado, las arenas (Arimao y de retorno) presentan una menor capacidad de retención de humedad, aunque la arena de retorno, al contener finos, pueden mantener un contenido de agua ligeramente superior.



**Figura 4.** Superficie de respuesta estimada para la humedad

Los términos de interacción negativos en el modelo (ejemplo:  $-14,16 * AA * B$ ) sugieren que, en mezclas balanceadas, la distribución del agua se optimiza, reduciendo la humedad excesiva y estabilizando el sistema. La zona óptima d (7 - 8 %) coincide con lo reportado

en la literatura para moldes de arena, donde una humedad controlada asegura una activación adecuada de la bentonita sin comprometer la permeabilidad ni la resistencia (Patra et al., 2024).

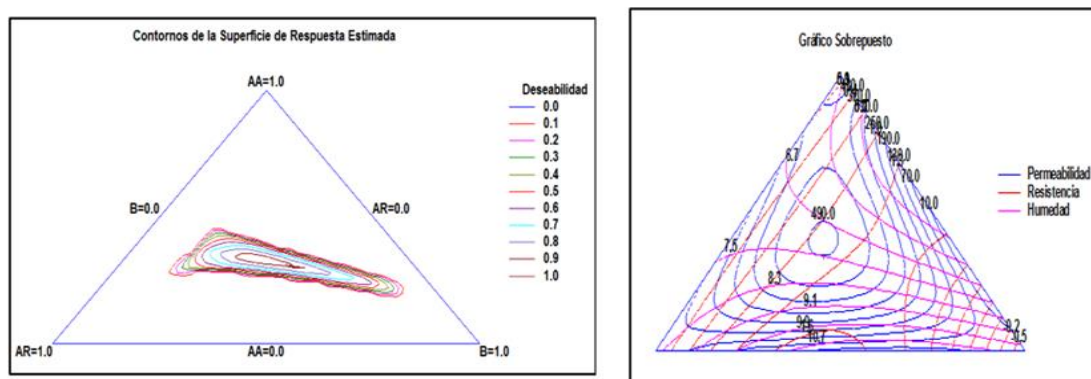
### 3.2. Optimización técnica multivariable

La optimización simultánea de las tres respuestas se realizó mediante la función de deseabilidad global en STATGRAPHICS. La solución óptima presentada en la tabla 4, mostró una deseabilidad global de 0,9915, indicando un cumplimiento casi total de las restricciones, con valores predichos para las respuestas dentro de los rangos establecidos y cercanos a los óptimos técnicos para el proceso de moldeo.

**Tabla 4.** Resultados de la optimización

<i>Modelos</i>	<i>Óptimo</i>
Permeabilidad	489,90 mmH <sub>2</sub> O
Resistencia	1,2 kg/cm <sup>2</sup>
Humedad	7,5 %
Optimización multivariable	0,9915
Composición de arena Arimao (AA)	0,34
Composición de arena de retorno (AR)	0,38
Composición de Bentonita	0,28

Los gráficos de superposición y de contorno (figura 5) confirman que la región factible se localiza en torno a la composición 0,34: 0,38: 0,28, validando la robustez del modelo y la viabilidad técnica de la formulación propuesta.



**Figura 5.** Gráfico superpuesto para los tres modelos y contorno de la superficie de la respuesta

### 3.3. Optimización económica mediante el Solver

En la optimización económica se minimizó la función de costo total definida en la ecuación 2, sujeta a las mismas restricciones técnicas utilizadas en la optimización multivariable. La solución económica óptima se muestra en la tabla 5 y presenta la siguiente composición y propiedades:

**Tabla 5.** Resultados de la optimización económica y estado de restricciones

<i>Parámetros</i>	<i>Valor óptimo</i>	<i>Estado de restricción</i>	<i>Holgura disponible</i>
<b>Composición</b>			
Arena Arimao (AA)	36,7%	No vinculante	Muy por encima del mínimo (0)
Arena de retorno (AR)	49,1%	No vinculante	Máximo aprovechamiento del retorno
Bentonita (B)	14,1%	No vinculante	Reducción del 50% vs óptimo técnico
<b>Propiedades</b>			
Permeabilidad (mmH <sub>2</sub> O)	430,01	No vinculante	69,99 (hasta 500)
Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	0,8	Vinculante	En el límite mínimo
Humedad (%)	7,5	Vinculante	En valor óptimo aconsejable
Costos (\$/kg)	1,22		Reducción del 35,4 %

La integración de los tres informes de Solver (Respuesta, Sensibilidad y Límites) revela que la solución económica óptima (36,7 % AA, 49,1 % AR, 14,1 % B y 1,22 \$/kg) está restringida por la resistencia mínima (0,80 kg/cm<sup>2</sup>) y humedad objetivo (7,50 %), ambas vinculantes. El valor de resistencia en el mínimo aceptable no compromete la calidad de piezas fundidas en la entidad, debido a que al tratarse de un molde que se lleva a estufa, se produce un endurecimiento durante el secado y el calor provoca la deshidratación parcial de la bentonita y la fijación de los aglomerantes. Una vez en la estufa, el molde adquiere la solidez suficiente para soportar la presión ferroestática del metal fundido, evitando deformaciones en piezas grandes.

Los multiplicadores de Lagrange (1,507 para resistencia; -0,153 para humedad) cuantifican la sensibilidad del costo a cambios en estas especificaciones, mientras que, el informe de límites valida la unicidad y robustez de la formulación dentro del espacio de diseño. Este análisis conjunto confirma que la reducción de costos está técnicamente limitada por los requisitos de cohesión y control de la humedad, no por la permeabilidad.

### **3.4. Análisis comparativo técnico-económico**

La tabla 6 presenta una comparación integral entre la solución técnica óptima obtenida mediante el STATGRAPHICS y la solución económica óptima derivada de Excel Solver. La solución económica reduce significativamente el contenido de bentonita y aumenta la arena de retorno, logrando una reducción del 35,4 % en el costo total. Si bien esta composición presenta una disminución del 33,33 % en la resistencia y del 12,22 % en la permeabilidad, ambos valores se mantienen dentro de los rangos aceptables establecidos para los procesos de fundición convencionales, lo que garantiza el cumplimiento de los parámetros de calidad exigidos.

Este resultado coincide con Niyonyungu et al. (2025) cuyo meta-análisis confirmó que sustituciones del 10 al 30 % de arena residual mantienen la resistencia. El 49,1 % alcanzado supera este rango, validando la regeneración mecánica in situ. Según Zhang et al. (2025), esta estrategia reduce costos logísticos y se alinea con las tendencias internacionales de economía circular.

**Tabla 6.** Comparación entre optimización técnica y económica

<i>Parámetros</i>	<i>Óptimo (STATGRAPHICS)</i>	<i>Óptimo (Excel Solver)</i>	<i>Variación (%)</i>
<b>Composición (%)</b>			
Arena Arimao (AA)	34	36,7	+7,9
Arena de retorno (AR)	38	49,1	+29,2
Bentonita (B)	28	14,1	-49,6
<b>Propiedades</b>			
Permeabilidad (mmH <sub>2</sub> O)	489,90	430,01	-12,2
Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	1,2	0,8	-33,33
Humedad (%)	7,5	7,5	0
<b>Costo (\$/kg)</b>	1,89	1,22	-35,4

#### 4. CONCLUSIONES

1. Los modelos matemáticos ajustados presentaron alta confiabilidad ( $R^2 > 90\%$ ) y capacidad predictiva, constituyendo herramientas útiles para el ajuste fino de formulaciones ante variaciones en materias primas o especificaciones técnicas.
2. La metodología de diseño de mezclas simplex y optimización multivariable permitió determinar que una composición con 34 % de arena Arimao, 38% de arena de retorno y 28 % de bentonita cumple óptimamente los parámetros de calidad del moldeo (permeabilidad  $\geq 100$  mmH<sub>2</sub>O, resistencia a la compresión 0,8-1,2 kg/cm<sup>2</sup> y humedad 7-8 %), con una deseabilidad global de 0,9915.
3. La optimización económica mediante el Solver identificó una formulación alternativa (36,7 % de arena Arimao, 49,1 % de arena de retorno y 14,1 % de bentonita) que reduce el costo en 35,4 % (1,22 \$/kg), manteniendo las propiedades dentro de los rangos permisibles, validando la viabilidad técnica y económica de la reutilización de la arena de retorno como estrategia de economía circular.

#### REFERENCIAS

- Cardoso, R. P., Reis, J. S., Silva, D. E. W., Barros, J. G. M., & Sampaio, N. A. (2023). How to perform a simultaneous optimization with several response variables. *Revista de Gestão e Secretariado (GeSec)*, 14(1), 564-578. <http://dx.doi.org/10.7769/gesec.v14i1.1536>
- Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214-219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- Gatabin, C., Dieudonné, A. C., Talandier, J., Collin, F., & Charlier, R. (2016). Competing effects of volume change and water uptake on the water retention behaviour of a compacted MX-80 bentonite/sand mixture. *Applied Clay Science*, 121-122, 57-62. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.019>
- Moreno, J. M., Cobo, C. J., Martínez, A. M., Uceda, M., López, A. B., Cotes, T., & Martínez, C. (2023). Study of the synergistic impact of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and organic C on kaolin-based lightweight aggregates by a DOE (Mixture Experiments) approach. *Construction and Building Materials*, 403, 133152.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133152>

- Niyonyungu, F., Ogra, A., & Ngcobo, N. (2025). A decision framework for waste foundry sand reuse: Integrating performance metrics and leachate safety via meta-analysis. *Construction Materials*, 5(3), 63. <https://doi.org/10.3390/constrmater5030063>
- Ortega, D. C., Bustamante, M. O., Gutiérrez, D. F., & Correa, A. A. (2015). Diseño de mezclas en formulaciones industriales. *DYNA*, 82(189), 149-156. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.42785>
- Patra, R., Banerjee, C., Sharma, S., Karmakar, A., Mondal, A., Mondal, S., Paul, S., & Rao, P. K. (2024). Experimental study on effects of moisture and clay content on the properties of moulding sand. *International Journal of Structural Mechanics & Finite Elements*, 10(1), 16-25. <https://journalspub.com/wp-content/uploads/2024/06/16-25-Experimental-Study-on-Effects-of-Moisture-and-Clay-Content-on-the-Properties-of-Moulding-Sand-1.pdf>
- Pons, R. Á., Villa, E. M., Bermúdez, Y., & Hernández, J. (2024). Quality improvement of a casting process using design of experiments. *Journal of Engineering Research*, 4(20), 1-8. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3174202408077>
- Primaningtyas, W. E., Rachman, F., Ramadhani, T. P., & Sa'diyah, A. (2023). Study of Variation of Binder Materials On Permeability Of Foundry Green Sand. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 8(2), 360–366. [https://iptek.its.ac.id/index.php/ijmeir/article/view/16609/pdf\\_167](https://iptek.its.ac.id/index.php/ijmeir/article/view/16609/pdf_167)
- Qin, Y., Xu, D., & Borana, L. (2021). Effect of bentonite content and hydration time on mechanical properties of sand–bentonite mixture. *Applied Sciences*, 11(24), 12001. <https://doi.org/10.3390/app112412001>
- Saetta, S., & Fratta, G. (2025). Waste management in foundries: The reuse of spent foundry sand in compost production-State of the art and a feasibility study. *Sustainability*, 17(13), 6004. <https://doi.org/10.3390/su17136004>
- Zhang, L., Chen, J., Li, C., Du, G., Huang, Y., Yang, Y., & Yu, Y. (2025). Development and prospect of foundry used sand recycling technology. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 16(5), 746-757. <https://doi.org/10.13264/j.cnki.ysjskx.2025.05.009>

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- M.Sc. Jany Granado Ojito. Conceptualización, investigación, análisis formal, redacción - primera redacción, redacción - revisión y edición
  - Dr.C. Mayra Caridad Morales Pérez. Metodología, análisis formal, Redacción-revisión y edición, supervisión.
  - M.Sc. Pedro Jorge Mollinedo Nodarse. Análisis formal, visualización.
  - Dr.C. Elena R. Rosa Domínguez. Software, análisis formal, redacción-revisión y edición.
-