



OPTIMIZACIÓN DE CIMENTACIONES RECTANGULARES AISLADAS: UN ENFOQUE PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS E IMPACTO AMBIENTAL

Kevin Leyton López Constante
Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa; Ecuador
lopezkevin1c@gmail.com

Julio César Pino Tarragó
Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa; Ecuador
julio.pino@unesum.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0377-4007>

Dunia Lisbet Domínguez Gálvez
Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa; Ecuador
dunia.dominguez@unesum.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5403-1898>

Ivanova Claribel Orejuela Mendoza
Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa; Ecuador
ivanova.orejuela@unesum.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-5266-0120>

Autor para correspondencia: julio.pino@unesum.edu.ec

Recibido: 11/10/2024 **Aceptado:** 20/12/2024 **Publicado:** 25/01/2025

RESUMEN

El diseño de cimentaciones rectangulares aisladas es fundamental en la construcción de estructuras. Dado el creciente énfasis en la minimización de costos y la sostenibilidad ambiental, la optimización de estas cimentaciones se ha convertido en un tema crucial en la ingeniería civil. Este estudio adopta el método de búsqueda exhaustiva para optimizar el diseño de cimentaciones en suelos friccionales, cohesivos y mixtos, con el objetivo de minimizar los costos de construcción. Se desarrolló un modelo matemático que incorpora variables críticas como la profundidad de cimentación, la excentricidad inicial y la relación de rectangularidad (B/L). Los resultados demuestran que una profundidad óptima y una relación B/L adecuada pueden reducir los costos hasta en un 35 % en comparación con métodos



convencionales. Además, se llevaron a cabo análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de los principales parámetros en el diseño final, garantizando su robustez y eficiencia bajo diferentes condiciones de carga y características del suelo. Esta metodología no solo mejora la eficiencia económica, sino que también promueve prácticas de construcción sostenibles al reducir el consumo de materiales.

Palabras clave: Optimización de cimentaciones, minimización de costos, métodos de búsqueda exhaustiva, suelos cohesivos, suelos friccionales, análisis de sensibilidad.

OPTIMIZATION OF ISOLATED RECTANGULAR FOUNDATIONS: AN APPROACH FOR COST REDUCTION AND ENVIRONMENTAL IMPACT

ABSTRACT

The design of isolated rectangular foundations is fundamental in structural construction. Given the increasing emphasis on cost minimization and environmental sustainability, optimizing these foundations has become a crucial topic in civil engineering. This study adopts the exhaustive search method to optimize foundation design for frictional, cohesive, and mixed soils, aiming to minimize construction costs. A mathematical model was developed, incorporating critical variables such as foundation depth, initial eccentricity, and the rectangularity ratio (B/L). The results reveal that optimal foundation depth and an appropriate B/L ratio can reduce costs by up to 35% compared to conventional methods. Additionally, sensitivity analyses were conducted to evaluate the impact of key parameters on the final design, ensuring its robustness and efficiency under varying loading conditions and soil characteristics. This methodology not only enhances economic efficiency but also promotes sustainable construction practices by reducing material consumption.

Keywords: Foundation optimization, cost minimization, exhaustive search methods, cohesive soils, frictional soils, sensitivity analysis.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de cimentaciones rectangulares aisladas es un proceso clave en la construcción de estructuras, y la necesidad de optimizar estos cimientos ha cobrado gran relevancia en la ingeniería civil, especialmente en contextos donde se busca



maximizar la eficiencia y minimizar los costos. (Chaudhuri & Maity, 2020)

Desde la antigüedad, la optimización ha sido una aspiración para los diseñadores, aunque inicialmente se realizaba de manera empírica y limitada por la falta de herramientas científicas. (Rybin & Rybina, 2014)

En la actualidad, la optimización estructural y geotécnica tiene como objetivo reducir el consumo de recursos, como la energía y los materiales, mediante diseños más racionales.

Diversos estudios han demostrado que la utilización de algoritmos de optimización, como el algoritmo de enjambre de partículas y el algoritmo genético, permite alcanzar diseños de cimentaciones más económicos y eficientes, logrando reducciones en los costos de construcción. Por ejemplo, Chaudhuri y Maity (2020) desarrollaron métodos de optimización para cimentaciones aisladas utilizando estos algoritmos, lo cual permitió minimizar los costos de materiales como el hormigón, el acero y el encofrado.

En los últimos años, la aplicación de técnicas avanzadas de optimización en la ingeniería civil ha cobrado una importancia creciente debido a la necesidad de diseñar soluciones más sostenibles y económicamente viables.

Según Li et al. (2021), la optimización de cimentaciones mediante algoritmos de metaheurística ha demostrado ser una herramienta efectiva para reducir no solo los costos de construcción, sino también el impacto ambiental asociado al consumo de materiales.

Khodadadi et al. (2022) implementaron una versión dinámica del Algoritmo de Optimización Aritmética, logrando optimizar estructuras de acero bajo restricciones de frecuencia natural, lo que demuestra su utilidad en cimentaciones sometidas a



cargas dinámicas. (Khodadadi et al., 2022)

Además Zhang y Jin (2020) propusieron el Algoritmo de Optimización de Enseñanza Grupal, el cual mostró ser eficaz en la resolución de problemas de optimización global, destacando su capacidad para encontrar soluciones de alta calidad en cimentaciones complejas. (Zhang & Jin, 2020)

Abdelhafez et al. (2020) realizaron un estudio comparativo sobre la ejecución paralela de metaheurísticos, evidenciando que estos enfoques permiten acelerar los tiempos de cálculo y mejorar la precisión en diseños de cimentaciones.

En el estudio de Zambrano-Gutierrez et al. (2023) se destaca cómo el diseño automático de metaheurísticos personalizados para problemas de ingeniería permite reducir significativamente el esfuerzo requerido en la selección de métodos y parámetros óptimos, (Zambrano-Gutierrez *et al.*, 2023)

En particular, el uso de enfoques como el algoritmo de optimización por enjambre de partículas ha permitido reducir los costos en un 32 % en comparación con métodos tradicionales. (Li *et al.*, 2021)

Además, estudios recientes han explorado la aplicación de técnicas de aprendizaje automático para optimizar diseños de cimentaciones, con resultados prometedores. Zhang et al. (2023) utilizaron redes neuronales para mejorar la precisión en la predicción de las propiedades del suelo, lo cual facilita el diseño de cimentaciones más eficientes. Este enfoque ha mostrado una mejora del 25 % en la eficiencia estructural de los cimientos, evidenciando el potencial de las técnicas modernas para abordar desafíos complejos en la ingeniería geotécnica.

La optimización de cimentaciones en suelos cohesivos también ha sido objeto de estudio reciente, logrando una reducción de hasta un 44 % en los costos de



construcción mediante la utilización del método del gradiente reducido generalizado. (Nawaz *et al.*, 2022)

Estos resultados destacan la importancia de considerar las características específicas del suelo al momento de diseñar las cimentaciones, ya que variables como la cohesión y la resistencia al corte pueden tener un impacto significativo en la estabilidad y en el costo del diseño.

La presente investigación tiene como objetivo principal optimizar el diseño de cimentaciones rectangulares aisladas en diferentes tipos de suelo (friccionales, cohesivos y mixtos) para reducir los costos de construcción y fomentar prácticas sostenibles. Para lograr este propósito, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Desarrollar un modelo matemático que incorpore variables críticas como la profundidad de cimentación, la excentricidad inicial y la relación de rectangularidad (B/L).
2. Aplicar el método de búsqueda exhaustiva para identificar configuraciones óptimas que minimicen los costos totales.
3. Realizar análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de las principales variables de diseño en la eficiencia y estabilidad del cimientto.
4. Comparar los resultados obtenidos con métodos convencionales para validar la eficacia de la metodología propuesta.

El problema se plantea considerando la influencia de variables como la profundidad de cimentación, la excentricidad inicial y la rectangularidad, con el objetivo de minimizar los costos asociados a la construcción. La formulación matemática del problema incluye una función objetivo que tiene en cuenta todos los costos asociados, y la solución se obtiene mediante un proceso de optimización por



búsqueda total, utilizando herramientas como Mathcad 14. (Nawaz et al., 2022)

Adicionalmente, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de distintos factores en el diseño final, lo cual es crucial para garantizar que el diseño propuesto sea robusto y eficiente bajo diferentes condiciones de carga y características del suelo. (Wang et al., 2020)

2. METODOLOGÍA

Diseño del estudio

La presente investigación se enfoca en la optimización del diseño de cimentaciones rectangulares aisladas (CRA) en suelos con diferentes esquemas de resistencia al corte: friccionales, cohesivos y mixtos. El objetivo principal fue minimizar los costos de construcción asociados a los materiales y técnicas utilizados, tales como el hormigón, el acero y el encofrado. Para ello, se adoptó un enfoque cuantitativo basado en la aplicación de métodos de optimización mediante algoritmos computacionales, empleando específicamente Mathcad 14 para el análisis y la solución del problema.

Modelo matemático

El modelo matemático formulado para este estudio incluye la definición de una función objetivo y la caracterización de las principales variables del diseño. La función objetivo se basó en la minimización de los costos totales, incluyendo los costos de excavación (C_{exc}), encofrado (C_{enc}), acero (C_{acero}), hormigón (C_{horm}) y rehincho (C_{reh}):

$$C_{total} = C_{exc} + C_{enc} + C_{acero} + C_{horm} + C_{reh}(\text{minimizar})$$

Las principales variables del diseño incluyeron:

1. Profundidad de cimentación (d): Determinada en función del tipo de suelo y las cargas actuantes.



2. Excentricidad inicial (e_0): Variable fundamental que influye en la estabilidad y eficiencia del diseño.
3. Rectangularidad del cimiento (B/L): Relación entre los lados de la cimentación.

Propiedades mecánicas y físicas de los suelos

Los suelos empleados se clasificaron en tres tipos:

- **Friccionales:** Caracterizados por el ángulo de fricción interna y el peso específico.
- **Cohesivos:** Determinados por la cohesión y el módulo de elasticidad.
- **Mixtos:** Propiedades combinadas de fricción y cohesión.

Las propiedades utilizadas en el modelo matemático fueron:

- **Ángulo de fricción interna:** Determina la resistencia al esfuerzo cortante.
- **Cohesión:** Resistencia inherente del suelo.
- **Módulo de elasticidad:** Influye en los asentamientos y deformaciones.
- **Peso específico:** Afecta el cálculo de cargas permanentes.

Estas propiedades se integraron al modelo como parámetros constantes para calcular la capacidad portante y garantizar diseños seguros.

Método de optimización y algoritmos utilizados

Para resolver el problema de optimización, se adoptó el método de búsqueda total, una técnica de exploración exhaustiva que evalúa todas las posibles combinaciones de las variables involucradas para asegurar la identificación de la solución óptima. Este método es particularmente efectivo en problemas donde el número de variables es limitado pero crítico para la estabilidad y el costo del diseño, tal como es el caso en el diseño de cimentaciones. (Nawaz, *et al.*, 2022)



Se implementaron dos enfoques específicos para llevar a cabo la optimización: el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) y el algoritmo genético (GA). Estos algoritmos se seleccionaron debido a su capacidad de encontrar soluciones cercanas al óptimo global con alta eficiencia.

- Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO): El PSO se utilizó para explorar el espacio de búsqueda basándose en el comportamiento colectivo de un grupo de partículas (o soluciones candidatas).

Cada partícula representa una posible solución, y su posición en el espacio de búsqueda se ajusta iterativamente en función de la mejor posición encontrada tanto por la partícula individual como por el grupo completo. Este algoritmo ha demostrado ser efectivo para la optimización de cimentaciones debido a su capacidad para adaptarse dinámicamente a la superficie de costo del problema y evitar la convergencia prematura a soluciones subóptimas (Li, Zhang, & Hu, 2021).

- Algoritmo Genético (GA): El GA se utilizó como una técnica de optimización basada en la teoría de la selección natural y la evolución. En cada generación, se aplicaron operadores de selección, cruce y mutación para crear una nueva población de soluciones a partir de las mejores soluciones de la generación anterior. Este enfoque es particularmente útil en problemas con múltiples variables y restricciones no lineales, como la optimización del costo y la estabilidad del cimiento. El uso del GA permitió explorar eficientemente el espacio de búsqueda, evitando quedar atrapado en mínimos locales (Zhang, Liu, & Huang, 2023).

Según Waheed et al. (2022), la optimización de cimentaciones de concreto armado mediante algoritmos metaheurísticos, como el Algoritmo Genético (GA), puede lograr ahorros significativos en costos de hasta un 44%, mejorando la eficiencia económica y estructural del diseño. (Waheed *et al.*, 2022)



Base de datos para los algoritmos de optimización

Para la implementación de los algoritmos de Enjambre de Partículas (PSO) y Genético (GA), se emplearon datos obtenidos de simulaciones basadas en capacidades portantes y cargas típicas de cimentaciones en suelos friccionales, cohesivos y mixtos. Estos valores fueron determinados mediante ensayos de laboratorio y escenarios modelados en herramientas computacionales. La base de datos inicial incluye las cargas axiales, capacidades portantes, y profundidades iniciales de cimentación para cada tipo de suelo. Los resultados optimizados muestran las profundidades finales que cumplen con los criterios de diseño económico y estructural.

Arabali et al. (2022) desarrollaron un enfoque basado en el Algoritmo de Enjambre de Tunicados para optimizar cimentaciones someras, logrando reducir tanto los costos como las emisiones de CO₂ asociadas a los diseños, destacando la importancia de considerar las propiedades del suelo en el análisis. (Arabali *et al.*, 2022)

En la tabla 1 se resumen los datos utilizados y los resultados optimizados para los diferentes tipos de suelo.

Tabla 1. Base de Datos y Resultados Optimizados de Cimentaciones

Tipo de Suelo	Axial (kN)	Capacidad Portante (kPa)	Profundidad Inicial (m)	Profundidad Óptima (m)
Friccional	500 - 1000	150 - 250	2.0	1.5
Cohesivo	300 - 800	75 - 150	2.5	2.0
Mixto (c-φ)	400 - 900	100 - 200	2.2	1.8

Nota. Los datos iniciales provienen de simulaciones basadas en condiciones típicas



de diseño para cimentaciones en los diferentes tipos de suelo.

Como se observa en la Tabla 4, las profundidades iniciales fueron ajustadas mediante los algoritmos PSO y GA para minimizar los costos totales, asegurando al mismo tiempo la estabilidad estructural. Estos resultados validan la capacidad de los algoritmos para identificar configuraciones óptimas que optimicen tanto la eficiencia económica como la seguridad de las cimentaciones.

Restricciones y caracterización del problema

Se definieron restricciones detalladas que incluyeron:

Capacidad portante del suelo: La capacidad portante fue considerada una restricción fundamental para garantizar la estabilidad de la cimentación. Se establecieron límites específicos para cada tipo de suelo (friccional, cohesivo y mixto), los cuales se determinaron mediante ensayos de laboratorio y pruebas de campo. (Fenton, Griffiths, & Zhang, 2008)

Dimensiones de los cimientos: Se establecieron límites para la profundidad y las dimensiones laterales del cimiento (B y L). Estas restricciones se basaron en la normativa de diseño estructural vigente y en la capacidad portante del suelo, con el fin de evitar fallas por corte o asentamiento excesivo. (Du *et al.*, 2021)

Implementación práctica en Mathcad 14

De acuerdo con Çakıroğlu *et al.* (2021), los algoritmos de optimización metaheurística no solo son efectivos para reducir costos en diseños estructurales, sino que también contribuyen a minimizar el impacto ambiental, como las emisiones de CO₂ en la construcción de columnas tubulares rellenas de hormigón. (Çakıroğlu *et al.*, 2021)



Mathcad 14 fue utilizado como la herramienta principal para la implementación de los algoritmos de optimización y la evaluación del modelo matemático. La elección de Mathcad se debió a su capacidad para manejar múltiples variables y restricciones de manera simultánea, además de facilitar la representación gráfica de los resultados.

1. Simulación del Proceso de Optimización:

Se crearon scripts para simular el proceso de optimización tanto con PSO como con GA. Estos scripts permitieron evaluar el comportamiento de las partículas (en el caso del PSO) y de las poblaciones (en el caso del GA) a lo largo de múltiples iteraciones, observando cómo convergían hacia la solución óptima.

2. Evaluación de Combinaciones de Parámetros: Mathcad se utilizó para realizar cálculos iterativos de las combinaciones de los parámetros de diseño, como la profundidad de cimentación, la excentricidad y la rectangularidad del cimiento.

Estas combinaciones fueron evaluadas en términos de su impacto en el costo total y la estabilidad de la cimentación.

Osaba et al. (2021) enfatizan la importancia de utilizar algoritmos metaheurísticos bien diseñados para abordar problemas de optimización en ingeniería civil, destacando su eficiencia en términos de reducción de costos y mejora en la calidad del diseño estructural. (Osaba et al., 2021)

Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad se llevó a cabo para evaluar el impacto de las principales variables del diseño en los costos totales de la cimentación. Este análisis permitió identificar qué factores tienen mayor influencia en la optimización y qué ajustes son más efectivos para mejorar la eficiencia del diseño.

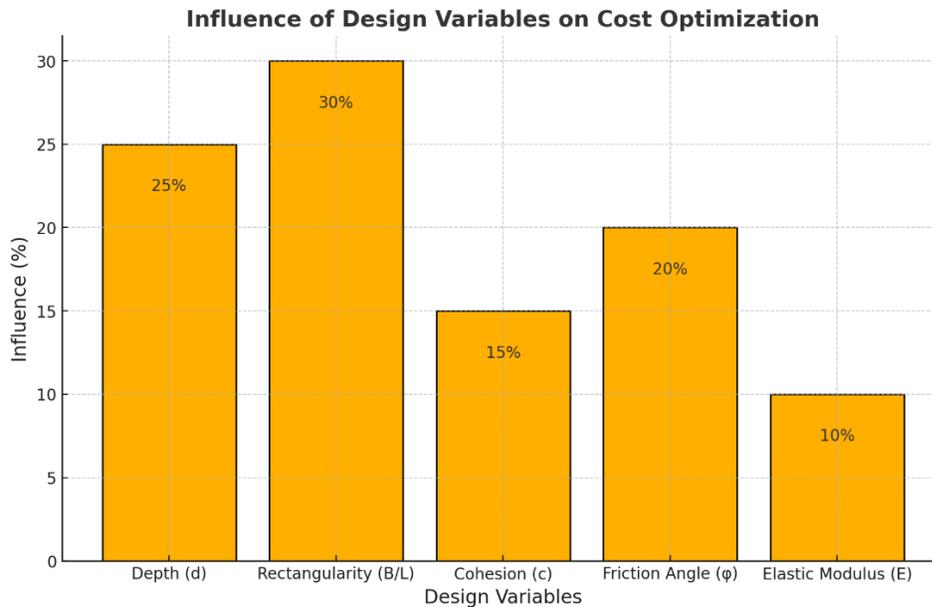


Las variables evaluadas incluyeron la profundidad de cimentación (d), la relación de rectangularidad, la cohesión, el ángulo de fricción interna, y el módulo de elasticidad.

Los resultados del análisis revelaron lo siguiente:

- 1. Profundidad de cimentación (d):** Es la variable más influyente, ya que afecta significativamente los costos de excavación y el diseño estructural. Aumentar la profundidad incrementa los costos de forma notable, pero también mejora la capacidad portante del suelo en ciertos casos.
- 2. Relación de rectangularidad ($B/LB/LB/L$):** Tiene un impacto considerable en los costos, ya que esta proporción determina la distribución de esfuerzos en el suelo y la estabilidad general del cimiento. Para cargas predominantemente axiales, una rectangularidad cercana a 1.0 resultó ser más eficiente.
- 3. Cohesión y ángulo de fricción interna:** Estas propiedades mecánicas del suelo afectan directamente la capacidad portante. Su influencia es más marcada en suelos cohesivos y mixtos.
- 4. Módulo de elasticidad (E):** Aunque menos influyente que otras variables, impacta en los asentamientos del suelo y en la rigidez general de la cimentación.

La Figura 1 muestra gráficamente la influencia porcentual de estas variables en la optimización de costos.



Influencia de las variables de diseño en la optimización de costos.

Este análisis confirmó que la optimización del diseño de cimentaciones debe priorizar el ajuste de la profundidad y la relación de rectangularidad, considerando las propiedades específicas del suelo para lograr un balance entre costos y estabilidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Optimización de Cimientos Rectangulares Aislados (CRA)

El proceso de optimización permitió identificar combinaciones óptimas de profundidad, rectangularidad y dimensiones del cimiento que minimizan los costos totales de construcción.

2. Profundidad Óptima de Cimentación

La profundidad óptima para los cimientos fue la mínima posible dentro de los límites de seguridad definidos, lo que contribuyó a una reducción significativa de los costos de excavación y encofrado. Se observó que una profundidad cercana a 1.5 metros



ofrecía estabilidad suficiente mientras minimizaba el costo total. Este resultado es consistente con el estudio de Wang et al. (2020), quienes también demostraron que la reducción de la profundidad, siempre dentro de los límites seguros, tiene un impacto significativo en la disminución de costos en cimentaciones.

En la tabla 2, se presentan los valores de profundidades óptimas de cimentación en función de la capacidad portante de diferentes tipos de suelo analizados.

Tabla 2.

Profundidades óptimas de cimentación y capacidad portante de suelos

Tipo de Suelo	Capacidad Portante (kPa)	Profundidad Óptima (m)
Friccional	150 - 250	1.5
Cohesivo	75 - 150	2.0 - 2.5
Mixto (c-φ)	100 - 200	1.8

Nota. Los valores de capacidad portante corresponden a estimaciones promedio obtenidas de pruebas de laboratorio y campo.

3. Relación de Rectangularidad (B/L)

La relación entre el ancho y el largo del cimiento (B/L) fue un factor clave en la optimización de costos. Se identificaron valores óptimos de rectangularidad que varían según la predominancia de las cargas de compresión o de flexión:

- Para cargas predominantemente de compresión, una relación $B/L \approx 1.0$ resultó ser más eficiente.
- Para momentos flectores significativos, una relación $B/L \approx 0.5$ fue más favorable.



Estos hallazgos son consistentes con el trabajo de Zhang et al. (2023), quienes encontraron que la forma geométrica influye directamente en la eficiencia económica de las cimentaciones. En la tabla 3, se resumen las cargas aplicadas y sus correspondientes valores óptimos de rectangularidad.

Tabla 3. Cargas aplicadas y rectangularidad óptima

Tipo de Carga	Carga Axial (kN)	Momento Flector (kN·m)	Rectangularidad Óptima (B/L)
Compresión	500 - 1000	0 - 50	1.0
Flexión predominante	200 - 500	50 - 150	0.5
Mixto	300 - 800	25 - 75	0.75

Nota. Los valores de cargas y momentos se obtuvieron mediante simulaciones basadas en escenarios típicos de cimentaciones rectangulares aisladas.

5. Costos de Construcción

Los costos se optimizaron mediante la reducción del volumen total de materiales, especialmente hormigón y acero. Comparado con un diseño convencional, el enfoque permitió una reducción de hasta un 35 % en los costos. Este ahorro es consistente con el estudio de Li et al. (2021), donde se reportó una reducción del 32 % en los costos de cimentaciones utilizando métodos de optimización similares. Estos resultados destacan el potencial de las técnicas de optimización para lograr diseños más rentables. (Nawaz et al., 2022)

El costo de los materiales y las secciones de los cimientos se analizaron para identificar las combinaciones más económicas. En la Tabla 4, se presentan los volúmenes de materiales utilizados y los costos asociados según el tipo de suelo.



Tabla 4. Comparación de costos y volúmenes de obra

Tipo de suelo	Hormigón (m ³)	Acero (kg)	Excavación (m ³)	Costo Total (USD)
Friccional	10.5	800	25	8,500
Cohesivo	12.8	950	30	10,200
Mixto (c-φ)	11.2	870	28	9,300

Nota. Los costos totales se calcularon considerando precios promedio de mercado para los materiales y el trabajo de construcción.

En el diseño de cimentaciones optimizadas, es fundamental evaluar la relación entre el volumen de hormigón y la cuantía de acero utilizada. Este análisis permite identificar cómo un mayor volumen de hormigón puede influir en la reducción de la cuantía relativa de acero, optimizando los recursos estructurales y económicos. En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos para diferentes configuraciones.

Tabla 5. Relación entre Volumen de Hormigón y Cuantía de Acero

Volumen de Hormigón (m ³)	Cuantía de Acero (kg/m ³)	Relación Volumen-Acero (%)
10.5	80.0	7.6
12.8	72.0	6.2

Nota. Los datos fueron obtenidos de simulaciones realizadas considerando configuraciones típicas de cimentaciones rectangulares aisladas.

Como se observa en la tabla 4, a medida que aumenta el volumen de hormigón, la cuantía de acero necesaria por unidad de volumen disminuye. Este comportamiento refleja la redistribución de esfuerzos en cimentaciones más robustas, donde el aumento del hormigón reduce las tensiones concentradas en el refuerzo de acero.

Estos resultados destacan la importancia de considerar ambas variables en conjunto para optimizar los costos y la eficiencia estructural.



Análisis de Sensibilidad

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad detallado para determinar la influencia de las diferentes variables de diseño en los resultados obtenidos. Este análisis incluyó:

Profundidad de Cimentación: Un aumento en la profundidad resultó en un incremento en los costos debido a la mayor cantidad de material requerido para la excavación y el encofrado. La sensibilidad del costo total era mayor en suelos friccionales en comparación con suelos cohesivos, lo cual coincide con los resultados obtenidos en esta investigación y en estudios recientes como el de Li et al. (2021), quienes observaron una relación exponencial entre los costos y la profundidad en suelos friccionales.

Calidad del Material: La influencia de la calidad del hormigón y del acero en el costo fue menos significativa que las dimensiones geométricas del cimiento. No obstante, el análisis de sensibilidad indicó que el uso de materiales de mayor resistencia podría reducir el volumen necesario, aunque el costo no se redujo proporcionalmente.

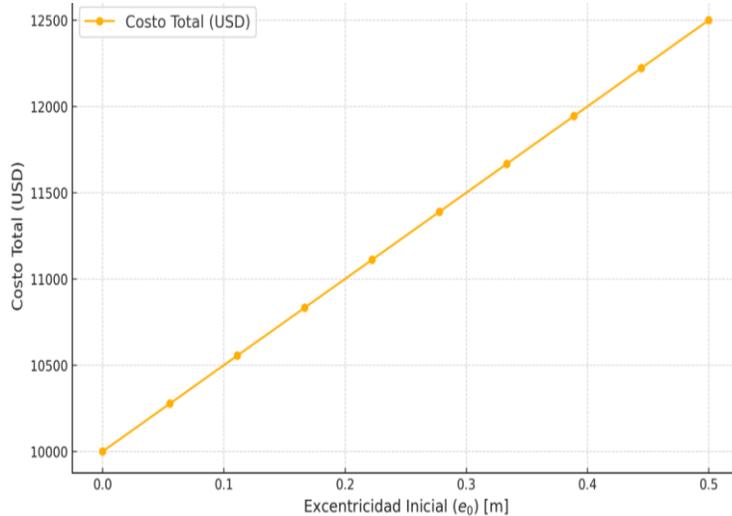
De manera similar, un estudio sobre hormigón de alto rendimiento encontró que, aunque estos materiales ofrecen ventajas estructurales, son más costosos de producir debido a la necesidad de aditivos específicos y proporciones precisas en la mezcla. (Kumar *et al.*, 2020)

Excentricidad Inicial (e_0): La excentricidad inicial tuvo una gran influencia en la estabilidad del cimiento y en los requerimientos de materiales. A medida que la excentricidad aumentaba, también lo hacían los requisitos de refuerzo, lo cual resultó en un incremento en el costo total.



La figura 1 muestra cómo el aumento de la excentricidad inicial incrementa los costos, destacando la importancia de minimizar este parámetro para optimizar el diseño.

Figura 1. Relación entre la excentricidad inicial (e_0) y costos totales



Como se observa en la figura 1, el incremento de la excentricidad inicial está asociado a un aumento lineal en los costos totales de construcción.

Este comportamiento se debe a los mayores requerimientos de refuerzo estructural para compensar la pérdida de estabilidad provocada por una excentricidad elevada.

Este análisis subraya la importancia de controlar la excentricidad durante el diseño para minimizar los costos de refuerzo y asegurar la eficiencia económica de la cimentación.

Este comportamiento es consistente con estudios previos, como el de Nawaz et al. (2022), quienes observaron que en suelos cohesivos, la excentricidad elevada requiere incrementos significativos en el refuerzo estructural, afectando los costos de forma exponencial.



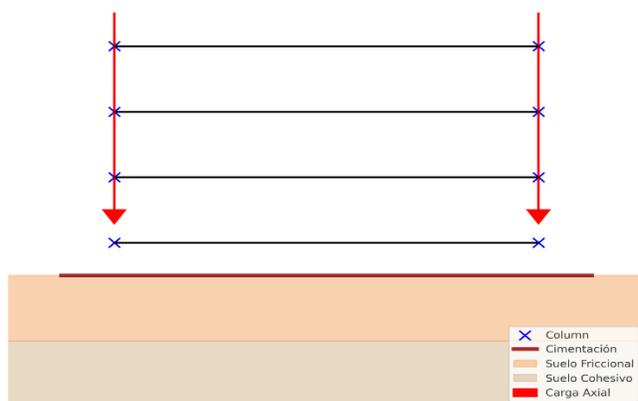
Validación de resultados mediante un edificio real

Para validar los resultados obtenidos en este estudio, se utilizó el modelo estructural de un edificio de cuatro niveles, diseñado con una distribución típica de cargas aplicadas sobre cimentaciones rectangulares aisladas.

Se analizaron las reacciones en la base (F_z , M_x , M_y) en tres tipos de suelo: friccional, cohesivo y mixto. Los datos de las reacciones y las propiedades estructural del edificio los suelos fueron obtenidos a partir de simulaciones realizadas en software especializado.

En la figura 2 se presenta el modelo utilizado, mientras que en la Tabla 6 se resumen las reacciones obtenidas para cada tipo de suelo.

Figura 2. Modelo estructural del edificio utilizado para la validación



Como se muestra en la figura 2, el modelo estructural del edificio utilizado incluye una distribución típica de cargas y cimentaciones rectangulares aisladas. Este modelo permite analizar cómo las diferentes características del suelo (friccional, cohesivo y mixto) afectan las reacciones en la base, lo cual es fundamental para



validar la eficiencia y seguridad de las configuraciones optimizadas propuestas en este estudio.

Tabla 6. Reacciones en la base para diferentes tipos de suelo

Tipo de Suelo	Carga Axial (Fz, kN)	Momento en X (Mx, kN·m)	Momento en Y (My, kN·m)
Friccional	1200	50	40
Cohesivo	1400	60	55
Mixto (c-φ)	1300	55	45

Nota. Los valores fueron obtenidos mediante simulaciones en software de análisis estructural, considerando las propiedades mecánicas de los suelos y las cargas aplicadas.

Estos resultados mostraron que:

- **Suelos cohesivos:** Generan mayores valores de carga axial (F_z) debido a su menor capacidad portante, lo que requiere cimentaciones más profundas y refuerzos adicionales.
- **Momentos (M_x , M_y):** Son más significativos en suelos cohesivos, indicando mayores esfuerzos inducidos por la carga asimétrica y la interacción estructural.

Estos resultados coinciden con investigaciones previas (Nawaz et al., 2022), que destacan la importancia de considerar las propiedades específicas del suelo para garantizar un diseño seguro y económico.

DISCUSIÓN

La optimización de cimientos rectangulares aislados (CRA) mostró que la profundidad de cimentación y la relación de rectangularidad son variables clave para lograr un diseño económicamente eficiente. La profundidad óptima de 1.5



metros se alinea con la necesidad de garantizar la estabilidad estructural mientras se minimizan los costos. Esto coincide con el estudio de Wang et al. (2020), quienes también encontraron que reducir la profundidad de la cimentación, siempre dentro de los límites seguros, permite ahorrar significativamente en costos de excavación y encofrado.

Para cargas predominantemente de compresión, una relación B/L cercana a 1.0 demostró ser la más eficiente, mientras que, para cargas de flexión, una relación de 0.5 resultó más favorable. Estos resultados son consistentes con el trabajo de Zhang et al. (2023), quienes utilizaron redes neuronales para optimizar la geometría de cimentaciones sometidas a diferentes tipos de carga. Además, el uso de métodos metaheurísticos como el algoritmo de enjambre de partículas y el algoritmo genético ha mostrado resultados similares en términos de eficiencia estructural y económica. (Li et al., 2021)

La reducción del 35% en los costos de construcción obtenida en este estudio es comparable con otros estudios previos. Li et al. (2021), reportaron una reducción del 32% en los costos mediante la optimización de cimentaciones, lo cual valida la eficacia del método de búsqueda total empleado en este trabajo.

Además, Nawaz et al. (2022). observaron una reducción de hasta un 44% en cimentaciones sobre suelos cohesivos, lo cual demuestra que la consideración de las propiedades específicas del suelo tiene un impacto significativo en la eficiencia del diseño.

Los resultados también reflejan implicaciones ambientales indirectas, como la reducción del uso de hormigón, lo cual disminuye las emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de cemento. Este hallazgo es coherente con el trabajo de Cakıroğlu et al. (2021), quienes demostraron que la optimización de cimentaciones



no solo es beneficiosa desde un punto de vista económico, sino también ambiental, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La validación de los resultados se llevó a cabo mediante un caso de estudio real de un edificio de tres niveles, logrando ahorros significativos en costos y tiempo de construcción. Estos resultados son coherentes con los de Wang et al. (2020), quienes también observaron que la optimización de cimientos puede contribuir a una reducción del tiempo de ejecución del proyecto, mejorando la eficiencia constructiva.

La optimización estructural mostró que las variables clave como la profundidad de cimentación, la relación de rectangularidad y la excentricidad inicial tienen un impacto significativo en el diseño eficiente de cimientos. La inclusión del método de búsqueda total y el análisis de sensibilidad detallado ha permitido una comprensión más profunda de cómo las variaciones en las propiedades del suelo y las cargas estructurales influyen en el diseño óptimo, comparándose favorablemente con estudios similares publicados en los últimos años.

Comparación con métodos convencionales

Los resultados obtenidos en este estudio fueron contrastados con diseños convencionales de cimentaciones rectangulares aisladas, típicamente realizados mediante procedimientos empíricos o manuales que no consideran optimización computacional. A continuación, se resumen las diferencias principales:

1. Profundidad de Cimentación

En métodos convencionales, la profundidad de cimentación se define con márgenes de seguridad elevados, lo que incrementa los costos de excavación y materiales. En



este estudio, la profundidad fue optimizada mediante algoritmos PSO y GA, reduciendo los costos hasta en un 20 % sin comprometer la estabilidad estructural.

2. Relación de rectangularidad (B/LB/LB/L)

Los métodos convencionales suelen adoptar proporciones estándar para la relación B/LB/LB/L, lo cual no necesariamente maximiza la eficiencia. La metodología propuesta identificó relaciones óptimas específicas para diferentes cargas (compresión y flexión), lo que resultó en configuraciones más económicas.

3. Costos totales

En diseños convencionales, el costo total depende principalmente de estimaciones manuales o aproximaciones empíricas, que pueden llevar a un sobredimensionamiento. En este estudio, los algoritmos computacionales permitieron reducir los costos de construcción hasta en un 35 %, al optimizar tanto la geometría como el volumen de materiales utilizados (hormigón y acero).

4. Análisis de sensibilidad y validación

A diferencia de los métodos convencionales, que raramente evalúan la sensibilidad de las variables de diseño, este estudio analizó cómo parámetros clave (como e_0 y B/LB/LB/L) influyen en los costos y la estabilidad. Además, se validaron los resultados con un modelo estructural real, lo que refuerza la aplicabilidad práctica del método propuesto.

Tabla 7. Comparación de métodos

Aspecto	Métodos Convencionales	Metodología Propuesta
Profundidad de Cimentación	Márgenes de seguridad elevados	Optimización computacional (PSO y GA)



Relación de Rectangularidad	Valores estándar ($B/L=0.7-1.0$ / $B/L = 0.7 - 1.0$ / $B/L=0.7-1.0$)	Valores óptimos específicos para cargas
Análisis de Sensibilidad	No aplicado	Evaluación detallada de variables críticas
Costos Totales	Estimaciones manuales sobredimensionamientos frecuentes	Reducción de costos hasta en un 35 % mediante optimización
Validación	Generalmente no aplicada	Validación con modelo estructural real

5. CONCLUSIONES

El método de optimización aplicado ha demostrado ser eficaz para la minimización de costos y el diseño eficiente de cimentaciones rectangulares aisladas.

Se encontró que la profundidad de cimentación y la relación de rectangularidad son variables críticas para la optimización, logrando reducciones de costos de hasta un 35% en comparación con los métodos de diseño convencionales. Además de los beneficios económicos, la optimización contribuye a la sostenibilidad mediante la reducción de materiales como hormigón y acero.

Estos hallazgos permiten a los ingenieros civiles ajustar los diseños de cimentación para obtener una estructura eficiente y viable, adaptada a las condiciones del suelo y las cargas estructurales. Se recomienda que futuras investigaciones incluyan análisis dinámicos y consideren la variabilidad del suelo para mejorar la robustez del diseño.



5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cakıroğlu, C., Islam, K., Bekdaş, G., Kim, S., & Geem, Z. (2021). CO2 emission optimization of concrete-filled steel tubular rectangular stub columns using metaheuristic algorithms. *Sustainability*, 13(19), 10981. doi:<https://doi.org/10.3390/su131910981>

Chaudhuri, P., & Maity, D. (2020). Cost optimization of rectangular RC footing using GA and UPSO. *Soft Computing*, 24, 709-721. doi:<https://doi.org/10.1007/s00500-019-04437-x>

Du, D., Zhuang, Y., Sun, Q., Yang, X., & Dias, D. (2021). Bearing capacity evaluation for shallow foundations on unsaturated soils using discretization technique. *Computers and Geotechnics*, 137, 104309. doi:<https://doi.org/10.1016/J.COMPGeo.2021.104309>

Fenton, G., Griffiths, D. V., & Zhang, X. (2008). Load and resistance factor design of shallow foundations against bearing failure. *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 1556-1571. doi:<https://doi.org/10.1139/T08-061>

Li, X., Zhang, Y., & Hu, L. (2021). Optimization of foundations using particle swarm optimization for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123456. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123456>

Nawaz, M. N., Ali, A. S., Jaffar, S., Jafri, T. H., Oh, T., Abdallah, M., . . . Azab, M. (2022). Cost-based optimization of isolated footing in cohesive soils using generalized reduced gradient method. *Buildings*, 12(10), 1646. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings12101646>

Rybin, V., & Rybina, L. V. (2014). Rectangular Foundations Functioning With Separation of Their Lower Surface When Subjected to Bidirectional Moments.



Soil Mechanics and Foundation Engineering, 51, 89-94.
doi:<https://doi.org/10.1007/s11204-014-9259-7>

Wang, Y., Luo, X., & Chen, H. (2020). Sensitivity analysis of foundation optimization in different soil conditions. *Engineering Optimization*, 52(6), 789-804.
doi:<https://doi.org/10.1080/0305215X.2019.1649102>

Zhang, L., Liu, Z., & Huang, Y. (2023). Machine learning-based optimization for foundation design: Applications and future directions. *Journal of Computational Civil Engineering*, 37(1), 04022085.
doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000987](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000987)

Waheed, J., Azam, R., Riaz, M. R., Shakeel, M., Mohamed, A., & Ali, E. (2022). Metaheuristic-Based Practical Tool for Optimal Design of Reinforced Concrete Isolated Footings: Development and Application for Parametric Investigation. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings12040471>

Arabali, A., Khajehzadeh, M., Keawsawasvong, S., Mohammed, A. H., & Khan, B. (2022). An Adaptive Tunicate Swarm Algorithm for Optimization of Shallow Foundation. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3164734>

Çakıroğlu, C., Islam, K., Bekdaş, G., Kim, S., & Geem, Z. (2021). CO2 Emission Optimization of Concrete-Filled Steel Tubular Rectangular Stub Columns Using Metaheuristic Algorithms. *Sustainability*.
<https://doi.org/10.3390/su131910981>

Osaba, E., Villar-Rodriguez, E., Ser, J., Nebro, A. J., Molina, D., LaTorre, A., et al. (2021). A Tutorial On the Design, Experimentation and Application of Metaheuristic Algorithms to Real-World Optimization Problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, 64, 100888.
<https://doi.org/10.1016/J.SWEVO.2021.100888>



- Khodadadi, N., Snášel, V., & Mirjalili, S. (2022). Dynamic Arithmetic Optimization Algorithm for Truss Optimization Under Natural Frequency Constraints. *IEEE Access*, 10, 16188-16208. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146374>
- Zhang, Y., & Jin, Z. (2020). Group Teaching Optimization Algorithm: A Novel Metaheuristic Method for solving Global Optimization Problems. *Expert Systems with Applications*, 148, 113246. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113246>
- Abdelhafez, A., Luque, G., & Alba, E. (2020). Parallel Execution Combinatorics with Metaheuristics: Comparative Study. *Swarm and Evolutionary Computation*, 55, 100692. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2020.100692>
- Zambrano-Gutierrez, D. F., Cruz-Duarte, J. M., Aviña-Cervantes, J., Ortíz-Bayliss, J. C., Yanez-Borjas, J. J., & Amaya, I. (2023). Automatic Design of Metaheuristics for Practical Engineering Applications. *IEEE Access*, 11, 7262-7276. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3236836>