

Implementación de un algoritmo genético para el UFLP

P25-LAT4052-2 OPTIMIZACIÓN AVANZADA

Yamile Yetlanetzi Durán Díaz
Actuaría - 173392

Mariana García Rodríguez
Actuaría - 168521

Heriberto Espino Montelongo
Ciencia de Datos - 175199

Abstract—Se desarrolla un algoritmo genético para resolver el Problema de Localización de Instalaciones sin Restricciones de Capacidad (UFLP), con el objetivo de minimizar el costo total. Se comparan cuatro configuraciones del algoritmo: una con hiperparámetros ajustados, otra optimizada para velocidad, aunque no siempre alcanza el óptimo, y dos con parámetros seleccionados aleatoriamente.

Index Terms—UFLP, algoritmo genético, hiperparámetros, optimización, heurística

I. INTRODUCCIÓN Y METODOLOGÍA

En este trabajo se propone el diseño de un algoritmo genético para resolver el Problema de Localización de Instalaciones sin Restricciones de Capacidad (UFLP, por sus siglas en inglés). El objetivo es determinar qué instalaciones deben abrirse para minimizar el costo total de operación y asignación.

Dado que se emplea un algoritmo genético, se consideran los siguientes parámetros principales:

- N : tamaño de la población
- M : tasa de mutación
- C : tasa de *crossover*
- T : tamaño del torneo
- G : número máximo de generaciones
- tc : tipo de *crossover*
- tm : tipo de mutación
- E : número de ejecuciones

Se evaluará el desempeño de cuatro configuraciones distintas del algoritmo genético, cada una definida por un conjunto específico de parámetros. La optimización se centró en ajustar los hiperparámetros más relevantes: tasa de mutación (M), tasa de cruzamiento (C), tamaño del torneo (T), tipo de cruzamiento (tc) y tipo de mutación (tm), mediante un proceso de búsqueda sistemática. Para mantener la consistencia en las evaluaciones, los valores de tamaño de población (N) y número máximo de generaciones (G) se fijaron en 100 y 30, respectivamente, durante la etapa de ajuste.

La metodología de ajuste consistió en una optimización secuencial de los hiperparámetros. Se comenzó con la tasa de mutación, manteniendo constantes los demás parámetros,

y se probaron diferentes valores. Se seleccionó el valor que generó el menor costo promedio. Luego, este procedimiento se repitió para los demás hiperparámetros, utilizando en cada caso los valores óptimos previamente determinados. Es importante señalar que, al fijar la tasa de mutación en 0, no se observaron mejoras en los resultados del algoritmo, lo cual evidenció una falta de diversidad en la población. Por este motivo, la búsqueda se inició con un valor mínimo de 0.2.

Para comparar, se evaluarán cuatro algoritmos con diferentes combinaciones de parámetros. Las configuraciones serán referidas como:

- Algoritmo con Hiperparámetros optimizados
- Algoritmo Random 1 y Random 2 (configuraciones generadas aleatoriamente)
- Algoritmo Rápido

En general, estaremos comparando el algoritmo con el menor costo contra el algoritmo rápido.

Todos los algoritmos se ejecutarán con una misma semilla $s = [2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]$, a fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados. La Tabla I muestra los valores utilizados en cada configuración. Los valores en cursiva corresponden a parámetros generados aleatoriamente.

Parámetro	HP	Random 1	Random 2	Rápido
N	300	<i>177</i>	<i>200</i>	100
M	1	<i>0.71</i>	<i>0.62</i>	1
C	0.8	<i>0.51</i>	<i>0.60</i>	0.8
T	120	<i>18</i>	<i>49</i>	40
G	1000	1000	1000	1000
tc	un punto	uniforme	un punto	uniforme
tm	mejor	mejor	random	random
E	9	<i>9</i>	<i>9</i>	<i>9</i>

TABLE I
PARÁMETROS DE LOS 4 ALGORITMOS. VALORES EN CURSIVA FUERON GENERADOS ALEATORIAMENTE.

Cabe mencionar que, si bien somos conscientes de que la estrategia empleada para el ajuste de hiperparámetros no es la más robusta desde el punto de vista metodológico, se optó por esta aproximación secuencial debido a limitaciones de tiempo. Aun así, permitió obtener configuraciones razonablemente competitivas dentro del marco del estudio.

II. UFLP 1

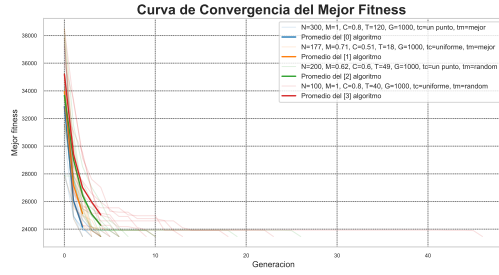


Fig. 1. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 1

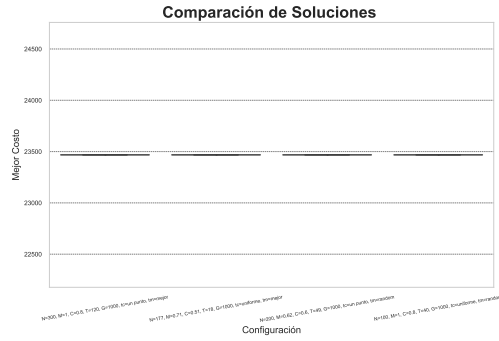


Fig. 2. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=300, M=1, C=0.8, T=120, G=1000, tc=un punto, tm=mejor, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	23468
Mejor Costo	23468
Peor Costo	23468
Costo Promedio	23468
Desviación Estándar Costo	0.0000
Tiempo Promedio de Ejecución	0.054221s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.027588s
Desviación del Tiempo	0.019582
Generación Óptima Promedio	3.67
Generación más Rápida	2
Semilla más Rápida	2

Fig. 3. Resumen estadístico de las ejecuciones: HP

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	23468
Mejor Costo	23468
Peor Costo	23468
Costo Promedio	23468
Desviación Estándar Costo	0.0000
Tiempo Promedio de Ejecución	0.022612s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.008004s
Desviación del Tiempo	0.018724
Generación Óptima Promedio	14.89
Generación más Rápida	4
Semilla más Rápida	2

Fig. 4. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

En la instancia UFLP 1 se observa que el algoritmo con hiperparámetros optimizados (HP) es el primero en converger al mejor valor de fitness. No obstante, todos los algoritmos logran alcanzar el óptimo conocido de 23,468. Destaca el algoritmo rápido, que si bien no está optimizado para precisión, logra alcanzar dicho óptimo con un tiempo promedio de ejecución considerablemente menor: 0.022612 segundos, frente a los 0.0544221 segundos del algoritmo HP.

III. UFLP 2

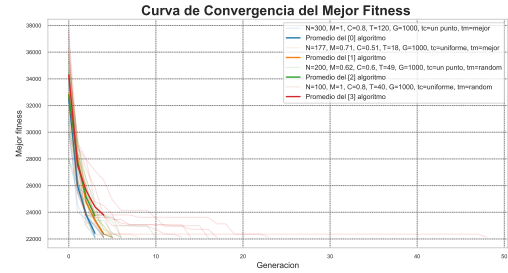


Fig. 5. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 2

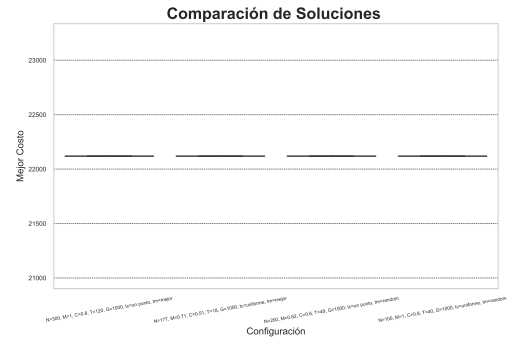


Fig. 6. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=300, M=1, C=0.8, T=120, G=1000, tc=un punto, tm=mejor, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	22119
Mejor Costo	22119
Peor Costo	22119
Costo Promedio	22119
Desviación Estándar Costo	0.0000
Tiempo Promedio de Ejecución	0.050112s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.030270s
Desviación del Tiempo	0.013575
Generación Óptima Promedio	3.56
Generación más Rápida	3
Semilla más Rápida	2

Fig. 7. Resumen estadístico de las ejecuciones: HP

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	22119
Mejor Costo	22119
Peor Costo	22119
Costo Promedio	22119
Desviación Estándar Costo	0.0000
Tiempo Promedio de Ejecución	0.024746s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.003007s
Desviación del Tiempo	0.017073
Generación Óptima Promedio	16.22
Generación más Rápida	4
Semilla más Rápida	2

Fig. 8. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

En la instancia UFLP 2 se observa que el algoritmo con hiperparámetros optimizados (HP) es el primero en converger al mejor valor de fitness. No obstante, todos los algoritmos logran alcanzar el óptimo conocido de 22,119. Destaca el algoritmo rápido, que si bien no está optimizado para precisión, logra alcanzar dicho óptimo con un tiempo promedio de ejecución considerablemente menor: 0.024746 segundos, frente a los 0.050112 segundos del algoritmo HP.

IV. UFLP 3

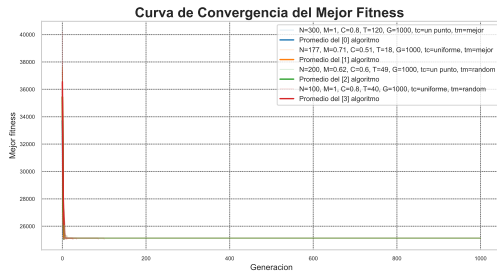


Fig. 9. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 3

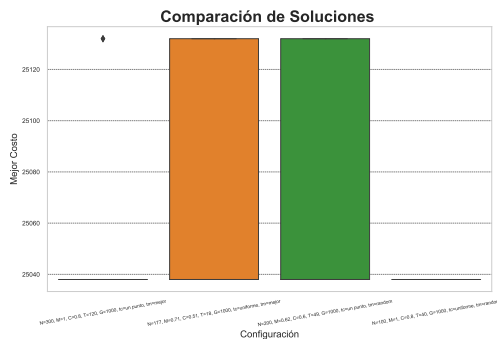


Fig. 10. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=300, M=1, C=0.8, T=120, G=1000, tc=un punto, tm=mejor, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	25038
Mejor Costo	25038
Peor Costo	25132
Costo Promedio	25059
Desviación Estándar Costo	39.0795
Tiempo Promedio de Ejecución	2.961067s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.028642s
Desviación del Tiempo	5.467341
Generación Óptima Promedio	2.71
Generación más Rápida	2
Semilla más Rápida	2

Fig. 11. Resumen estadístico de las ejecuciones: HP

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	25038
Mejor Costo	25038
Peor Costo	25038
Costo Promedio	25038
Desviación Estándar Costo	0.0000
Tiempo Promedio de Ejecución	0.047565s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.000000s
Desviación del Tiempo	0.047732
Generación Óptima Promedio	33.44
Generación más Rápida	4
Semilla más Rápida	2

Fig. 12. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

En la instancia UFLP 3, todos los algoritmos convergieron rápidamente al mejor valor de fitness, como puede observarse en las curvas de convergencia. A pesar de tratarse de un problema de menor tamaño, se registró una alta variabilidad en las soluciones obtenidas por los algoritmos con parámetros aleatorios, lo cual evidencia su falta de consistencia. Además, se detectó un outlier en los resultados del algoritmo HP.

En esta ocasión, el algoritmo rápido fue el que presentó la mayor calidad promedio de soluciones, manteniendo un tiempo de ejecución eficiente: 0.047565 segundos en promedio. Aunque este valor es superior al observado en las instancias UFLP 1 y 2, resulta significativamente más bajo que el del algoritmo HP, cuyo tiempo promedio fue de 2.961067 segundos.

A pesar de estas diferencias, todos los algoritmos lograron alcanzar la solución óptima conocida para esta instancia, con un valor de 25,038.

V. UFLP 4

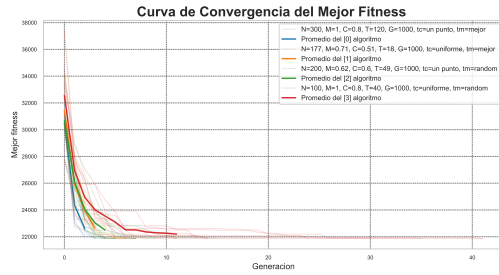


Fig. 13. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 4

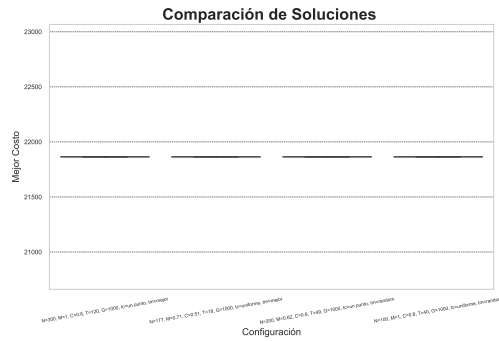


Fig. 14. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=300, M=1, C=0.8, T=120, G=1000, tc=un punto, tm=mejor, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	21864
Mejor Costo	21864
Peor Costo	21864
Costo Promedio	21864
Desviación Estándar Costo	0.0000
Tiempo Promedio de Ejecución	0.061692s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.031673s
Desviación del Tiempo	0.021452
Generación Óptima Promedio	4.44
Generación más Rápida	2
Semilla más Rápida	2

Fig. 15. Resumen estadístico de las ejecuciones: HP

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	21864
Mejor Costo	21864
Peor Costo	21864
Costo Promedio	21864
Desviación Estándar Costo	0.0000
Tiempo Promedio de Ejecución	0.037036s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.015286s
Desviación del Tiempo	0.016876
Generación Óptima Promedio	24.78
Generación más Rápida	11
Semilla más Rápida	2

Fig. 16. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

En la instancia UFLP 4 se observa que el algoritmo con hiperparámetros optimizados (HP) es el primero en converger al mejor valor de fitness. No obstante, todos los algoritmos logran alcanzar el óptimo conocido de 21,864. Destaca el algoritmo rápido, que si bien no está optimizado para precisión, logra alcanzar dicho óptimo con un tiempo promedio de ejecución considerablemente menor: 0.037036 segundos, frente a los 0.061692 segundos del algoritmo HP.

VI. UFLP 5

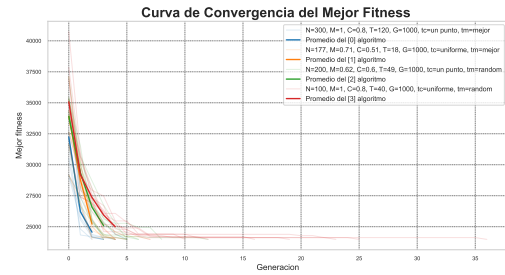


Fig. 17. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 5

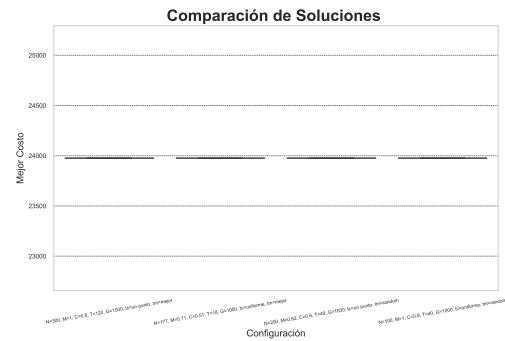


Fig. 18. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=300, M=1, C=0.8, T=120, G=1000, tc=un punto, tm=mejor, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	23976
Mejor Costo	23976
Peor Costo	23976
Costo Promedio	23976
Desviación Estándar Costo	0.0000
Tiempo Promedio de Ejecución	0.051278s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.029364s
Desviación del Tiempo	0.012439
Generación Óptima Promedio	3.56
Generación más Rápida	2
Semilla más Rápida	2

Fig. 19. Resumen estadístico de las ejecuciones: HP

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	23976
Mejor Costo	23976
Peor Costo	23976
Costo Promedio	23976
Desviación Estándar Costo	0.0000
Tiempo Promedio de Ejecución	0.024223s
Mejor Tiempo de Ejecución	0.000000s
Desviación del Tiempo	0.012352
Generación Óptima Promedio	16.89
Generación más Rápida	4
Semilla más Rápida	2

Fig. 20. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

En la instancia UFLP 5 se observa que el algoritmo con hiperparámetros optimizados (HP) es el primero en converger al mejor valor de fitness. No obstante, todos los algoritmos logran alcanzar el óptimo conocido de 23,976. Destaca el algoritmo rápido, que si bien no está optimizado para precisión, logra alcanzar dicho óptimo con un tiempo promedio de ejecución considerablemente menor: 0.024223 segundos, frente a los 0.051278 segundos del algoritmo HP.

VII. UFLP 6

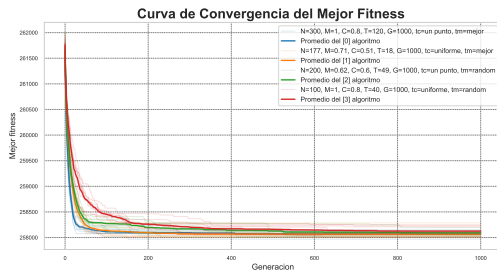


Fig. 21. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 6

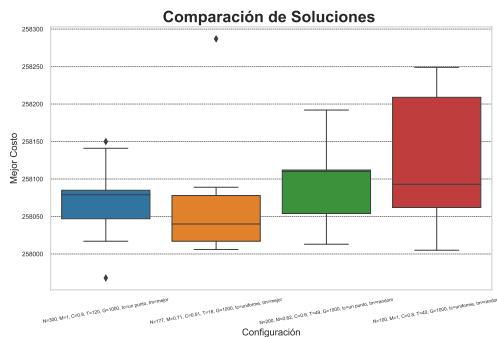


Fig. 22. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=300, M=1, C=0.8, T=120, G=1000, tc=un punto, tm=mejor, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257964
Mejor Costo	257968
Error	4
Error Relativo	0.000016
Peor Costo	258150
Costo Promedio	258072
Desviación Estándar Costo	53.4113
Tiempo Promedio de Ejecución	22.010208s
Mejor Tiempo de Ejecución	21.715303s
Desviación del Tiempo	0.144123 %
Semilla Mejor Costo	3

Fig. 23. Resumen estadístico de las ejecuciones: HP

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257964
Mejor Costo	258005
Error	41
Error Relativo	0.000159
Peor Costo	258249
Costo Promedio	258125
Desviación Estándar Costo	80.9373
Tiempo Promedio de Ejecución	2.301218s
Mejor Tiempo de Ejecución	2.267324s
Desviación del Tiempo	0.021378 %
Semilla Mejor Costo	2

Fig. 24. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

En la instancia UFLP 6, se observa que la curva de convergencia del mejor fitness se alarga en comparación con las instancias anteriores. Este comportamiento está asociado al mayor tamaño del problema, fenómeno que también se presenta en las instancias posteriores. El boxplot de los costos finales revela una mayor dispersión en los algoritmos aleatorios, especialmente en el Random 1, que aunque parece tener una media visualmente más baja, presenta un rango intercuartílico más amplio. Por su parte, el algoritmo HP muestra menor dispersión general, aunque con la presencia de algunos outliers que alargan las colas de su distribución.

En términos de desempeño, el algoritmo HP se destaca por obtener resultados consistentemente cercanos al óptimo conocido (257,964), alcanzando un mejor valor de 257,968, con solo 4 errores en las 9 ejecuciones y un tiempo promedio de 22.01 segundos. En contraste, el algoritmo rápido alcanza una solución de 258,005, con 41 errores, pero en un tiempo promedio significativamente menor: 2.301 segundos.

A pesar de su mayor tiempo de ejecución, el algoritmo HP se considera el más confiable para esta instancia, debido a su menor número de errores y mayor precisión en los resultados.

VIII. UFLP 7

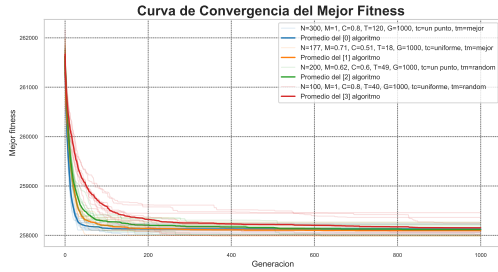


Fig. 25. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 7

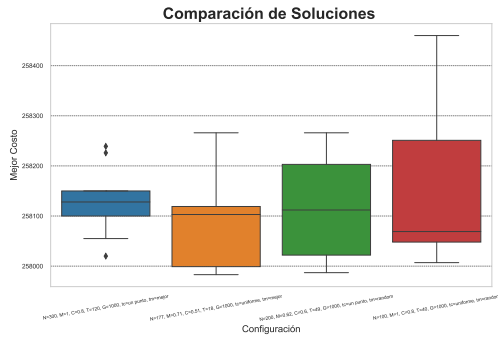


Fig. 26. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=177, M=0.71, C=0.51, T=18, G=1000, tc=uniforme, tm=mejor, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257961
Mejor Costo	257983
Error	22
Error Relativo	0.000085
Peor Costo	258266
Costo Promedio	258098
Desviación Estándar Costo	94.4737
Tiempo Promedio de Ejecución	7.667185s
Mejor Tiempo de Ejecución	7.459099s
Desviación del Tiempo	0.122490 %
Semilla Mejor Costo	13

Fig. 27. Resumen estadístico de las ejecuciones: Random 1

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257961
Mejor Costo	258007
Error	46
Error Relativo	0.000178
Peor Costo	258460
Costo Promedio	258154
Desviación Estándar Costo	155.0871
Tiempo Promedio de Ejecución	2.436730s
Mejor Tiempo de Ejecución	2.366434s
Desviación del Tiempo	0.048877 %
Semilla Mejor Costo	7

Fig. 28. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

En la instancia UFLP 7, la curva de convergencia del mejor fitness se mantiene prolongada, reflejando nuevamente la complejidad del problema. El algoritmo HP logra las mejores soluciones en términos de fitness, mientras que el algoritmo rápido es, como en las instancias previas, el menos eficiente en cuanto a calidad. El boxplot del algoritmo HP presenta la menor dispersión, aunque con algunos outliers que alargan la cola superior. Por otro lado, el algoritmo Random 1 muestra la media más baja entre todos, a pesar de su mayor rango intercuartílico. El algoritmo rápido exhibe la mayor dispersión y los valores más altos.

En esta ocasión, el mejor algoritmo fue el Random 1, que logró una solución de 257,983 frente al óptimo conocido de 257,961, acumulando 22 errores en las 9 ejecuciones, con un tiempo promedio de 7.667 segundos. El algoritmo rápido, por su parte, alcanzó un valor de 258,007 con 49 errores y un tiempo promedio de 2.437 segundos.

A pesar de no alcanzar la mejor media, el algoritmo HP demostró una gran estabilidad; sin embargo, en esta instancia, el equilibrio entre calidad y tiempo favoreció al Random 1 como la opción más destacada.

IX. UFLP 8

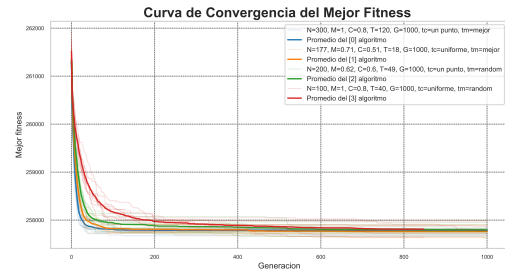


Fig. 29. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 8

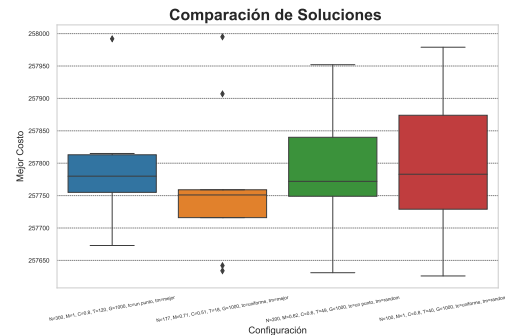


Fig. 30. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=200, M=0.62, C=0.6, T=49, G=1000, tc=un punto, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257626
Mejor Costo	257631
Error	5
Error Relativo	0.00019
Peor Costo	257952
Costo Promedio	257795
Desviación Estándar Costo	92.4010
Tiempo Promedio de Ejecución	4.749347s
Mejor Tiempo de Ejecución	4.673449s
Desviación del Tiempo	0.032644 %
Semilla Mejor Costo	23

Fig. 31. Resumen estadístico de las ejecuciones: Random 2

X. UFLP 9

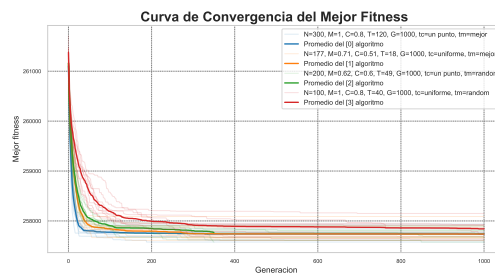


Fig. 33. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 9

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257626
Mejor Costo	257626
Peor Costo	257979
Costo Promedio	257793
Desviación Estándar Costo	103.6041
Tiempo Promedio de Ejecución	2.269799s
Mejor Tiempo de Ejecución	1.957390s
Desviación del Tiempo	0.113119
Generación Óptima Promedio	848.00
Generación más Rápida	848
Semilla más Rápida	2

Fig. 32. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

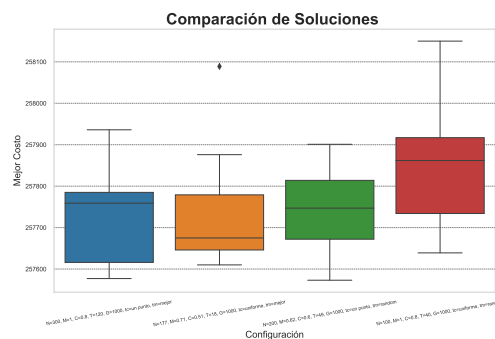


Fig. 34. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=200, M=0.62, C=0.6, T=49, G=1000, tc=un punto, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257573
Mejor Costo	257573
Peor Costo	257901
Costo Promedio	257743
Desviación Estándar Costo	117.0250
Tiempo Promedio de Ejecución	4.342476s
Mejor Tiempo de Ejecución	1.653932s
Desviación del Tiempo	0.951043
Generación Óptima Promedio	350.00
Generación más Rápida	350
Semilla más Rápida	7

Fig. 35. Resumen estadístico de las ejecuciones: Random 2

La curva de convergencia vuelve a extenderse como en los problemas de mayor tamaño, y aunque el comportamiento relativo de los algoritmos se mantiene (el HP con mejor fitness, el rápido con peor).

El boxplot del algoritmo Random 1 es el más compacto, aunque presenta outliers. A simple vista, el comportamiento del algoritmo Random 2 parece similar al del rápido, sin embargo, sorprendentemente fue el que obtuvo el mejor desempeño: alcanzó una solución de 257,631 frente al óptimo conocido de 257,626, cometiendo solo 5 errores en total, con un tiempo promedio de 4.7493 segundos.

El algoritmo rápido llegó exactamente al óptimo, pero con una mayor cantidad de errores (23) y menor tiempo promedio (2.268 segundos), lo que lo deja detrás en términos de consistencia. Por lo tanto, el Random 2 se considera el mejor algoritmo en esta instancia, debido al balance entre calidad y robustez.

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257573
Mejor Costo	257639
Error	66
Error Relativo	0.000256
Peor Costo	258150
Costo Promedio	257841
Desviación Estándar Costo	149.2213
Tiempo Promedio de Ejecución	2.296424s
Mejor Tiempo de Ejecución	2.228299s
Desviación del Tiempo	0.034027 %
Semilla Mejor Costo	7

Fig. 36. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

La curva de convergencia del mejor fitness nuevamente se muestra prolongada. Este patrón ya ha sido observado en los problemas anteriores, por lo que se menciona brevemente.

En cuanto a los boxplots, se observan resultados similares a los anteriores, con el algoritmo rápido presentando una ligera desventaja en comparación con los otros, como era de esperar.

El mejor algoritmo en esta instancia fue el Random 2, que alcanzó una solución de 257,573, coincidiendo con el óptimo conocido, con un tiempo promedio de 4.3424 segundos. Por su parte, el algoritmo rápido también llegó a la solución óptima de 257,573, pero con un tiempo ligeramente más bajo de 2.2964 segundos.

Aunque ambos algoritmos llegaron al óptimo, el Random 2 se destaca por su robustez en comparación con el rápido, demostrando una mayor consistencia en los resultados.

XI. UFLP 10

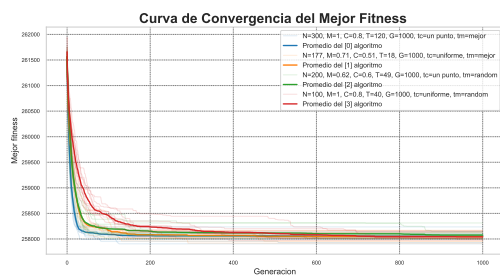


Fig. 37. Comparación de convergencia de los algoritmos en UFLP 10

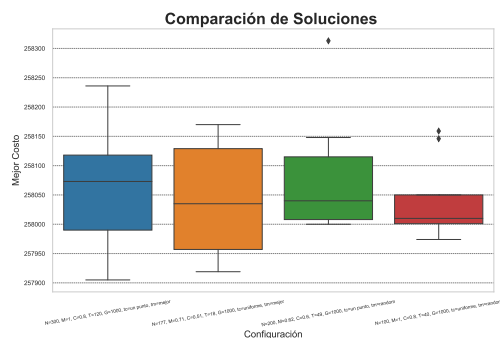


Fig. 38. Boxplots de la calidad de soluciones obtenidas

Configuración: N=300, M=1, C=0.8, T=120, G=1000, tc=un punto, tm=mejor, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257896
Mejor Costo	257905
Error	9
Error Relativo	0.000035
Peor Costo	258236
Costo Promedio	258057
Desviación Estándar Costo	101.0344
Tiempo Promedio de Ejecución	22.404052s
Mejor Tiempo de Ejecución	21.872984s
Desviación del Tiempo	0.341007 %
Semilla Mejor Costo	3

Fig. 39. Resumen estadístico de las ejecuciones: HP

Configuración: N=100, M=1, C=0.8, T=40, G=1000, tc=uniforme, tm=random, E=9, s=[2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23]

Métrica	Valor
Costo Objetivo	257896
Mejor Costo	257974
Error	78
Error Relativo	0.000302
Peor Costo	258159
Costo Promedio	258041
Desviación Estándar Costo	63.1965
Tiempo Promedio de Ejecución	2.354156s
Mejor Tiempo de Ejecución	2.305201s
Desviación del Tiempo	0.024994 %
Semilla Mejor Costo	5

Fig. 40. Resumen estadístico de las ejecuciones: Rápido

En esta instancia, los boxplots muestran una variabilidad similar entre los algoritmos, aunque destaca que el algoritmo rápido presenta la distribución más estrecha, indicando una mayor consistencia en los valores obtenidos. Sin embargo, también exhibe varios outliers, lo que refleja cierta inestabilidad en sus resultados.

El algoritmo más efectivo fue el de hiperparámetros (HP), que cometió solo 9 errores y alcanzó un valor de 257,905 frente al óptimo conocido de 257,896. Su tiempo promedio de ejecución fue de 22.404 segundos.

En contraste, aunque el algoritmo rápido fue más veloz (2.3542 segundos en promedio), su desempeño fue notablemente inferior, llegando a una solución de 257,974 con un total de 78 errores. Esto refuerza la superioridad del HP en términos de precisión, a pesar de su mayor demanda computacional.

XII. CONCLUSIONES

En general, el algoritmo HP ofreció la mejor calidad de soluciones en la mayoría de las instancias, aunque a costa de tiempos de ejecución considerablemente mayores. El algoritmo rápido, por su parte, destacó por su velocidad, pero presentó menor precisión y mayor número de errores. Sorprendentemente, en algunas instancias los algoritmos aleatorios mostraron un desempeño competitivo, lo que sugiere que, en problemas más simples, la fineza del ajuste de hiperparámetros puede no ser determinante. En conjunto, los resultados muestran un balance claro entre calidad y eficiencia, donde la elección del algoritmo dependerá de las prioridades del usuario: precisión o velocidad.