



Artículo de investigación

Algoritmo basado en metaheurística GRASP para resolver el problema de la diversidad máxima aplicado en la conformación de equipos de trabajo

Algorithm based on GRASP metaheuristics to solve the problem of the maximum diversity applied in the confirmation of work teams

Livino Manuel Armijos Toro^a, Fernando Francisco Sandoya Sánchez^b

^aUniversidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador.

^bEscuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

DOI:<http://doi.org/10.13140/RG.2.2.20161.51046>

Recibido: 28-09-2018

Aceptado: 18-03-2019

Resumen

En este trabajo se aborda el problema de la conformación de equipos de trabajo de la manera más diversa posible, ya que está demostrado que los equipos de trabajo diversos, funcional y demográficamente, son más eficientes para resolver problemas. Para ello se adapta un modelo matemático de optimización combinatoria que pertenece a la clase de los problemas de diversidad máxima, y se diseña un algoritmo basado en la metaheurística GRASP que resultó eficiente para resolverlo. Dentro del estudio de la metaheurística se esquematiza un algoritmo de solución para este tipo de problemas de optimización combinatoria de tipo fuertemente np-duro, específicamente para determinar la conformación de equipos de encuestadores que realizan levantamiento de datos para distintas encuestas que elabora el Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador.

Palabras clave: Metaheurística; GRASP; problema de diversidad máxima; conformación de equipos de trabajo.

Código UNESCO: 1207 Investigación Operativa, 1207.01 Análisis de Actividades.

Abstract

This paper addresses the problem of forming work teams in the most diverse way possible, given that it is demonstrated that work teams that are diverse, functionally and demographically, are more efficient in solving problems. For this purpose, we adapted an optimization model to a maximum diversity problem, with the creation of an algorithm based on GRASP metaheuristics this was efficient. In the investigation, a solution algorithm is proposed for this case of combinatorial optimization problem, it is type of strongly np-hard, the algorithm was used specifically for the conformation of survey teams, they collect data for different surveys prepared by the National Institute of Statistics and Census of Ecuador.

Key words: Metaheuristics; GRASP; maximum diversity problem; work teams.

UNESCO Code: 1207 Operations research, 1207.01 Activity analysis.

1. Introducción

El proceso de selección de un subconjunto de objetos, personas, actividades, recursos, etc., desde una colección de posibilidades, basado en uno o más criterios es una actividad que se realiza de manera frecuente. En múltiples contextos, el objetivo de la selección es elegir a los mejores elementos de acuerdo a un criterio definido y en otras ocasiones que representen de forma efectiva la diversidad existente en la colección original de posibilidades [1].

En los últimos años, el interés en la explotación de los beneficios de la diversidad se ha incrementado, ya que en la práctica hay evidencia empírica que indica que la diversidad en un grupo incrementa la capacidad del mismo para resolver problemas [2], aumenta la creatividad, así como mejora el clima laboral [3]. En la literatura de investigación de operaciones se han realizado trabajos en los que se demuestra que bajo ciertas hipótesis la diversidad triunfa sobre la habilidad [4]. La selección de un conjunto de personas de un listado finito de candidatos con el objetivo de que una función alcance un máximo o mínimo es un problema de optimización combinatoria [5]. La conformación de equipos de encuestadores, como cualquier otro equipo de trabajo de forma adecuada, es un aspecto que afecta a la organización y a los mismos equipos de trabajo [6], siendo las características del equipo, como por ejemplo heterogeneidad de los miembros, aspectos que afectan directamente su efectividad [7], de ahí la importancia del proceso de selección, por lo que es necesario determinar una metodología para su conformación que asegure que estos equipos de trabajo sean eficientes en la realización de sus actividades. Una forma de asegurar la eficiencia de los equipos de trabajo es que estos sean conformados de manera diversa, pues según [8] la diversidad de un equipo de trabajo permite a estos salir de óptimos locales y encontrar mejores soluciones a los problemas que abordan.

El objetivo del presente trabajo es adaptar un modelo de optimización que permita determinar la conformación de equipos de trabajo diversos, y diseñar e implementar un algoritmo eficiente que lo resuelva, para lo cual se considera el problema de diversidad máxima, representado por MDP por sus siglas en inglés (Maximun Diversity Problem) [9], el problema puede presentar variantes de acuerdo a la métrica utilizada para describir la diversidad [10]. Al ser el MDP un problema de optimización combinatoria se utiliza, para su solución, la metaheurística denominada GRASP, nombrada así por su acrónimo en inglés *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*, que se puede traducir como procedimientos de búsqueda voraz, aleatorizados y adaptativos [11].

El problema de diversidad máxima, en el cual se basa la aplicación de escoger los equipos de trabajo, es del tipo **fuertemente NP-duro**, como se muestra en [12] y a pesar de tratar problemas de tallas (n, m) pequeñas, donde n es el número de candidatos a formar parte del equipo encuestador y m es el número de personas que conformará cada equipo, no puede ser resuelto por métodos exactos en tiempos computacionalmente razonables. El modelo de programación entera mixta (MIP) corrido en GAMS para 30 nodos se ejecutó en 5 minutos, para 50 nodos en 2 horas, para 60 nodos no encontró la solución luego de 10 horas. En cambio el problema de Max-Mean en su formulación linealizada no pudo ser resuelto por técnicas exactas en tiempos razonables para problemas con $n > 25$ nodos, según se demuestra en [13]. Para el problema que se está abordando en este estudio los nodos representan a las personas que forman el conjunto de candidatos para conformar los equipos de trabajo, por tanto es claro que se requiere diseñar heurísticas para resolver problemas de tallas medianas y grandes. Por otro lado, el artículo presenta una metodología que pretende pueda ser aplicada para problemas de cualquier talla.

El documento se organiza de la siguiente manera, en primer lugar se presentan los conceptos relacionados a distancia y medida y como estos son de utilidad en la noción de diversidad, se plantea del problema de diversidad máxima, así como qué es un equipo de trabajo, su conformación e importancia. A continuación: se plantea el método de solución con el algoritmo GRASP. Luego, se desarrolla la aplicación del problema de diversidad máxima utilizando el algoritmo GRASP para la conformación de equipos de trabajo en el caso específico de encuestadores. Finalmente se exponen las principales conclusiones obtenidas en este trabajo.

2. Desarrollo

A continuación se plantean las nociones referentes a diversidad, se enuncia el problema de la diversidad máxima y se discuten brevemente las técnicas que se han empleado en la literatura para la resolución de este problema, así como algunas definiciones importantes en el tema de investigación, el proceso de conformación típico de equipos de trabajo en instituciones y los problemas a considerar.

2.1. Distancia entre elementos

La distancia cuantifica la proximidad o lejanía de dos elementos de un conjunto cualquiera, es por ello que en el estudio de las características de los individuos postulantes a formar un equipo de trabajo, la lejanía entre dos individuos se entiende como la complementariedad o diferencia entre sus características demográficas y funcionales que se consideren.

En la bibliografía citada en [8], el autor explica como la diversidad presente en un grupo puede incrementar la eficiencia al resolver un problema. Una medida de distancia que se puede usar para describir la disimilitud de personas es la siguiente:

Dados dos objetos i, j con características descritas por los vectores $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})^T$, $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp})^T$, se define la siguiente relación de disimilaridad entre la pareja i, j .

$$d_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^p \delta(x_{il}, x_{jl})}{p}, \quad (2.1)$$

donde

$$\delta(x_{il}, x_{jl}) = |x_{il} - x_{jl}|$$

En la siguiente sección se analizará como se puede utilizar esta medida de disimilaridad para definir la diversidad de un conjunto seleccionado, con la cual se podría cuantificar la diversidad asociada a un grupo específico de personas que conformen un equipo de trabajo, los conceptos son considerados en [14].

2.2. Medidas de diversidad

Consideremos un conjunto $M = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ de m objetos, con $m > 1$ y una medida de distancia o disimilaridad d_{ij} definida entre cada pareja de elementos de M , basados en lo anterior se puede definir la siguiente medida de diversidad

Esta medida se define como la suma de las distancias o disimilitudes entre cada uno de los elementos del subconjunto M , es decir:

$$div_s(M) = \sum_{p_i, p_j \in M} d_{ij}. \quad (2.2)$$

2.3. El problema de la diversidad máxima

Sea $X = \{1, 2, \dots, n\}$, con $n \in \mathbb{Z}^+$, un conjunto de elementos, individuos u objetos. El problema de máxima diversidad (MDP) consiste en identificar un subconjunto M del conjunto X , con m elementos, de tal manera que los m elementos de M presenten la máxima diversidad posible. El problema MDP, si se considera la medida de dispersión de la suma, puede ser formulado como un problema de programación entera cuadrática de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{máx } & \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} x_i x_j \\ \text{s.a. } & \sum_{i=1}^n x_i = m \\ & x_i \in \{0, 1\}; 1 \leq i \leq n, \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde x_i se define por

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si el elemento } i \text{ es seleccionado.} \\ 0 & \text{de lo contrario.} \end{cases} \quad (2.4)$$

El problema de diversidad máxima tiene aplicaciones como la administración de recursos humanos, medidas de biodiversidad, entre otros [15], en donde también se demuestra que este problema pertenece a la clase de los problemas fuertemente np-duros, y que solo puede resolverse de manera exacta por procedimientos estándar basados en Branch and Bound para instancias pequeñas.

2.4. Los equipos de trabajo

En [16] se considera a los equipos de trabajo como entidades complejas, donde intervienen: el individuo, el equipo y la organización. Un Equipo de trabajo es un grupo organizado e interdependiente que comparte la responsabilidad de los resultados en organización [17]. El trabajo en equipo permite combinar esfuerzos, conocimientos y creatividad entre sus miembros, los equipos de trabajo aportan diversidad en conocimientos y habilidades que en su conjunto superan las habilidades individuales. En [18] se analiza la influencia de los equipos de trabajo respecto de la eficacia y eficiencia de las empresas, resultando en la reducción de costos, mejora de procesos, haciendo de las organizaciones más eficientes.

a. Estrategias para la conformación de equipos de trabajo

La conformación de equipos de trabajo se refiere a cuales son las aptitudes y formación que deben tener los integrantes del equipo. En [8] se explican distintas situaciones para la conformación de equipos de trabajo en la resolución de un problema específico:

- a La persona con el mayor resultado en las pruebas.
- b Las 10 personas con los mayores resultados en las pruebas.
- c 10 personas seleccionadas aleatoriamente del total de aplicantes.
- d Las 10 personas más diversas entre el total de aplicantes.
- e El grupo de personas más diverso en promedio del total de aplicantes.

Como se observa las situaciones *a* y *b* son las que se utilizan en general. Los resultados del análisis de estos escenarios son: *b* es mejor que *a* para resolver problemas, ya que mientras más personas buscando una solución existen más oportunidades de encontrarla. En [19] se muestra que *c* es mejor que *b*, con estos criterios se evidencia que las instituciones fallan al únicamente seleccionar al personal por sus resultados en pruebas. Finalmente en [8] se demuestra que *d* muestra mejores resultados que *c*, así también se considera a la situación *e* como un problema de diversidad.

b. Importancia de la diversidad en la selección de un equipo de trabajo

En lo que respecta a grupos homogéneos estos tienen efectos positivos en relación a la integración social e identificación como grupo [3], por otro lado, en [8] se plantea que bajo ciertas circunstancias un grupo de personas diversas mejoran su productividad, esto permite a los equipos de trabajo salir de óptimos locales a mejores soluciones.

En [3] se analizan varias hipótesis respecto a la congruencia de miembros de un equipo de trabajo y su diversidad, entre sus principales conclusiones se tiene: A mayor congruencia en el equipo de trabajo se reduce los conflictos emocionales, pero no confirma que esto resulte en un mejor rendimiento en tareas creativas del grupo. En grupos de alta congruencia interpersonal junto con diversidad del mismo, se tienen efectos positivos en el desarrollo de tareas.

Por lo anterior, se denota la importancia en la conformación de equipos de trabajo, relacionado a la resolución de tareas así como la disminución de conflictos.

2.5. Técnicas metaheurísticas y algoritmos basados en GRASP

En la literatura científica de investigación de operaciones existe un gran auge de algoritmos basados en GRASP diseñados para resolver problemas de optimización combinatoria, esto es comprendido por el hecho de que los algoritmos basados en GRASP son sencillos, en comparación con otras metaheurísticas de carácter más complejo, pero que a su vez han demostrado tener gran precisión. [4].

Para la solución de este problema se recurre al uso de algoritmos aproximados o heurísticos los cuales permiten obtener una solución de calidad en un tiempo razonable [20]. La metodología GRASP es un procedimiento iterativo que consiste en tres fases: construcción, mejora y actualización. En la primera fase se construye iterativamente una solución inicial, añadiendo un elemento en cada paso. La elección del próximo elemento para ser añadido a la solución parcial viene determinado por una función voraz. Esta función mide el beneficio de añadir cada uno de los elementos a la solución construida. En cada iteración de esta fase, la elección del siguiente elemento que formará parte de la solución se determina elaborando una lista de candidatos (LC) con todos los elementos que pueden entrar a formar parte de la

solución, descartando los ya seleccionados en iteraciones anteriores. Los elementos de esta lista de candidatos se ordenan de forma decreciente respecto a los valores obtenidos en la función voraz.

De esta lista de candidatos ordenada se toman los elementos que conformarán la llamada lista restringida de candidatos (RCL) la cual es construida a partir de los primeros α^* (número de elementos de LC). Esta lista incluirá a aquellos elementos cuyos valores de la función voraz sean más beneficiosos desde el criterio de optimización definido. Una vez constituida esta lista, se seleccionará aleatoriamente un elemento de la misma, que automáticamente pasará a formar parte de la solución de partida. Se repite este procedimiento hasta conformar un grupo del tamaño deseado. Luego se aplica un procedimiento de búsqueda local (vecindades) como post-procedimiento para mejorar la solución obtenida. Se describe el pseudocódigo de la fase de construcción:

Fase de construcción

```
Inicio
Solución = {}
MIENTRAS La solución no esté completa
  Actualizar la función voraz
  Hallar LC
  Ordenar de forma decreciente LC
  Hallar RCL
  a = Selección Aleatoria
FIN MIENTRAS
Fin
```

Las soluciones generadas en la fase de construcción del algoritmo GRASP no garantiza la optimalidad, por lo que en la fase de mejora se realiza un procedimiento de búsqueda local, la cual parte de la solución inicial obtenida en la fase de construcción y calcula una nueva solución considerando los elementos restantes de LC. Es decir, evalúa el cambio en la función objetivo al reemplazar un elemento de la solución construida por cualquier elemento de la lista de candidatos LC restante. El pseudocódigo genérico para la fase de mejora es el siguiente:

Fase de mejora

```
SolIni=Solución inicial
MejorSolución=SolIni
SolMej=Búsqueda local
Si Valor (SolMej) < Valor (MejorSolución)
  entonces
  MejorSolución=SolMej
Fin
```

La fase de actualización consiste en realizar varias veces la fase de construcción y mejora para luego elegir de entre ellas a la mejor solución encontrada.

2.6. Selección de equipos de trabajo

En esta sección se conformarán los equipos de trabajo en las ciudades de Quito, Guayaquil, Cuenca, Ambato y Machala, que se encargarán del levantamiento de información necesaria para el desarrollo de una encuesta por parte del Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador, considerando las siguientes variables: calificación en pruebas técnicas, capacidad para resolver problemas lógicos, iniciativa, capacidad para seguir ordenes, organización de información, orientación al liderazgo, comprensión oral, comprensión escrita, expresión oral y expresión escrita, las mismas que fueron consideradas dentro de las pruebas para selección de personal, cuantitativas y cualitativas, determinadas por el departamento de recursos humanos del instituto.

El conjunto de candidatos para cada ciudad, responde a la información recolectada por cada una de las unidades de recursos humanos para la encuesta en específico.

La implementación del pseudocódigo mostrado en la sección anterior se realizó en MATLAB, así también se utilizó Microsoft Excel para el manejo de la base de postulantes.

Estas variables están codificadas numéricamente, donde un valor pequeño (1) representa una baja capacidad y un valor alto (10) representa una mejor capacidad. Las variables al ser de la misma dimensión fueron trabajadas sin transformación alguna. La disimilitud considera para cada par de candidatos es la suma de las distancias entre características de los mismos definida en (2.1) y la medida de diversidad de un conjunto de candidatos definida en (2.2).

A continuación se presenta una breve descripción de las variables para las ciudades de Guayaquil y Quito.

a. Guayaquil

Para el presente análisis se cuenta con información sobre 68 candidatos en la ciudad de Guayaquil, cuyas características se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro 1: Características de las variables de Guayaquil. Fuente: Levantamiento del autor. Elaboración propia.

	Promedio	Máximo	Mínimo	Moda	Desviación Estándar
Pruebas técnicas	7,61	10	6	8	1,20
Capacidad para resolver problemas lógicos	6,54	8	4	7	1,20
Iniciativa	6,07	8	4	8	1,47
Capacidad para seguir ordenes	5,18	8	2	8	2,34
Organización de información	5,35	8	2	8	2,35
Liderazgo	5,00	8	2	7	2,31
Comprensión oral	5,97	8	3	8	1,80
Comprensión escrita	6,15	8	3	8	1,60
Expresión oral	5,84	8	3	8	1,70
Expresión escrita	6,22	8	3	7	1,61

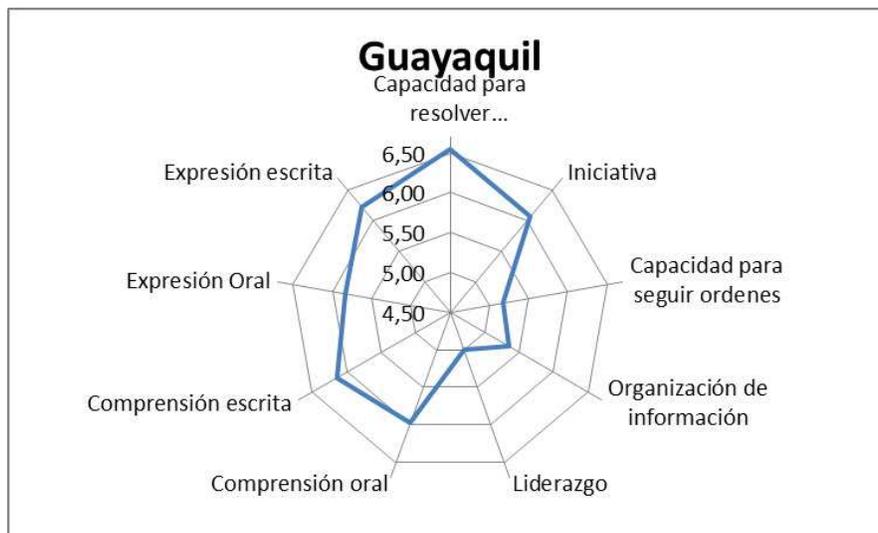


Figura 1: Características promedio de los candidatos de Guayaquil. Fuente: Levantamiento de los autores. Elaboración propia.

b. Quito

Para el presente análisis se cuenta con información sobre 62 candidatos en Quito cuyas características se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro 2: Características de las variables de Quito. Fuente: Levantamiento del autor. Elaboración propia.

	Promedio	Máximo	Mínimo	Moda	Desviación Estándar
Pruebas técnicas	7,90	10	6	7	1,40
Capacidad para resolver problemas lógicos	6,05	8	4	7	1,31
Iniciativa	5,58	8	4	4	1,39
Capacidad para seguir ordenes	5,48	8	4	4	1,30
Organización de información	5,95	8	4	7	1,30
Liderazgo	5,61	8	4	4	1,44
Compresión oral	6,15	8	4	7	1,40
Compresión escrita	5,90	8	4	6	1,34
Expresión oral	6,11	8	4	7	1,12
Expresión escrita	5,65	8	4	4	1,42

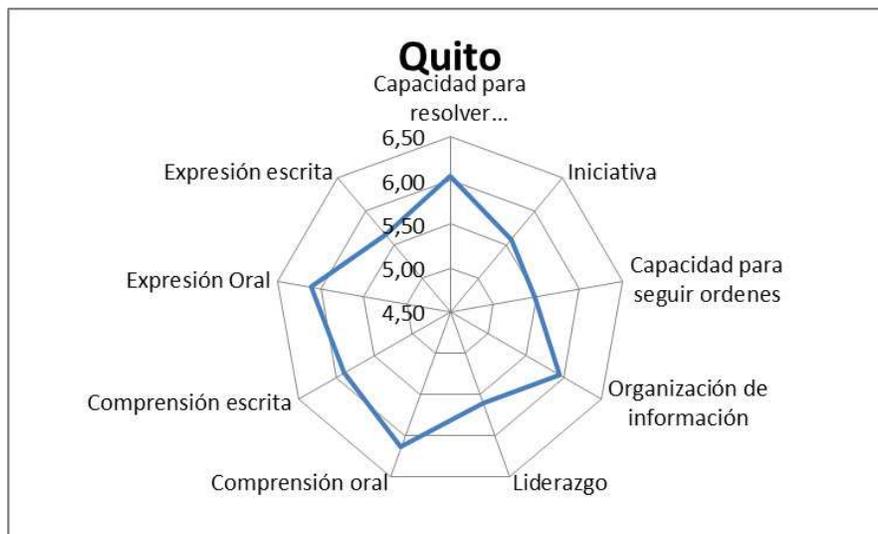


Figura 2: Características promedio de los candidatos de Quito. Fuente: Levantamiento de los autores. Elaboración propia.

2.7. Diseño del algoritmo GRASP para la conformación de equipos de trabajo

En la implementación del algoritmo GRASP se realizaron varias pruebas con las que se determinó que $\alpha = 0.8$ generaba soluciones similares en un tiempo computacional aceptable. En este caso en particular se considera el conjunto LC inicial como los candidatos ordenados de mayor a menor de acuerdo a sus resultados en las pruebas. A continuación se detallan las dos fases del algoritmo GRASP diseñado para la selección de los miembros de cada equipo de trabajo por ciudad:

a. Fase de construcción GRASP

1. Se ordena la lista de candidatos según puntaje obtenido en prueba técnica en $V = 1, 2, \dots, n$
2. Sea n el número de candidatos por ciudad
3. Se define $LC = V$
4. Seleccionar aleatoriamente α de $[1, 0.8]$
5. Se genera un listado reducido del total de candidatos LCR, con los $\alpha \cdot n$ primeros candidatos de LC
6. Se selecciona aleatoriamente un candidato i de LCR
7. Poner $M = i$ y $k = 1$
8. Mientras ($k < 5$)
9. Definir $LC = 1, 2, \dots, n - M$
10. Calcular $div(M \cup LC(j))$ para todo j elemento de LC
11. Ordenar de mayor a menor los elementos de LC de acuerdo a su aporte a la diversidad
12. Seleccionar aleatoriamente α de $[1, 0.8]$
13. Se genera un listado reducido LCR, con los $\alpha \cdot n$ primeros candidatos de LC

14. Se selecciona aleatoriamente un candidato i de LCR
15. Poner $M = M \cup i$ y $k = k+1$

b. Fase de mejoramiento

En la fase de mejoramiento, se analiza el cambio de cada uno de los candidatos de la solución obtenida en la fase anterior, respecto de los postulantes no seleccionados de forma aleatoria en veinte (20) iteraciones, de este ejercicio se obtiene la mejor solución, siendo esto el resultado del ejercicio.

1. Solución inicial $M = 1,2,3,4,5$
2. Resto de candidatos por ciudad $LC = V \setminus M$
3. Para $j=1$ hasta 5
4. Para $o = 1$ hasta 20
5. Seleccionar aleatoriamente g elemento de LC
6. Construir $H = M - j \cup g$
7. Si $div(H) > div(M)$
8. $M = H$

2.8. Resultados numéricos

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos para las ciudades de Ambato, Cuenca, Guayaquil, Machala y Quito en la conformación de los equipos, para el operativo de campo se consideran equipos de cinco personas, donde el miembro con mejor puntaje en la prueba técnica desarrollará las funciones de supervisor y los otros cuatro de encuestadores, así también la posibilidad de traslado en un solo vehículo para cada ciudad.

Se muestran los equipos formados al utilizar la metaheurística GRASP sobre la totalidad de la base de candidatos de las diferentes ciudades, la información de los candidatos fueron recogidas en cada una de las ciudades en análisis.

a. Conformación del primer equipo - Ambato

De un total de 49 candidatos interesados al cargo de encuestador en la ciudad de Ambato, se conformó el primer equipo de trabajo. En el Cuadro (3) se describen las características de los candidatos seleccionados.

Cuadro 3: Primer equipo de trabajo en Ambato. Elaboración propia

ID Candidato	Cap. para resolver prob. lógicos	Iniciativa	Capacidad para seguir órdenes	Org. de inf.	Liderazgo	C. oral	C. escrita	E. oral	E. escrita
2	4	8	8	3	3	5	8	3	7
13	8	4	7	6	7	3	3	7	3
20	3	7	3	3	7	8	4	3	8
25	3	5	8	8	4	5	4	3	3
45	3	3	3	3	3	7	7	6	4
MAX	8	8	8	8	7	8	8	7	8

Al recordar que el objetivo de este trabajo es conformar equipos de trabajo que se complementen, se considera como la capacidad del equipo, la capacidad máxima individual de los miembros del grupo en cada una de las variables analizadas. En la siguiente Figura (3) se muestra la capacidad del equipo uno de la regional Ambato.

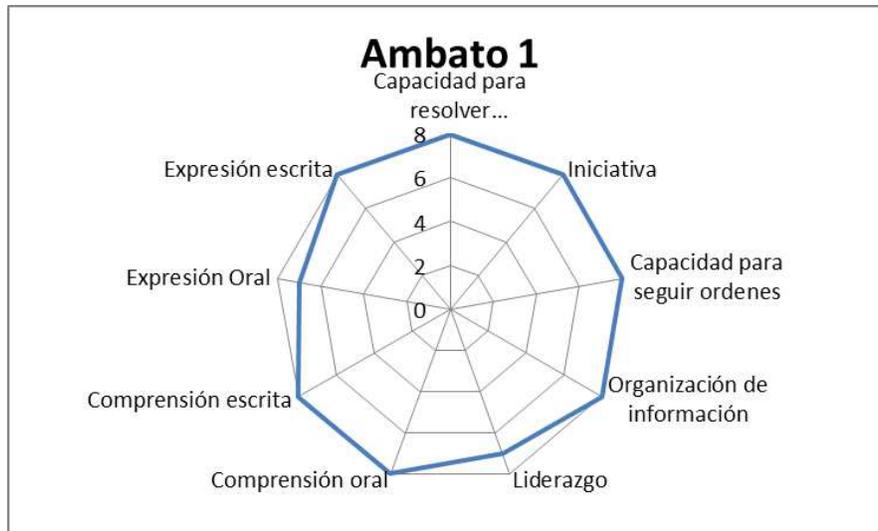


Figura 3: Capacidad del equipo uno de la regional Ambato. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia

b. Conformación del segundo equipo - Cuenca

Para la conformación del segundo equipo de trabajo consideraremos en la ciudad de Cuenca. Para este caso de un total de 54 candidatos, se obtuvo que el primer equipo de trabajo utilizando el algoritmo GRASP está conformado por los candidatos $Cuenca_1 = \{9, 20, 24, 33, 51\}$. Como el objetivo en esta sección es describir el segundo equipo, se tiene que de los 49 candidatos restantes, tras eliminar del conjunto elegible a los 5 elementos que conforman el equipo $Cuenca_1$, se obtiene que el segundo equipo está conformado por los elementos $Cuenca_2 = \{13, 19, 26, 38, 53\}$. En el Cuadro (4) se describen las características de los candidatos elegidos en el segundo equipo.

Cuadro 4: Segundo equipo regional Cuenca. Elaboración propia

ID Candidato	Cap. para resolver prob. lógicos	Iniciativa	Capacidad para seguir órdenes	Org. de inf.	Liderazgo	C. oral	C. escrita	E. oral	E. escrita
13	3	3	8	6	5	6	7	4	3
19	6	7	8	7	7	4	3	8	3
26	8	6	3	3	4	5	4	3	7
38	8	5	3	4	3	8	3	6	7
53	3	8	3	5	8	7	7	4	6
MAX	8	8	8	7	8	8	7	8	7

En la Figura (4) se muestra las capacidad del equipo dos en la ciudad de Cuenca.

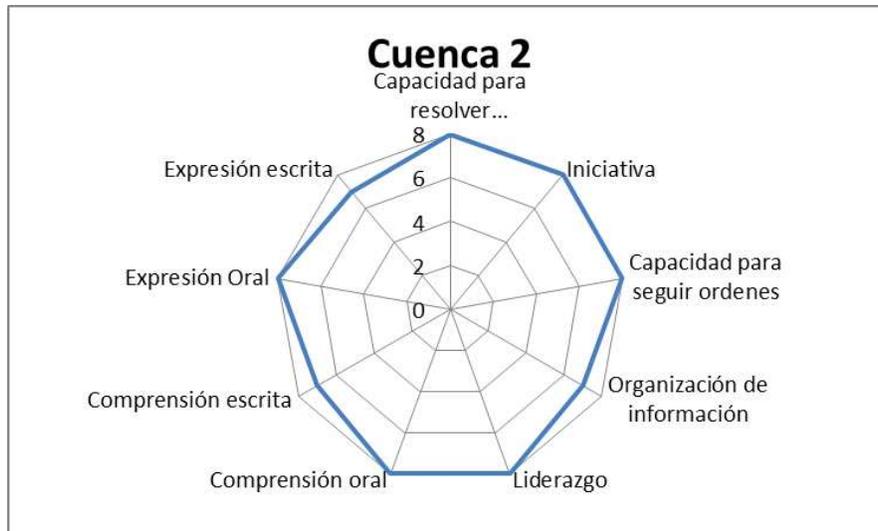


Figura 4: Capacidad del equipo dos de la regional Cuenca. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia

c. Conformación del tercer equipo - Guayaquil

Para la conformación del tercer equipo de trabajo en la ciudad de Guayaquil. Para este caso se consideró un total de 68 candidatos inicialmente. Los dos primeros equipos de trabajo conformados en Guayaquil utilizando el algoritmo GRASP fueron $Guayaquil_1 = \{1, 2, 22, 34, 47\}$, $Guayaquil_2 = \{9, 36, 40, 50, 61\}$. Como el objetivo en esta sección es describir las características el tercer equipo de trabajo en la ciudad, se tiene que de 58 candidatos restantes, tras eliminar del conjunto elegible a los elementos ya seleccionados en los dos primeros equipos, se obtiene que el tercer equipo está conformado por los elementos $Guayaquil_3 = \{13, 30, 31, 32, 58\}$. En el Cuadro (5) se describen las características de los candidatos elegidos en el tercer equipo.

Cuadro 5: Tercer equipo - Guayaquil. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

ID Candidato	Cap. para resolver prob. lógicos	Iniciativa	Capacidad para seguir órdenes	Org. de inf.	Liderazgo	C. oral	C. escrita	E. oral	E. escrita
13	8	4	8	2	2	6	6	4	6
30	5	8	7	8	4	6	8	4	3
31	5	4	8	7	7	3	7	7	5
32	8	6	2	4	3	4	4	7	8
58	6	7	2	2	7	7	5	3	5
MAX	8	8	8	8	7	7	8	7	8

En la Figura (5) se muestra las capacidad del equipo tres para la ciudad de Guayaquil.

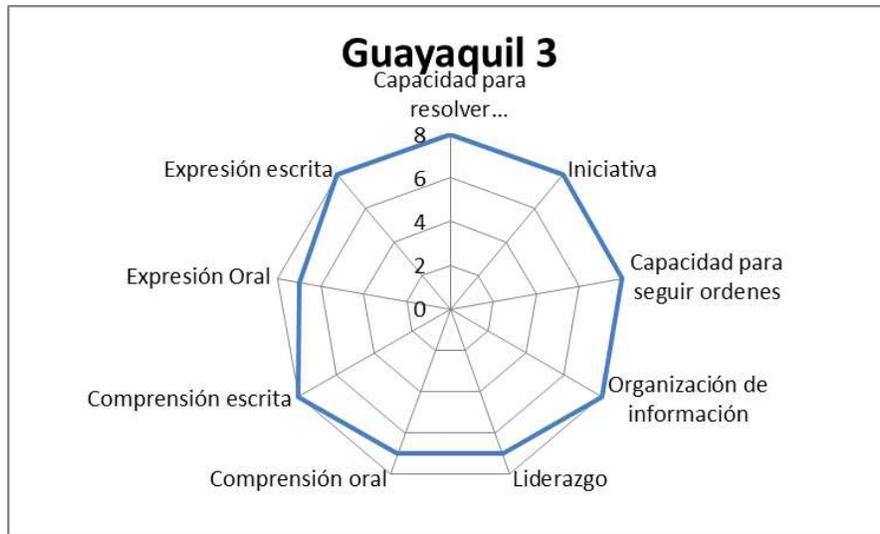


Figura 5: Capacidad del equipo tres - Guayaquil. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

d. Conformación del cuarto equipo - Machala

Para la conformación del cuarto equipo de trabajo en la ciudad de Machala. Para este caso se consideró un total de 48 candidatos que presentaron interés en participar en la selección. Los tres primeros equipos de trabajo conformados por el algoritmo GRASP fueron $Machala_1 = \{1, 5, 25, 38, 41\}$, $Machala_2 = \{8, 10, 27, 40, 48\}$, $Machala_3 = \{11, 29, 32, 42, 43\}$. Como el objetivo en esta sección es describir las características del cuarto equipo de trabajo seleccionado, se tiene que de 33 candidatos restantes, tras eliminar del conjunto elegible a los elementos ya seleccionados en los tres primeros equipos, se obtiene que el cuarto equipo conformado por los elementos $Machala_4 = \{3, 15, 26, 35, 44\}$. En el Cuadro (6) se describen las características de los candidatos elegidos en el cuarto equipo.

Cuadro 6: Cuarto equipo regional Machala. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

ID Candidato	Cap. para resolver prob. lógicos	Iniciativa	Capacidad para seguir órdenes	Org. de inf.	Liderazgo	C. oral	C. escrita	E. oral	E. escrita
3	7	8	7	5	8	8	4	7	5
15	8	7	4	5	5	6	8	5	8
26	4	5	8	8	4	7	6	7	6
35	7	8	6	4	8	5	6	8	7
44	5	4	5	8	4	4	5	4	6
MAX	8	8	8	8	8	8	8	8	8

En la Figura (6) se muestra las capacidad del equipo cuatro de la regional Machala.

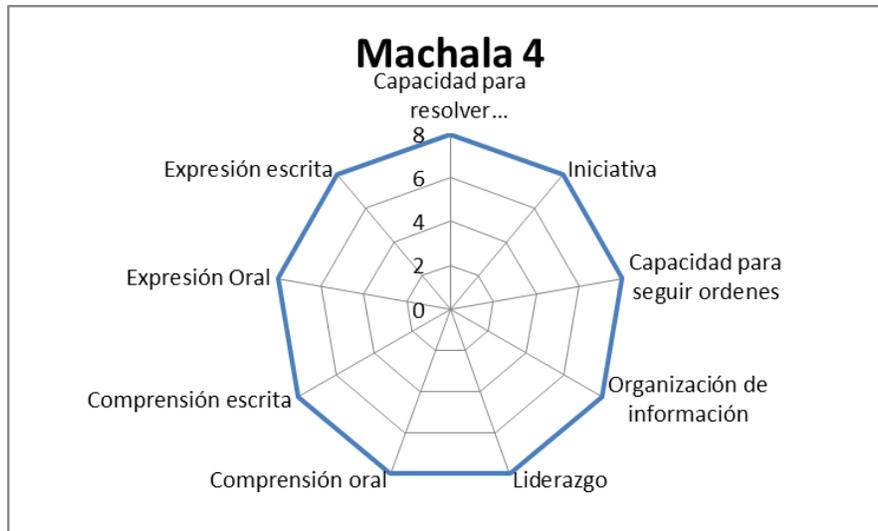


Figura 6: Capacidad del equipo cuatro de la regional Machala. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

e. Conformación del quinto equipo - Quito

Para la conformación del quinto equipo de trabajo en la ciudad de Quito. Para este caso se partió de un total de 62 candidatos iniciales. Los cuatro primeros equipos de trabajo conformados utilizando el algoritmo GRASP fueron $Quito_1 = \{6, 9, 13, 18, 21\}$, $Quito_2 = \{16, 36, 48, 49, 54\}$, $Quito_3 = \{4, 26, 31, 46, 50\}$, $Quito_4 = \{10, 12, 25, 27, 32\}$. Como el objetivo en esta sección es describir el quinto grupo conformado para la ciudad de Quito, se tiene que de 42 candidatos restantes, tras eliminar del conjunto elegible a los elementos ya seleccionados en los cuatro primeros equipos de trabajo, se obtiene que el quinto equipo está conformado por los elementos $Quito_5 = \{2, 5, 28, 43, 55\}$. En el Cuadro (7) se describen las características de los candidatos elegidos en el quinto equipo.

Cuadro 7: Quinto equipo - Quito. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

ID Candidato	Cap. para resolver prob. lógicos	Iniciativa	Capacidad para seguir órdenes	Org. de inf.	Liderazgo	C. oral	C. escrita	E. oral	E. escrita
2	7	4	4	6	8	8	7	6	8
5	5	4	4	7	4	7	7	8	6
28	4	8	4	6	5	6	6	4	4
43	7	5	8	6	7	4	4	7	6
55	8	6	7	5	4	8	5	5	4
MAX	8	8	8	7	8	8	7	8	8

En Figura (7) se muestra las capacidad del equipo cinco en la ciudad de Quito.

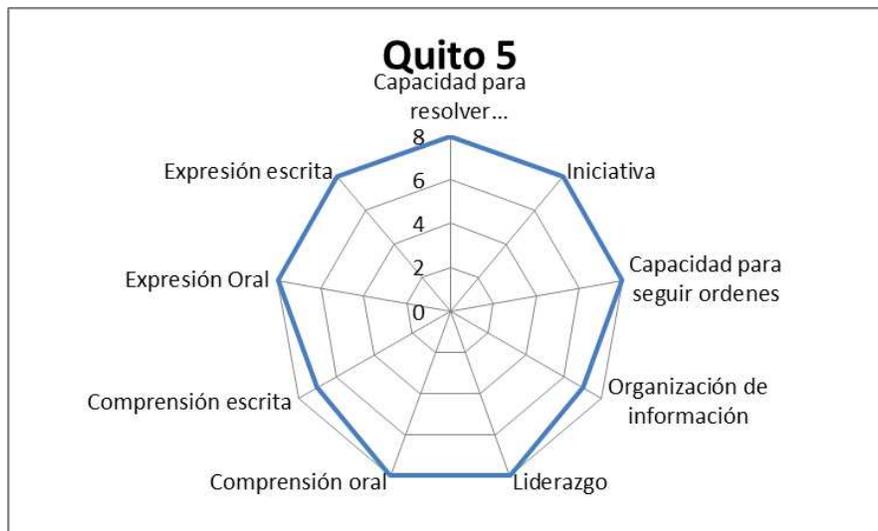


Figura 7: Capacidad del equipo quinto - Quito. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

f. Equipos formados

A continuación en los Cuadros 8, 9, 10, 11 y 12 se presentan la totalidad de los equipos formados en cada una de las ciudades (Ambato, Cuenca, Guayaquil, Machala y Quito), utilizando el algoritmo GRASP.

Cuadro 8: Equipos de trabajo - Ambato. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

Equipo	ID Candidatos					Diversidad	Tamaño LC
Ambato 1	2	13	20	25	45	1,57157871	50
Ambato 2	5	33	40	43	44	1,37620596	45
Ambato 3	7	27	30	32	34	1,19280656	40
Ambato 4	35	36	37	41	46	1,13835708	35
Ambato 5	11	18	28	39	50	0,99031044	30

Cuadro 9: Equipos de trabajo - Cuenca. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

Equipo	ID Candidatos					Diversidad	Tamaño LC
Cuenca 1	9	20	24	33	51	1,40499497	54
Cuenca 2	13	19	26	38	53	1,31293224	49
Cuenca 3	10	17	22	31	39	1,14920768	44
Cuenca 4	1	4	16	28	36	1,12993926	39
Cuenca 5	15	18	32	34	40	1,01170592	34

Cuadro 10: Equipos de trabajo - Guayaquil. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

Equipo	ID Candidatos					Diversidad	Tamaño LC
Guayaquil 1	1	2	22	34	47	1,59752359	68
Guayaquil 2	9	36	40	50	61	1,49364561	63
Guayaquil 3	13	30	31	32	58	1,33222698	58
Guayaquil 4	6	42	45	48	55	1,24458863	53
Guayaquil 5	24	25	28	46	52	1,14715225	48

Cuadro 11: Equipos de trabajo - Machala. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

Equipo	ID Candidatos					Diversidad	Tamaño LC
Machala 1	1	5	25	38	41	0,89736621	48
Machala 2	8	10	27	40	48	0,77122667	43
Machala 3	11	29	32	42	43	0,64393599	38
Machala 4	3	15	26	35	44	0,61055737	33
Machala 5	6	20	31	39	47	0,58984975	28

Cuadro 12: Equipos de trabajo - Quito. Fuente: Algoritmo GRASP. Elaboración propia.

Equipo	ID Candidatos					Diversidad	Tamaño LC
Quito 1	6	9	13	18	21	0,78773676	62
Quito 2	16	36	48	49	54	0,76091943	57
Quito 3	4	26	31	46	50	0,70000467	52
Quito 4	10	12	25	27	32	0,68257405	47
Quito 5	2	5	28	43	55	0,6542697	42

3. Conclusiones

El modelo de diversidad máxima ha sido aplicado en varios contextos, entre ellos: selección de ubicaciones para unidades logísticas, aceptación de cupos para universidades, localización de instalaciones peligrosas o indeseables, conformación de jurados, etc [12]. El principal objetivo de este trabajo es aplicar el modelo de diversidad máxima para resolver el problema de la conformación de equipos de trabajo eficientes, para lo cual se diseñó e implementó un algoritmo basado en la metaheurística GRASP. De la experimentación numérica se obtuvo:

Se estableció que se puede utilizar un modelo de optimización de diversidad máxima para determinar equipos de trabajo eficientes, pues cuando los candidatos a conformar los equipos tienen las habilidades adecuadas, la diversidad de su conformación asegura su eficiencia.

Se diseñó e implementó un algoritmo basado en GRASP que demostró ser competitivo para la solución del problema.

El algoritmo GRASP se desarrolló en MATLAB, mientras el manejo de la base de postulantes se realizó en Microsoft Excel. Para el algoritmo GRASP, se consideró un $\alpha = 0,8$ y un número de 20 iteraciones (considerando el tiempo de procesamiento en fase de mejora), para la elección del equipo más diverso. El equipo de mayor diversidad corresponde a Guayaquil 1, con una medida de diversidad de 1,5975. El equipo de menor diversidad es Quito 5, con una diversidad de 0,6542. Los primeros equipos en cada ciudad son los de mayor diversidad, esto debido a que en los siguientes equipos el marco de selección de candidatos disminuye. Los equipos seleccionados en la ciudad de Quito son de menor diversidad, esto debido a que existe mayor homogeneidad en los puntajes obtenidos por los candidatos entre las distintas características evaluadas.

La metaheurística GRASP contribuyó en la conformación de equipos de trabajo diversos, al resolver un problema de optimización combinatoria.

Referencias

- [1] A. Newell. *Human Problem Solving*. Prentice-Hall, Inc., 1972.
- [2] E.P. Scott. *The Difference: How the Power of Diversity Creates Better Groups, Firms, Schools, and Societies*. Princeton University Press, 2007. New Edition.
- [3] J. Polzer; L. Milton; W.B. Swann. Capitalizing on diversity: Interpersonal congruence in small work groups. *Administrative Science Quarterly*, 47(2):296–324, 2002. [OnLine](#).
- [4] R. Martí; F. Sandoya. Grasp and path relinking for the equitable dispersion problem. *Computers and Operations Research*, 40(12):3091 – 3099, 2013. [DOI](#).
- [5] A. Duarte Muñoz. *Metaheurísticas*. Librería-Editorial Dykinson, 2007.
- [6] B. Jaime Andrés; H. Oswaldo. El concepto de equipo en la investigación sobre efectividad en equipos de trabajo. *Estudios Gerenciales*, 28:121–132, 2012.

- [7] G.L. Stewart. A meta-analytic review of relationships between team design features and team performance. *Journal of Management*, 32(1):29–55, 2006.
- [8] F. Sandoya; R.Aceves. Grasp and path relinking to solve the problem of selecting efficient work teams. In Javier Del Ser, editor, *Recent Advances on Meta-Heuristics and Their Application to Real Scenarios*, chapter 2. IntechOpen, Rijeka, 2013.
- [9] M.G. Resendel; C. Ribeiro. *GRASP with Path-Relinking: Recent Advances and Applications*, pages 29–63. Springer US, Boston, MA, 2005.
- [10] Computational aspects of the maximum diversity problem. *Operations Research Letters*, 19(4):175 – 181, 1996.
- [11] Grasp and path relinking for the max min diversity problem. *Computers and Operations Research*, 37(3):498 – 508, 2010.
- [12] Ch.Kuo; F. Glover; K. Dhir. Analyzing and modeling the maximum diversity problem by zero-one programming*. *Decision Sciences*, 24(6):1171–1185, 1993. DOI.
- [13] F. Sandoya. *Un modelo para el problema de la diversidad máxima: Un Estudio para la selección de lo mejor y lo más diverso*. PhD thesis, Universidad Autónoma de México, 2013. [OnLine](#).
- [14] F. Sandoya; A. Martínez-Gavara; R. Aceves; A.Duarte; R. Martí. *Diversity and Equity Models*. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [15] G. Kochenberger; F. Glover. Diversity data mining, Working Paper, 1999.
- [16] J.R. Hackman. *The design of work teams*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.
- [17] E. Sundstrom; K.E De Meuse; D.Futrell. Work teams applications and effectiveness. In *American Psychologist*, 2001.
- [18] C. Reyes; T. Cervantes; J. Gamboa; J. Quijano; T. Cuevas. Equipos de trabajo: Una herramienta efectiva para la administración de las empresas del sector manufacturero en ciudad Juárez. *European Scientific Journal*, 8, 2012.
- [19] L.Hong; P. Scott. Groups of diverse problem solvers can outperform groups of high-ability problem solvers. 101(46):16385–16389, 2004.
- [20] C. Rodríguez Ortiz. *Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de regeneradores*. Proyecto fin de carrera, Universidad Rey Juan Carlos, 2010.

Sobre los autores

Livino Manuel Armijos Toro

Ingeniero en Estadística Informática, Magíster en Control de Operaciones y Gestión Logística y Magíster en Administración de Empresas mención Finanzas. Profesor Auxiliar em Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador.

Correo: lmarmijos2@espe.edu.ec

- [ORCID](#)

Fernando Francisco Sandoya Sánchez

Matemático, Magíster en Investigación de Operaciones, Magíster en Gestión Logística y Doctor en Ingeniería en Sistemas – Investigación de Operaciones, Profesor titular e investigador en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador. Correo: fsandoya@espol.edu.ec

- [ORCID](#)