

Metaheurísticas: Práctica 1

Técnicas de Búsqueda Local y Algoritmos Greedy
para el Problema de la Máxima Diversidad

Pilar Navarro Ramírez - 76592479H
pilarnavarro@correo.ugr.es
Grupo 2: Viernes de 17:30 a 19:30

11 de abril de 2021

Índice

1. Descripción del problema	3
2. Descripción de la aplicación de los algoritmos	4
2.1. Representación de la soluciones	4
2.2. Contribución de un elemento	4
2.3. Función objetivo	5
3. Descripción de los algoritmos	6
3.1. Algoritmo Greedy	6
3.2. Búsqueda Local del Primer Mejor	9
3.3. Búsqueda local del Mejor	13
3.4. Búsqueda local con Greedy	14
4. Procedimiento para el desarrollo de la práctica	15
4.1. Manual de usuario	15
5. Experimentos y análisis de resultados	16
5.1. Resultados obtenidos	16
5.2. Comparación entre los algoritmos	20
5.3. Análisis de los resultados	22

1. Descripción del problema

El **Problema de la Máxima Diversidad** (**Maximum Diversity Problem, MDP**), es un problema NP-completo de optimización combinatoria. Consiste en seleccionar un subconjunto de m elementos de un conjunto inicial de n elementos (con $n > m$) de forma que se maximice la diversidad entre los elementos escogidos.

Además de esto, se dispone de una matriz $D = (d_{ij})$ de dimensión $n \times n$ que contiene las distancias entre todos los n elementos. Así, en la posición (i, j) de la matriz, se encuentra la distancia entre el elemento i -ésimo y el j -ésimo ($\forall i, j = 1, \dots, n$), siendo $d_{ii} = 0 \forall i = 1, \dots, n$. Por lo tanto, se trata de una matriz simétrica cuya diagonal está formada por ceros.

Existen varias formas de calcular la diversidad, pero la que nosotros usaremos consiste en calcular la suma de las distancias entre cada par de elementos de los m seleccionados.

El problema MDP se puede formular matemáticamente como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar } z_{MS}(x) &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} x_i x_j \\ \text{Sujeto a } \sum_{i=1}^n x_i &= m \\ x_i &\in \{0, 1\}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \end{aligned}$$

donde x es una solución al problema, esto es, es un vector binario de longitud n que indica los m elementos seleccionados, donde la posición i -ésima es 1 si se ha seleccionado el elemento i -ésimo.

2. Descripción de la aplicación de los algoritmos

Describimos aquí las consideraciones comunes a ambos algoritmos. En concreto, vamos a incluir la representación de las soluciones, la función objetivo y una función para calcular la contribución de un elemento, que es común a los dos algoritmos considerados en la práctica.

Los dos algoritmos parten de una matriz de distancias D de tamaño $n \times n$, como ya hemos comentado (que nosotros llamaremos simplemente *matriz* en nuestras implementaciones). Dicha matriz es construida leyendo las distancias de los ficheros de datos que se nos proporcionan en cada caso (de lo cual se encarga la función `readInput`). Se considera como entrada además el número de elementos a seleccionar m , también indicado en cada fichero.

2.1. Representación de la soluciones

Una solución vendrá dada como un contenedor de enteros que contiene los m elementos seleccionados, en vez de un vector binario como se indica en la descripción del problema. Esta última representación es menos eficiente, pues hay que tener en cuenta n elementos con sus distancias en vez de m a la hora de calcular la bondad de la solución (*fitness*), así como en cualquier otra operación que involucre recorrer la solución completa.

En el caso del algoritmo Greedy una solución será un conjunto (set) de enteros correspondientes a los elementos elegidos, que pueden tomar los valores de entre 1 y n , sin aparecer ninguno de ellos repetido. El tamaño de este conjunto será de m . Se usa aquí esta estructura de datos por ser el número de operaciones de consulta en la implementación del algoritmo muy pequeño en comparación con el número de operaciones de inserción y borrado, como veremos en la siguiente sección.

Para el algoritmo de la búsqueda local, tomamos un vector de enteros en lugar de un conjunto (por realizarse un mayor número de operaciones de consulta en este algoritmo que en greedy) cumpliendo exactamente las mismas condiciones que el conjunto (elementos no repetidos, tamaño m , enteros con valores entre 1 y n), junto con el valor de fitness asociado a la solución. Concretamente, consideramos la siguiente estructura:

```
struct solucion {  
    vector<int> elements;  
    double fitness;  
};
```

para la cual se ha sobrecargado el operador de asignación, de manera que al asignar una solución a otra lo que se hace es llamar al operador de asignación de cada una de las componentes del **struct**.

Aunque en un vector y en un conjunto los elementos aparecen ordenados, cabe mencionar que nosotros no tendremos en cuenta este orden, es decir, dos conjuntos o vectores con los mismos enteros pero en distinto orden son considerados la misma solución.

2.2. Contribución de un elemento

Definimos para ambos algoritmos una función **contribution**, que calcula la contribución de un determinado elemento al coste de la solución que se le pasa como parámetro. Esto es, suma las distancias de ese elemento a cada uno de los elementos que se encuentran en la solución indicada, la cual puede ser un conjunto o un vector de enteros, como ya hemos comentado.

El elemento para el cual se quiere calcular la contribución puede formar parte o no del conjunto solución. En caso de que el elemento se encuentre en dicho conjunto determina la contribución de ese elemento a la solución. Si no forma parte, esta función permite saber cómo contribuiría el elemento en caso de estar incluido en la misma.

El pseudocódigo de esta función es el siguiente:

Algorithm 1: CONTRIBUTION

Input: *conjunto* de enteros, *matriz* de distancias, entero *element*

Output: contribucion del entero *element* en *conjunto*

```

begin
  sum ← 0
  for i in conjunto do
    | sum ← sum + matriz[ element, i ]
  end
  return sum
end

```

2.3. Función objetivo

Como ya explicamos en el punto anterior, la función objetivo a maximizar en este problema es

$$z_{MS}(x) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m d_{ij}$$

que está definida en la función *fitness*, cuyo pseudocódigo es el siguiente:

Algorithm 2: FITNESS

Input: *conjunto* de enteros, *matriz* de distancias

Output: valor de la función objetivo para la solución dada en *conjunto*

```

begin
  sum ← 0
  for it1 = conjunto.begin to conjunto.end do
    | for it2 = it1 to conjunto.end do
      | | sum ← sum + matriz[conjunto(it1), conjunto(it2)]
    | end
  end
  return sum
end

```

Así, esta función permite evaluar la solución dada en *conjunto*, de manera que cuanto mayor sea el valor devuelto por esta función mejor será la solución. Como para la función *contribution*, el parámetro *conjunto* que contiene los enteros que determinan una solución, puede ser un conjunto/set o un vector, según si se usa en el algoritmo greedy o en el de la búsqueda local.

3. Descripción de los algoritmos

Pasamos ya a explicar los algoritmos implementados, que para esta primera práctica han sido 4: el algoritmo Greedy, la búsqueda local del primer mejor, la búsqueda local del mejor y la búsqueda local del primer mejor partiendo de la solución proporcionada por el algoritmo Greedy.

3.1. Algoritmo Greedy

Para este algoritmo consideramos dos conjuntos de elementos (enteros): el conjunto de los elementos que han sido seleccionados para formar parte de la solución, *Sel*, y el conjunto de elementos que no han sido seleccionados, *NoSel*.

El algoritmo empieza con el conjunto *Sel* vacío y añade a él en primer lugar el elemento más alejado al resto, esto es, aquel cuya suma de las distancias a todos los demás elementos es la mayor. Para determinar este elemento, nosotros hemos implementado la función `furthestElement`. Lo que hace es llamar a la función `contribution` (descrita en el apartado anterior) para cada uno de los elementos del problema y con un conjunto que contiene a todos los elementos, es decir, calcula la contribución de cada uno de los elementos a dicho conjunto total, y devuelve el elemento cuya contribución es la mayor.

Algorithm 3: FURTHESTELEMENT

Input: *matriz* de distancias

Output: elemento más alejado del resto, el de mayor contribución

begin

```

NoSel  $\leftarrow \{0, 1, \dots, n-1\}$ ; // Inicializo el conjunto de no
// seleccionados a los  $n$  elementos del problema

```

furthest $\leftarrow -1$
$$max_sum_dist \leftarrow -1$$
for i *in* $NoSel$ **do**

```

| contrib ← contribution (NoSel, matriz, i )

```

if *contrib* > *max_sum_dist* **then**
$$max_sum_dist \leftarrow contrib$$
furthest \leftarrow i

end

end

return furthest

end

Una vez añadido a *Sel* el elemento más alejado a todos los demás, el algoritmo continúa introduciendo en cada iteración el elemento no seleccionado que está más alejado al conjunto de elementos seleccionados, hasta alcanzar el tamaño máximo que puede tener la solución, m . Definimos la distancia de un elemento a un conjunto como el mínimo de las distancias de ese elemento a los elementos del conjunto:

$$Dist(e, Sel) = \min_{s \in Sel} d(s, e)$$

La función `distanceToSet` se encarga de calcular esta distancia:

Algorithm 4: DISTANCETOSET

Input: *conjunto* de enteros, *matriz* de distancias, entero *element*

Output: distancia de *element* a *conjunto*

```
begin
   $min\_dist \leftarrow \infty$ 
  for  $i$  in conjunto do
     $dist \leftarrow matriz[element, i]$ 
    if  $dist < min\_dist$  then
       $min\_dist \leftarrow dist$ 
    end
  end
  return  $min\_dist$ 
end
```

Para determinar en cada iteración del algoritmo cuál es el elemento no seleccionado más alejado de *Sel*, en el sentido de que maximiza la distancia a dicho conjunto, hacemos uso de la función `furthestToSel`, cuyo pseudocódigo se muestra a continuación:

Algorithm 5: FURTHESTTOSEL

Input: conjunto de enteros seleccionados *Sel*

Input: conjunto de enteros no seleccionados *NoSel*

Input: *matriz* de distancias

Output: elemento de *NoSel* más alejado de *Sel*

```
begin
   $furthest \leftarrow -1$ 
   $max\_dist \leftarrow -1$ 
  for  $i$  in NoSel do
     $dist \leftarrow distanceToSet(Sel, matriz, i)$ 
    if  $dist > max\_dist$  then
       $max\_dist \leftarrow dist$ 
       $furthest \leftarrow i$ 
    end
  end
  return  $furthest$ 
end
```

Podemos ya ver el pseudo-código del algoritmo Greedy completo, donde se hace uso de las

funciones anteriores en el sentido que hemos ido explicando:

Algorithm 6: GREEDY

Input: *matriz* de distancias, tamaño de la solución m

Output: solución válida del problema MDP junto con su fitness

begin

$NoSel \leftarrow \{0, 1, \dots, n - 1\}$

$Sel \leftarrow \emptyset$

$furthest \leftarrow furthestElement(matriz)$

$Sel \leftarrow Sel \cup \{furthest\}$

$NoSel \leftarrow NoSel \setminus \{furthest\}$

while $|Sel| < m$ **do**

$furthest \leftarrow furthestToSel(Sel, NoSel, matriz)$

$Sel \leftarrow Sel \cup \{furthest\}$

$NoSel \leftarrow NoSel \setminus \{furthest\}$

end

return $Sel, fitness(Sel, matriz)$

end

3.2. Búsqueda Local del Primer Mejor

Este algoritmo parte de una solución generada aleatoriamente y en cada iteración se generan soluciones del entorno (soluciones vecinas) hasta que se encuentra una que es mejor que la actual, la cual es entonces sustituida por la nueva solución generada. El algoritmo termina cuando se explora todo el vecindario y no se encuentra ninguna solución mejor o, para nuestro caso, cuando se han evaluado 100000 soluciones diferentes.

Para generar la solución aleatoria de partida consideramos la siguiente función:

Algorithm 7: RANDOMSOLUTION

Input: tamaño de la solución m , *matriz* de distancias

Output: solución válida del problema MDP junto con su fitness

begin

```
     $sol \leftarrow \emptyset$  ;                                // Partimos de la solución vacía
    while  $|sol| < m$  do
         $random \leftarrow$  elemento aleatorio de  $\{0, \dots, n-1\}$ 
        if  $random \notin sol$  then
             $sol \leftarrow sol \cup random$  ;           // Si el elemento aleatorio considerado
                                                    // no está ya en la solución, se añade
        end
    end
    return  $sol, fitness(sol, matriz)$ 
```

end

Definimos otra función `validElements`, que determina los elementos que son válidos para ser añadidos a un solución, es decir, aquellos elementos que no se encuentran ya en la misma:

Algorithm 8: VALIDELEMENTS

Input: vector de enteros seleccionados, sel

Input: número total de elementos del problema, n

Output: vector de enteros no seleccionados

begin

```
     $no\_sel \leftarrow \emptyset$  ;                       // Partimos del vector de no seleccionados vacío
     $elem \leftarrow 0$ 
    while  $|no\_sel| < n - |sel|$  do
        if  $elem \notin sel$  then
            // Si el elemento considerado en la iteración actual no se
            // encuentra en el conjunto de seleccionados, se añade
            // al vector de no seleccionados
             $no\_sel \leftarrow no\_sel \cup elem$ 
        end
         $elem \leftarrow elem + 1$ ;
    end
    return  $no\_sel$ 
```

end

Para generar las soluciones vecinas, lo que se hace es escoger un elemento de la solución e intercambiarlo por otro elemento que no se encuentre en la misma, es decir, un elemento del conjunto devuelto por la función recién introducida. Se puede asegurar que este intercambio, cumpliendo las condiciones descritas, da siempre lugar a una solución válida.

Una solución vecina será aceptada si mejora a la solución actual, en otro caso se rechaza y se genera otra solución. La función *improvement* se encarga de hacer esto. Es decir, determina si un cierto intercambio en la solución produce una mejora o no y en caso afirmativo actualiza la solución cambiando el elemento viejo por el nuevo y calculando el fitness de la nueva solución. Este cálculo resulta más eficiente si se factoriza, esto es, en vez de volver a considerar las distancias entre todos los elementos de la nueva solución, basta con sustraer del fitness antiguo la contribución del elemento eliminado y añadirle la contribución del nuevo elemento a la solución.

Para que se produzca una mejora, se debe cumplir que el nuevo elemento introducido tenga una mayor contribución a la solución que el elemento eliminado. Así, no hay que calcular la bondad de la nueva solución para compararla con la antigua, sino que es suficiente con determinar la contribución del elemento nuevo a la solución y compararla con la del elemento anterior.

Veamos ya el pseudo-código que lleva a cabo todas estas consideraciones:

Algorithm 9: IMPROVEMENT

Input: *sol*: solución
Input: *pos*: posición de *sol* cuyo elemento se va a cambiar
Input: *old_cont*: contribución a la solución del elemento que se encuentra en *pos*
Input: *elem*: nuevo elemento que se va a introducir en la posición *pos* de *sol*
Input: *matriz*: matriz de distancias
Output: *mejora*: booleano que indica si la solución mejora o no
Output: *sol*: nueva solución si se produce mejora o la antigua si no se mejora

begin
 mejora \leftarrow false
 // Solución auxiliar que es copia de la solución considerada
 nueva \leftarrow *sol*
 // Elemento de la solución que se va a intercambiar
 old_elem \leftarrow *sol*[*pos*]
 nueva[*pos*] \leftarrow *elem*
 // Contribución del nuevo elemento a la solución actualizada
 new_cont \leftarrow *contribution*(*nueva*, *matriz*, *elem*)
 // Si la contribución del nuevo elemento es mayor que la del antiguo,
 se produce mejora y se actualiza la solución
 if *new_cont* > *old_cont* **then**
 // Factorización de la función objetivo
 nueva.fitness \leftarrow *sol.fitness* - *old_cont* + *new_cont*
 sol \leftarrow *nueva*
 mejora \leftarrow true
 end
 return *mejora*, *sol*
end

El elemento a intercambiar de la solución no se escoge de manera aleatoria, sino que se lleva a cabo una exploración inteligente del entorno de soluciones, enfocándonos en zonas donde se pueden obtener soluciones mejores. Concretamente, lo que se hace es calcular la contribución de cada elemento de la solución a la bondad de la misma, y seleccionar para intercambiar el elemento que menos contribuye. La función `lowestContribution` se encarga de esto:

Algorithm 10: LOWESTCONTRIBUTION

Input: *sol*: vector de enteros que determinan una solución
Input: *matriz*: matriz de distancias
Output: *pos_min*: posición en la solución *sol* del elemento que menos contribuye
Output: *min_contrib*: contribución del elemento que menos contribuye
begin
 pos_min $\leftarrow -1$
 min_contrib $\leftarrow \infty$
 for *i* **in** *indices of sol* **do**
 cont $\leftarrow \text{contribution}(\text{sol}, \text{matriz}, \text{sol}[i])$
 if *cont* < *min_contrib* **then**
 pos_min $\leftarrow i$
 min_contrib $\leftarrow \text{cont}$
 end
 end
 return *pos_min*, *min_contrib*
end

Sólo nos queda un detalle del algoritmo por explicar y es qué elemento de entre los no seleccionados se introduce en la posición del elemento que menos contribuye para generar una solución vecina. Pues en este caso sí es totalmente aleatorio. Por ello, lo que hacemos es barajar en cada iteración el conjunto de elementos que no forman parte de la solución.

Presentamos finalmente el algoritmo de la búsqueda local, que hace uso de todas estas

funciones explicadas:

Algorithm 11: LOCALSEARCH

Input: m : tamaño de solución

Input: matriz: matriz de distancias

Output: solución válida del problema MDP junto con su fitness

begin

$num_eval \leftarrow 0$

$mejora \leftarrow \text{true}$

 // Empezamos con una solución aleatoria

$sol \leftarrow \text{randomSolution}(m, \text{matriz})$

 // Elementos válidos para el intercambio

$valid_elements \leftarrow \text{validElements}(sol, \text{matriz.size})$

 // Elemento que menos contribuye y su contribución

$min_contrib \leftarrow \text{lowestContribution}(sol, \text{matriz})$

 // Iteramos mientras la solución mejore y no se haya superado el
 número máximo de evaluaciones de la función objetivo

while $mejora$ **and** $num_eval < 100000$ **do**

$mejora \leftarrow \text{false}$

 // $min_contrib$ contiene tanto la posición como la contribución del
 elemento que menos contribuye

$min_pos \leftarrow min_contrib.pos$

 // Guardamos el elemento antiguo que vamos a cambiar

$old_elem \leftarrow sol[min_pos]$

$\text{shuffle}(valid_elements)$

 // Intercambiamos el elemento que menos contribuye por todos los
 posibles hasta que se produzca una mejora

for $k \in valid_elements$ **and** $mejora$ **is** false **do**

$mejora \leftarrow \text{improvement}(sol, min_pos, min_contrib.contrib, k, \text{matriz})$

$num_eval \leftarrow num_eval + 1$

end

if $mejora$ **then**

 // Actualizamos los elementos válidos, cambiando el elemento
 nuevo por el antiguo

$valid_elements \leftarrow valid_elements \setminus \{k\}$

$valid_elements \leftarrow valid_elements \cup \{old_elem\}$

 // Determinamos el elemento que menos contribuye en la nueva
 solución

$min_contrib \leftarrow \text{lowestContribution}(sol, \text{matriz})$

end

end

return $sol.elements, sol.fitness$

end

3.3. Búsqueda local del Mejor

Aunque no se pide, implementamos también el algoritmo de la búsqueda local del mejor, que, a diferencia de la búsqueda local del primer mejor, explora todo el vecindario de cada solución y selecciona la mejor solución vecina, no se conforma con la primera solución que sea mejor que la actual.

Para la implementación, partimos de las mismas funciones que en la búsqueda local del primer mejor, pero esta vez no haremos uso de la función `improvement`, pues incluimos su código directamente en la propia función del algoritmo en sí.

La mejor solución del vecindario será aquella que se consigue al cambiar el elemento de la solución actual que menos contribuye por el elemento de los no seleccionados que más contribuiría a la bondad de la misma en caso de formar parte de ella. Para determinar este elemento, consideramos la función `greatestContribution`, que llama a la función `contribution` para la solución que se le pasa como parámetro por cada uno de los elementos no seleccionados y devuelve la posición del elemento que más contribuiría, así como su contribución:

Algorithm 12: GREATESTCONTRIBUTION

Input: `sol`: vector de enteros que determinan una solución
Input: `elements`: vector de enteros que determina los elementos no seleccionados
Input: `matriz`: matriz de distancias
Output: posición del vector *elements* del elemento que más contribuiría al fitness de *sol* en caso de formar parte de ella y su contribución

```
begin
    pos_max ← -1
    max_contrib ← 0
    for i in indices of elements do
        cont ← contribution(sol, matriz, elements[i])
        if cont > max_contrib then
            pos_max ← i
            max_contrib ← cont
        end
    end
    return pos_max, max_contrib
end
```

El pseudo-código de la búsqueda local del mejor es bastante parecido al de la búsqueda local

del primer mejor, salvo por los detalles ya comentados:

Algorithm 13: LOCALSEARCHMEJOR

Input: m : tamaño de solución

Input: matriz: matriz de distancias

Output: solución válida del problema MDP junto con su fitness

begin

$num_eval \leftarrow 0$

$mejora \leftarrow \text{true}$

$sol \leftarrow \text{randomSolution}(m, \text{matriz})$

$valid_elements \leftarrow \text{validElements}(sol, \text{matriz.size})$

$min_contrib \leftarrow \text{lowestContribution}(sol, \text{matriz})$

while $mejora$ **and** $num_eval < 100000$ **do**

$mejora \leftarrow \text{false}$

$min_pos \leftarrow min_contrib.pos$

$old_elem \leftarrow sol[min_pos]$

$aux \leftarrow sol$; // Solución auxiliar que es copia de la solución actual

 // Eliminamos de la solución auxiliar el elemento que menos

 contribuye, el cual vamos a cambiar

$aux \leftarrow aux \setminus \{old_elem\}$

 // Determinamos el elemento de los posibles a intercambiar que más

 contribuye

$max_contrib \leftarrow \text{greatestContribution}(aux, valid_elements, \text{matriz})$

 // Si se produce una mejora al cambiar el elemento que menos

 contribuye, actualizamos la solución

if $max_cont.cont > min_cont.cont$ **then**

 // Añadimos a la solución el elemento no seleccionado que más

 contribuye

$aux \leftarrow aux \cup \{valid_elements[max_cont.pos]\}$

$aux.fitness \leftarrow sol.fitness - min_cont.cont + max_cont.cont$

$sol \leftarrow nueva$

$mejora \leftarrow \text{true}$

end

if $mejora$ **then**

 // Actualizamos los elementos válidos

$valid_elements \leftarrow valid_elements \setminus \{valid_elements[max_cont.pos]\}$

$valid_elements \leftarrow valid_elements \cup \{old_elem\}$

$min_contrib \leftarrow \text{lowestContribution}(sol, \text{matriz})$

end

end

return $sol.elements, sol.fitness$

end

3.4. Búsqueda local con Greedy

El último algoritmo estudiado es una modificación de la búsqueda local. En vez de tomar como solución inicial una solución totalmente aleatoria, se parte de la solución que nos proporciona el algoritmo Greedy.

Hemos considerado el algoritmo de la búsqueda local del primer mejor para probar esta modificación. Así, la implementación es idéntica a la de dicho algoritmo, salvo porque no se

hace uso de la función `randomSolution` para generar la solución inicial, sino de la función `greedy`, cuyo pseudo-código también hemos visto ya.

4. Procedimiento para el desarrollo de la práctica

La implementación de todos los algoritmos ha sido llevada a cabo usando el lenguaje C++ y la librería STL, de la cual usamos los tipos de estructuras de datos **set** y **vector**, como ya hemos comentado. Además, se utilizan las siguientes funciones:

- `clock` de la librería `time.h` para medir el tiempo de ejecución
- `shuffle` y `find` de la librería `algorithm`
- `rand`, para generar números pseudo-aleatorios y `srand`, para fijar una semilla, de `stdlib.h`
- `numeric_limits<double>::infinity()` de la librería `limits` para inicializar los valores mínimos a infinito

4.1. Manual de usuario

Los ejecutables de cada uno de los algoritmos estudiados se encuentran en la carpeta **bin** del proyecto. Disponemos de los siguientes archivos:

- `greedy` → algoritmo `greedy`
- `localSearch` → algoritmo de búsqueda local del primer mejor
- `localSearchMejor` → algoritmo de búsqueda local del mejor
- `localSearchGreedy` → algoritmo de búsqueda local con `greedy`

Todos muestran los resultados por pantalla en el formato: *Fitness, Tiempo de ejecución (s)* pero podemos redirigir la salida al fichero que queramos. Además, la semilla se le pasa como parámetro (en el caso de los algoritmos de la búsqueda local) y leen los datos de la entrada estándar. Así, para ejecutar el algoritmo de la búsqueda local del primer mejor con una semilla de 4, con el fichero de datos de entrada *MDG – a_1_n500_m50.txt* y con salida en el fichero *localSearch.csv*, basta con escribir en consola la siguiente sentencia:

```
bin/localSearch 4 < data/MDG–a_1_n500_m50.txt >> salida/localSearch.csv
```

Para el algoritmo `Greedy` la sentencia sería igual pero sin incorporar la semilla.

Para automatizar el proceso de ejecución de cada algoritmo sobre los distintos casos de estudio, se dispone del script `execute.sh`. La semilla se fija dentro de este archivo en la variable `semilla`, por lo que para ejecutar los algoritmos con todos los ficheros de datos con una semilla diferente, solo hay que cambiar el valor de dicha variable y ejecutar el script.

Por otra parte, como era de esperar, el fichero `makefile` se encarga de la compilación. Al escribir en consola la orden `make` se compilan todos los ficheros de código fuente y se ejecuta el script `execute.sh`.

5. Experimentos y análisis de resultados

Los experimentos han sido realizados en el mismo ordenador, que tiene las siguientes características: sistema operativo Ubuntu 20.04.1 64 bits, procesador Intel Core i7-6500U 2.50GHz, memoria RAM 8GB DDR3 L.

Para los algoritmos de búsqueda local, los resultados han sido obtenidos fijando la semilla:

7413

Los casos del problema considerados son 30, elegidos de los casos recopilados en la biblioteca **MDPLib**. Concretamente, se estudia el grupo de casos **MDG**, del que se han seleccionado las 10 primeras instancias del *tipo a* (matrices $n \times n$ con distancias enteras aleatorias en $\{0, 10\}$, $n=500$ y $m=50$), 10 instancias (entre la 21 y la 30) del *tipo b* (matrices $n \times n$ con distancias reales aleatorias en $[0, 1000]$, $n=2000$ y $m=200$) y otras 10 instancias (1,2,8,9,10,13,14,15,19,20) del *tipo c* (matrices $n \times n$ con distancias enteras aleatorias en $\{00, 1000\}$, $n=3000$ y $m = \{300, 400, 500, 600\}$).

5.1. Resultados obtenidos

Presentamos a continuación los valores de coste, desviación y tiempo de ejecución obtenidos para cada uno de los 4 algoritmos considerados y para cada caso de estudio.

Algoritmo Greedy

Caso	Coste obtenido	Desv	Tiempo (s)
MDG-a_1_n500_m50	6865.94	12.36	0.00431
MDG-a_2_n500_m50	6754.02	13.09	0.004396
MDG-a_3_n500_m50	6741.6	13.12	0.004332
MDG-a_4_n500_m50	6841.59	11.95	0.004125
MDG-a_5_n500_m50	6740.34	13.09	0.004243
MDG-a_6_n500_m50	7013.94	9.77	0.004313
MDG-a_7_n500_m50	6637.46	14.59	0.004386
MDG-a_8_n500_m50	6946.28	10.38	0.004014
MDG-a_9_n500_m50	6898.01	11.22	0.004446
MDG-a_10_n500_m50	6853.68	11.91	0.00442
MDG-b_21_n2000_m200	10314568.35	8.72	0.450164
MDG-b_22_n2000_m200	10283328.5	8.89	0.448588
MDG-b_23_n2000_m200	10224214.16	9.52	0.444544
MDG-b_24_n2000_m200	10263575.47	9.10	0.456051
MDG-b_25_n2000_m200	10250090.79	9.26	0.438881
MDG-b_26_n2000_m200	10196189.88	9.71	0.535054
MDG-b_27_n2000_m200	10358195.61	8.38	0.652858
MDG-b_28_n2000_m200	10277383.17	8.89	0.514529
MDG-b_29_n2000_m200	10291258.67	8.90	0.453689
MDG-b_30_n2000_m200	10263859.33	9.14	0.437068
MDG-c_1_n3000_m300	22943111	7.80	1.557347
MDG-c_2_n3000_m300	22982398	7.72	1.703191
MDG-c_8_n3000_m400	40434465	6.91	2.50232
MDG-c_9_n3000_m400	40488295	6.79	2.391048
MDG-c_10_n3000_m400	40455410	6.95	2.641655
MDG-c_13_n3000_m500	63170811	5.73	3.631593
MDG-c_14_n3000_m500	62817710	6.21	3.497278
MDG-c_15_n3000_m500	63066444	5.86	3.515948
MDG-c_19_n3000_m600	90566205	5.30	4.681146
MDG-c_20_n3000_m600	90602264	5.27	5.020458

Tabla 1: Resultados para el algoritmo Greedy

Búsqueda local del primer mejor

Caso	Coste obtenido	Desv	Tiempo (s)
MDG-a_1_n500_m50	7599.76	2.99	0.002025
MDG-a_2_n500_m50	7679.05	1.19	0.001863
MDG-a_3_n500_m50	7636.37	1.59	0.001918
MDG-a_4_n500_m50	7589.15	2.33	0.001854
MDG-a_5_n500_m50	7588.68	2.15	0.002375
MDG-a_6_n500_m50	7589.2	2.37	0.001465
MDG-a_7_n500_m50	7616.8	1.99	0.001889
MDG-a_8_n500_m50	7570.99	2.32	0.001829
MDG-a_9_n500_m50	7650.44	1.54	0.001972
MDG-a_10_n500_m50	7623.53	2.02	0.001726
MDG-b_21_n2000_m200	11194345.39	0.93	0.078849
MDG-b_22_n2000_m200	11198330.26	0.78	0.121368
MDG-b_23_n2000_m200	11182727.52	1.04	0.090211
MDG-b_24_n2000_m200	11184415.56	0.94	0.125306
MDG-b_25_n2000_m200	11202715.92	0.83	0.134078
MDG-b_26_n2000_m200	11152433.18	1.24	0.116869
MDG-b_27_n2000_m200	11189891.7	1.02	0.119383
MDG-b_28_n2000_m200	11157321.43	1.09	0.106994
MDG-b_29_n2000_m200	11192932.07	0.92	0.104435
MDG-b_30_n2000_m200	11152329.79	1.28	0.078128
MDG-c_1_n3000_m300	24648263	0.95	0.501001
MDG-c_2_n3000_m300	24676154	0.92	0.512707
MDG-c_8_n3000_m400	43098299	0.78	0.898523
MDG-c_9_n3000_m400	43141730	0.68	1.175382
MDG-c_10_n3000_m400	43201539	0.63	1.046369
MDG-c_13_n3000_m500	66668600	0.52	1.660269
MDG-c_14_n3000_m500	66693391	0.43	1.673518
MDG-c_15_n3000_m500	66783597	0.31	1.794494
MDG-c_19_n3000_m600	95307787	0.34	3.095673
MDG-c_20_n3000_m600	95315225	0.34	3.067012

Tabla 2: Resultados para el algoritmo de búsqueda local del primer mejor

Búsqueda local del mejor

Caso	Coste obtenido	Desv	Tiempo (s)
MDG-a_1_n500_m50	7580.05	3.24	0.001793
MDG-a_2_n500_m50	7617.11	1.99	0.001929
MDG-a_3_n500_m50	7589.61	2.19	0.001656
MDG-a_4_n500_m50	7572.04	2.55	0.001308
MDG-a_5_n500_m50	7670.34	1.09	0.001637
MDG-a_6_n500_m50	7724.43	0.63	0.001977
MDG-a_7_n500_m50	7473.24	3.84	0.001383
MDG-a_8_n500_m50	7544.83	2.66	0.001829
MDG-a_9_n500_m50	7579.92	2.45	0.001463
MDG-a_10_n500_m50	7606.95	2.23	0.001811
MDG-b_21_n2000_m200	11113089.86	1.65	0.469424
MDG-b_22_n2000_m200	11166577.4	1.06	0.572685
MDG-b_23_n2000_m200	11169380.46	1.16	0.575028
MDG-b_24_n2000_m200	11158896.27	1.17	0.542956
MDG-b_25_n2000_m200	11147071.12	1.32	0.54423
MDG-b_26_n2000_m200	11165106.44	1.13	0.496052
MDG-b_27_n2000_m200	11190992.92	1.01	0.687342
MDG-b_28_n2000_m200	11160559.71	1.06	0.661071
MDG-b_29_n2000_m200	11179070.37	1.05	0.691234
MDG-b_30_n2000_m200	11163835.18	1.17	0.646183
MDG-c_1_n3000_m300	24722149	0.65	2.228189
MDG-c_2_n3000_m300	24709762	0.79	2.095256
MDG-c_8_n3000_m400	43172902	0.61	3.001684
MDG-c_9_n3000_m400	43127117	0.72	2.652455
MDG-c_10_n3000_m400	43169538	0.71	2.937712
MDG-c_13_n3000_m500	66585022	0.64	3.722707
MDG-c_14_n3000_m500	66788577	0.29	4.544242
MDG-c_15_n3000_m500	66716929	0.41	4.289016
MDG-c_19_n3000_m600	95226517	0.43	5.620159
MDG-c_20_n3000_m600	95225754	0.44	5.588015

Tabla 3: Resultados para el algoritmo de búsqueda local del mejor

Búsqueda local del primer mejor con algoritmo Greedy

Caso	Coste obtenido	Desv	Tiempo (s)
MDG-a_1_n500_m50	7625.19	2.66	0.005733
MDG-a_2_n500_m50	7551.68	2.83	0.005135
MDG-a_3_n500_m50	7588.86	2.20	0.005502
MDG-a_4_n500_m50	7662.25	1.39	0.005404
MDG-a_5_n500_m50	7547.65	2.68	0.005724
MDG-a_6_n500_m50	7636.77	1.76	0.005355
MDG-a_7_n500_m50	7616.15	2.00	0.005355
MDG-a_8_n500_m50	7624.97	1.62	0.005969
MDG-a_9_n500_m50	7518.76	3.23	0.005077
MDG-a_10_n500_m50	7542.64	3.06	0.00511
MDG-b_21_n2000_m200	11185039.72	1.02	0.610424
MDG-b_22_n2000_m200	11184141.62	0.91	0.522704
MDG-b_23_n2000_m200	11190909.26	0.96	0.540426
MDG-b_24_n2000_m200	11159761.94	1.16	0.576491
MDG-b_25_n2000_m200	11199458.6	0.86	0.671819
MDG-b_26_n2000_m200	11193667.18	0.87	0.582583
MDG-b_27_n2000_m200	11232218.74	0.65	0.691513
MDG-b_28_n2000_m200	11145206.65	1.19	0.596009
MDG-b_29_n2000_m200	11216509	0.71	0.553593
MDG-b_30_n2000_m200	11209294.03	0.77	0.560047
MDG-c_1_n3000_m300	24671605	0.85	2.320993
MDG-c_2_n3000_m300	24707939	0.79	2.382559
MDG-c_8_n3000_m400	43135518	0.69	3.701453
MDG-c_9_n3000_m400	43091952	0.80	3.832309
MDG-c_10_n3000_m400	43163282	0.72	3.418904
MDG-c_13_n3000_m500	66625492	0.58	4.735539
MDG-c_14_n3000_m500	66694332	0.43	5.174823
MDG-c_15_n3000_m500	66803263	0.28	5.421456
MDG-c_19_n3000_m600	95283274	0.37	7.770926
MDG-c_20_n3000_m600	95205161	0.46	7.032408

Tabla 4: Resultados para el algoritmo de búsqueda local del primer mejor con Greedy

5.2. Comparación entre los algoritmos

Mostramos ahora una tabla con la media de los estadísticos (desviación y tiempo de ejecución) para cada uno de los cuatro algoritmos:

Algoritmo	Desv	Tiempo (s)
Greedy	9.22	1.2
BL del Primer Mejor	1.22	0.55
BL del Mejor	1.34	1.42
BL con Greedy	1.28	1.73

Tabla 5: Comparativa de estadísticos medios obtenidos por distintos algoritmos para el MDP

En las siguientes figuras se comparan gráficamente las desviaciones y tiempos de ejecución de los distintos algoritmos para cada uno de los casos de estudio:

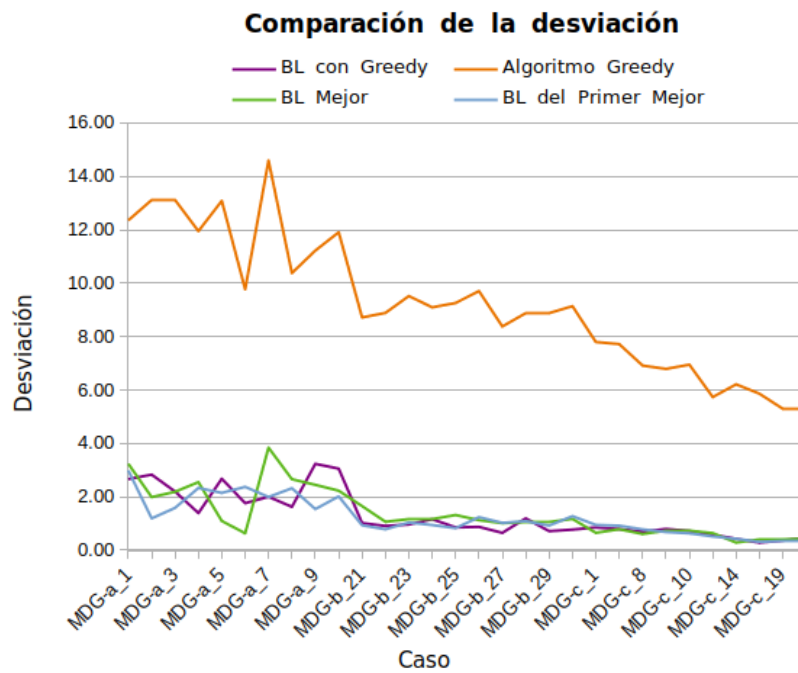


Figura 1: Comparación de la desviación de los distintos algoritmos para cada caso de estudio

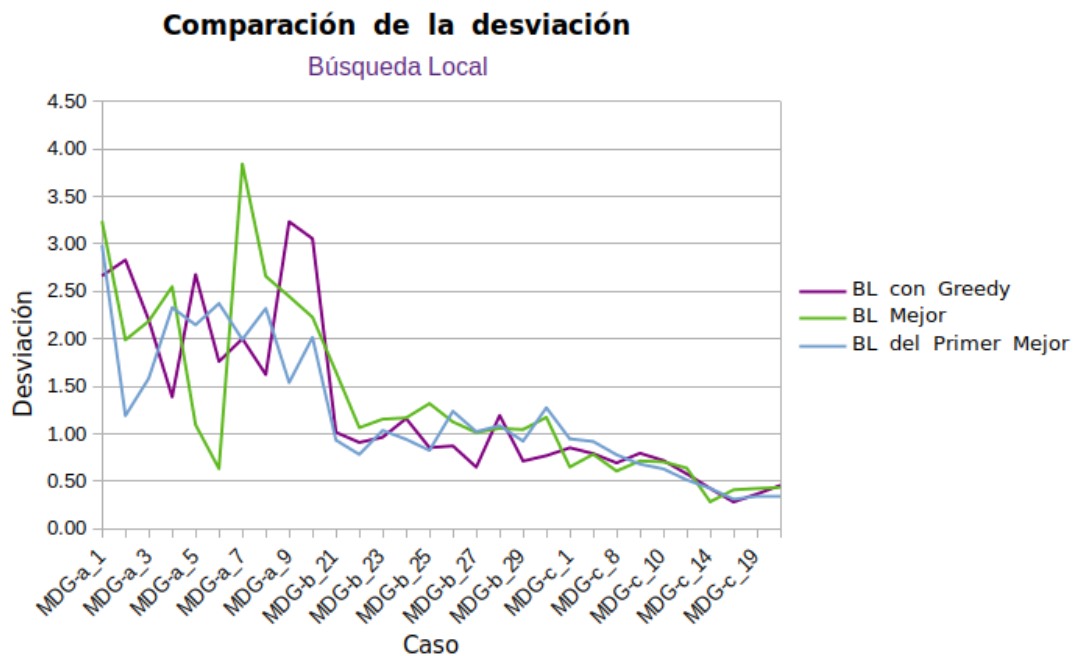


Figura 2: Comparación de la desviación de los algoritmos de búsqueda local para los distintos casos de estudio

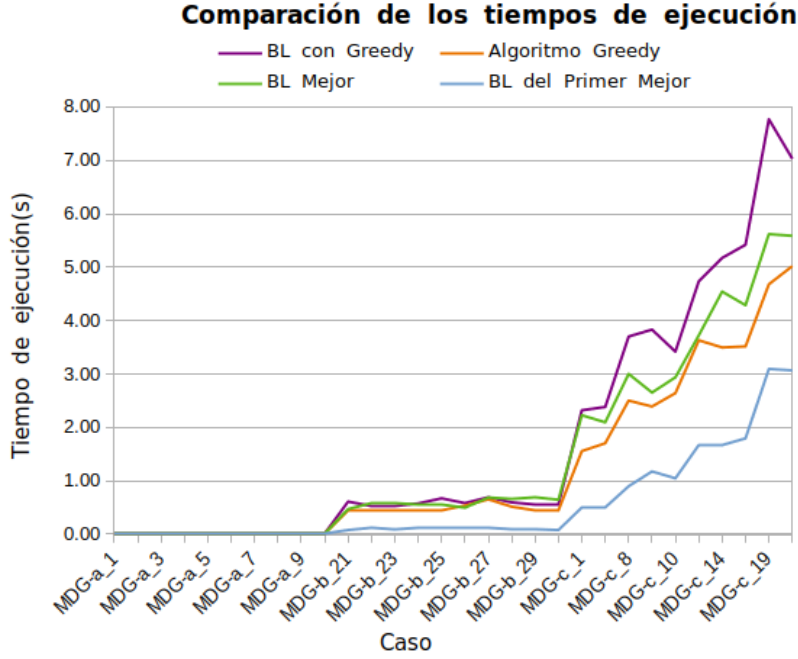


Figura 3: Comparación de los tiempos de ejecución de los distintos algoritmos para cada caso de estudio

5.3. Análisis de los resultados

Para tener una visión global de los resultados obtenidos por los distintos algoritmos empezamos observando la Tabla 5. Nos damos cuenta de que la búsqueda local del primer mejor presenta la media más baja de la desviación, así como el menor tiempo de ejecución. En el otro extremo tenemos el algoritmo Greedy, que nos da una media de la desviación muy alta, aunque con un tiempo de ejecución ligeramente menor que las otras dos variantes de la búsqueda local. El algoritmo de la búsqueda local con Greedy es el que tarda más tiempo en ejecutarse en media con diferencia, pero presenta una desviación casi tan buena como la de la búsqueda local del primer mejor. En un término medio encontramos la búsqueda local del mejor, con una media de la desviación algo mayor que la obtenida por la BL del primer mejor y un tiempo de ejecución menor que la BL con Greedy pero superior a todos los demás.

En la Figura 1 apreciamos que el algoritmo Greedy obtiene para todos los casos de estudio una desviación mucho mayor que los algoritmos de búsqueda local. Esto puede ser debido a que Greedy explora el espacio de soluciones en menor profundidad que los algoritmos de búsqueda local. Además, el criterio elegido en greedy para medir la distancia de un elemento a un conjunto (mínimo de las distancias de ese elemento a los elementos del conjunto) tiene sentido desde el punto de vista matemático, pero para la práctica en este problema no es el criterio más adecuado. Una mejor elección habría sido considerar la suma de las distancias de ese elemento a todos los del conjunto, que es lo que tratamos de maximizar en MDP.

Si nos vamos ahora a la Figura 2, donde se comparan las distintas variantes del algoritmo de búsqueda local, vemos que, aunque en media la BL del primer mejor presenta la desviación más baja, dependiendo del caso es menor la desviación de un algoritmo u otro, sobre todo en los casos de estudio con un tamaño del espacio menor. Este hecho deja claro que la bondad de un algoritmo depende del caso de estudio en el que se aplica. Nos damos cuenta, además, de que la desviación de todos los algoritmos disminuye cuando el tamaño del problema aumenta

(valores de n y m más grandes), así como la diferencia entre las desviaciones de los distintos algoritmos. Podemos decir entonces que los algoritmos de BL son más efectivos en problemas grandes.

La búsqueda local del mejor en general encuentra peores soluciones que la búsqueda local del primer mejor, lo cual puede deberse a que el primero pasa a la mejor solución dentro de un entorno sin tener en cuenta el resto del espacio, lo que propicia que el algoritmo se quede atrapado en un máximo local que puede no ser muy bueno ni ser el máximo global. Además, conlleva un mayor tiempo de ejecución, por tener que evaluar en cada iteración todas las posibles soluciones vecinas para buscar la mejor. La única ventaja es que puede encontrar una solución buena en menos iteraciones que la BL del primer mejor, pero al precio de evaluar todas las soluciones vecinas, lo cual hace que esa ventaja no merezca mucho la pena en la mayoría de los casos. En la Figura 3 vemos que efectivamente el tiempo de ejecución de la BL del mejor es en general mayor que el de la BL del primer mejor, principalmente en los problemas más grandes donde el tiempo de ejecución es un aspecto importante a tener en cuenta.

En cuanto al algoritmo de BL del primer mejor partiendo de la solución proporcionada por el algoritmo Greedy, presenta la ventaja de que la solución de partida ya es considerablemente buena, por lo que en pocas iteraciones de la BL del primer mejor se encuentra una solución mejor. Sin embargo, hay que sumar el tiempo de ejecución del propio algoritmo Greedy, que como ya hemos visto es más alto (el doble que el de BL del primer mejor). Si volvemos a fijarnos en la Figura 3, nos damos cuenta de que si 'sumamos las gráficas' de los tiempos de ejecución del algoritmo Greedy y del algoritmo de la BL del primer mejor, el resultado supera a la gráfica del tiempo de ejecución de BL con greedy. No obstante la diferencia es muy pequeña, debido a que las soluciones proporcionadas por Greedy no son demasiado buenas y la BL debe iterar bastantes veces hasta encontrar una solución buena, de manera que una solución aleatoria de partida en este algoritmo tiene casi el mismo efecto que una proporcionada por greedy en cuanto al tiempo de ejecución.

Otra ventaja que puede tener partir de la solución que nos da el algoritmo Greedy es que la BL empieza en una zona del espacio de soluciones donde es más probable que se encuentre la solución óptima, por lo que la BL puede llegar a encontrar una solución mejor que si se partiera de una solución aleatoria, de ahí que para algunos casos de estudio este algoritmo presente una menor desviación (ver Figura 2). Este hecho tendría una mayor influencia si las soluciones que nos da greedy fueran mejores, pues ya hemos visto que en nuestro caso no son muy buenas.

Por lo tanto, la búsqueda local con Greedy en nuestro problema no merece mucho la pena, pues presenta el tiempo de ejecución más alto y no mejora en general las soluciones encontradas partiendo de una solución aleatoria. En problemas en los que se conozca la solución de greedy, de manera que no haya que añadir su tiempo de ejecución al del propio algoritmo, y esta sea considerablemente buena, esta estrategia podría ser efectiva.

Finalmente, vamos a intentar ver por qué el algoritmo Greedy tarda más tiempo en ejecutarse que la búsqueda local del primer mejor. Por una parte, el algoritmo Greedy tiene que recorrer todos los elementos no seleccionados en cada iteración y calcular sus distancias al conjunto de los elementos seleccionados para determinar cuál es el elemento más prometedor para añadir al conjunto. Sin embargo, en la búsqueda local del primer mejor no es necesario recorrer todos los elementos no seleccionados, sino que sólo se recorren hasta encontrar una solución mejor. Por otra parte, en Greedy sólo se calcula la bondad de la solución al final (se llama a la función *fitness*), una vez encontrada la misma, mientras que en BL hay que evaluar muchas soluciones intermedias, lo cual es costoso. Sin embargo, la factorización de la función objetivo en BL, hace que estas evaluaciones sean más rápidas pues, como ya vimos, no es necesario calcular el coste de la solución completa, sino solo la contribución del nuevo elemento insertado.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos comentados y los resultados proporcionados por los algoritmos estudiados, podemos concluir que en este problema el algoritmo de la búsqueda local del primer mejor es más adecuado en general, pues ofrece la menor desviación en la mayoría de los casos en un tiempo de ejecución muy pequeño. No obstante, hay que tener en cuenta el caso de estudio concreto para decantarse por un algoritmo u otro, pues en algunos casos la búsqueda local del mejor o la BL del primer mejor con greedy encuentran una mejor solución.