

***USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA FACILITAR EL MANEJO
DE LAS VARIABLES Y SU RELACIÓN CON EL VALOR PRESENTE
NETO, EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN PARQUE URBANO***



JAIRO ANDRÉS OSSA CALDERÓN

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2005

***USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA FACILITAR EL MANEJO
DE LAS VARIABLES Y SU RELACIÓN CON EL VALOR PRESENTE
NETO, EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN PARQUE URBANO***

JAIRO ANDRÉS OSSA CALDERÓN

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTORES:

ING. SANDRA PATRICIA JARRO SANABRIA
ING. JUAN PABLO CABALLERO VILLALOBOS

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTA
2005

El proyecto de grado titulado:
*“USO DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA
FACILITAR EL MANEJO DE LAS VARIABLES Y
SU RELACIÓN CON EL VALOR PRESENTE NETO,
EN LA CONSTRUCCIÓN DE UN PARQUE URBANO”*

Presentado por Jairo Andrés Ossa Calderón, en
cumplimiento parcial de los requisitos
exigidos para optar al título de Ingeniero
Civil, fue aprobado el día _____ del
mes de _____ de _____.

Ing. Sandra Patricia Jarro Sanabria
DIRECTORA

Ing. Juan Pablo Caballero Villalobos
DIRECTOR

Ing. Nelson Obregón
JURADO

Fecha y ciudad

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	- 11 -
<u>1. MARCO CONCEPTUAL.....</u>	- 12 -
1.1 ALGORITMOS EVOLUTIVOS	- 12 -
1.2 ALGORITMOS GENÉTICOS.....	- 13 -
1.3 ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN EN PROYECTOS	- 18 -
1.4 PARQUE URBANO	- 20 -
1.5 INTERCAMBIO COSTO TIEMPO:.....	- 21 -
1.6 VALOR PRESENTE NETO.....	- 24 -
1.7 ESTIMACIONES DE DURACIONES PARA MÉTODO DE PERT	- 26 -
<u>2. DESCRIPCIÓN DEL CASO.....</u>	- 29 -
2.1 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS NECESARIAS DE LAS ACTIVIDADES - 33 -	
2.1.1 COSTOS DIRECTOS.....	- 33 -
2.1.2 COSTOS INDIRECTOS.....	- 34 -
2.1.3 RETRASOS POSIBLES.....	- 34 -
2.2 SUPOSICIONES PARA APROXIMAR EL ESTUDIO DEL PROBLEMA.....	- 34 -
2.3 MODELO MATEMÁTICO.....	- 35 -
2.4 DEFINICIÓN DE LA INFORMACIÓN QUE CONTENDRÁ EL CROMOSOMA..	- 40 -
2.4.1 INFORMACIÓN DEL CROMOSOMA	- 40 -
2.4.2 CONTENIDO DE CROMOSOMA ESCOGIDO	- 44 -
2.4.3 CONFIGURACIÓN DEL CROMOSOMA	- 46 -
2.5 CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	- 59 -
2.5.1 COSTOS DIRECTOS	- 61 -
2.5.2 COSTOS INDIRECTOS	- 65 -
2.6 PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO.....	- 65 -

2.6.1 GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL	- 68 -
2.6.2 EVALUACIÓN DE CROMOSOMAS.....	- 70 -
2.6.3 SELECCIÓN	- 78 -
2.6.4 RECOMBINACIÓN.....	- 82 -
2.6.5 MUTACIÓN	- 85 -
2.6.6. NUEVA POBLACIÓN	- 88 -
2.6.7 EXPERIMENTO CONTROLADO	- 89 -
2.6.8 SOLUCIÓN GRÁFICA A LOS CROMOSOMAS, COMUNICACIÓN CON MICROSOFT PROJECT	- 95 -
2.6.9 INTERFAZ GRÁFICA DEL ALGORITMO GENÉTICO	- 96 -

3. ANÁLISIS DEL PROBLEMA Y RESULTADOS - 98 -

3.1 ANÁLISIS DE LOS OPERADORES.....	- 98 -
3.1.1 MÉTODO DE SELECCIÓN	- 100 -
3.1.2 MÉTODO DE RECOMBINACIÓN.....	- 101 -
3.1.3 NÚMERO DE HIJOS POR RECOMBINACIÓN.....	- 103 -
3.1.4 GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL	- 104 -
3.1.5 MÉTODO DE MUTACIÓN.....	- 106 -
3.1.5 PORCENTAJE DE MUTACIÓN	- 107 -
3.1.6 PORCENTAJE DE ELITISMO.....	- 109 -
3.1.7 MÉTODO DE SELECCIÓN DE LA NUEVA GENERACIÓN.....	- 110 -
3.1.8 TAMAÑO DE POBLACIÓN Y CANTIDAD DE HIJOS POR GENERACIÓN	- 112 -
3.1.9 CANTIDAD DE GENERACIONES	- 113 -
3.1.10 RESUMEN OPERADORES SELECCIONADOS	- 114 -
3.2 ANÁLISIS PROYECTO PARQUE LISBOA.....	- 115 -
3.2.1 COSTO DE ADMINISTRACIÓN	- 116 -
3.2.2 PENALIZACIONES.....	- 118 -
3.2.3 CORRECCIÓN DE DURACIONES DE LAS ACTIVIDADES POR ESPERANZA PROBABILÍSTICA ..	- 119 -
3.3 ANÁLISIS DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN ADICIONAL, ESCOMBRERA “GUADALCANAL” -	121 -
3.3.1 COSTO DE ADMINISTRACIÓN	- 121 -
3.3.2 PENALIZACIONES.....	- 123 -
3.3.3 CORRECCIÓN DE DURACIONES DE LAS ACTIVIDADES POR ESPERANZA PROBABILÍSTICA ..	- 124 -

<u>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</u>	<u>- 126 -</u>
<u>5. INVESTIGACIONES FUTURAS.....</u>	<u>- 131 -</u>
<u>6. SUGERENCIAS REALIZADAS EN LA SUSTENTACIÓN.....</u>	<u>- 132 -</u>
<u>7. BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>- 134 -</u>
<u>ANEXOS.....</u>	<u>- 137 -</u>

IMÁGENES

<i>Imagen 1: Ejemplo de recombinación con un punto de cruce</i>	- 15 -
<i>Imagen 2: Ejemplo de recombinación con dos puntos de cruce y dos padres</i>	- 15 -
<i>Imagen 3: Ejemplo de recombinación con dos puntos de cruce y tres padres</i>	- 15 -
<i>Imagen 4: Mutación en la 5ta posición de un cromosoma</i>	- 16 -
<i>Imagen 5: Esquema de un proceso generalmente usado en los algoritmos genéticos</i>	- 17 -
<i>Imagen 6: Divisiones y subdivisiones de los costos de obra</i>	- 20 -
<i>Imagen 7: Influencia de la duración en los costos de un proyecto</i>	- 22 -
<i>Imagen 8: Influencia de la duración en los costos directos, indirectos y totales de un proyecto</i>	- 23 -
<i>Imagen 9: Ventajas y desventajas de las diferentes técnicas para el análisis de ICT</i>	- 24 -
<i>Imagen 10: Duraciones máximas y mínimas de las actividades del ejemplo</i>	- 41 -
<i>Imagen 11: Diagrama Pert del artículo de LEU y YANG (1999)</i>	- 41 -
<i>Imagen 12: Ejemplo de cromosoma usado por Leu y Yang, duraciones de cada actividad</i>	- 42 -
<i>Imagen 13: Cromosoma usado por Leu y Yang aplicado su ejemplo con un punto de cruce</i>	- 42 -
<i>Imagen 14: Ejemplo de cromosoma usado por Cengiz. Fechas de comienzo de cada actividad</i>	- 43 -
<i>Imagen 15: Cromosoma usado por Cengiz aplicado al ejemplo de Leu con un punto de cruce</i>	- 43 -
<i>Imagen 16: Ejemplo de cromosoma usado por Hegazy y Petzold. Días de retraso de cada actividad y método de cada actividad</i>	- 43 -
<i>Imagen 17: Cromosoma usado por Hegazy y Petzold aplicado al ejemplo de Leu con un punto de cruce</i> -	44 -
<i>Imagen 18: Ejemplo de cromosoma escogido. Primero información sobre duraciones y luego de retrasos para cada actividad</i>	- 45 -
<i>Imagen 19: Ejemplo de cromosoma escogido. La información sobre duraciones y retrasos de cada actividad se encuentra unida</i>	- 45 -
<i>Imagen 20: Cromosoma indicando longitud de plantilla</i>	- 46 -
<i>Imagen 21: Número de puntos de corte = Longitud del cromosoma -1</i>	- 47 -
<i>Imagen 22: Cromosoma con los alelos de cada actividad separados</i>	- 47 -
<i>Imagen 23: Cromosoma con los alelos de cada actividad unidos</i>	- 48 -
<i>Imagen 24: Probabilidad de mantener la plantilla unida vs. longitud del cromosoma para el caso de alelos separados y alelos unidos con un punto de cruce.</i>	- 49 -
<i>Imagen 25: Probabilidad de mantener la plantilla unida vs. longitud del cromosoma para el caso de alelos separados y alelos unidos con dos puntos de cruce.</i>	- 51 -
<i>Imagen 26: Cromosoma con número posible de cortes igual a la longitud del cromosoma</i>	- 53 -
<i>Imagen 27: Cromosoma con alelos de cada actividad separados</i>	- 54 -
<i>Imagen 28: Cromosoma con alelos de cada actividad unidos</i>	- 54 -

<i>Imagen 29: Probabilidad de mantener la plantilla unida vs. longitud del cromosoma para el caso de alelos separados y alelos unidos con un punto de cruce.</i>	- 56 -
<i>Imagen 30: Probabilidad de mantener la plantilla unida vs. longitud del cromosoma para el caso de alelos separados y alelos unidos con dos puntos de cruce.</i>	- 58 -
<i>Imagen 31: Descripción sobre el contenido del archivo de EXCEL</i>	- 60 -
<i>Imagen 32 Descripción de las actividades, cantidad a realizar y límites de tiempo</i>	- 61 -
<i>Imagen 33 Órdenes de precedencia</i>	- 62 -
<i>Imagen 34: Información de insumos utilizados en la obra</i>	- 63 -
<i>Imagen 35: Información relacionada con el análisis unitario de las actividades.</i>	- 64 -
<i>Imagen 36: Diagrama de flujo del algoritmo genético</i>	- 67 -
<i>Imagen 37: Población inicial aleatoria</i>	- 68 -
<i>Imagen 38: Población inicial aleatoria retraso 0</i>	- 69 -
<i>Imagen 39: Diagrama de flujo general para evaluación de valor de aptitud</i>	- 70 -
<i>Imagen 40: Diagrama de flujo para días de comienzo y finalización</i>	- 71 -
<i>Imagen 41: Diagrama de flujo para cálculo de costos directos e indirectos</i>	- 73 -
<i>Imagen 42: Diagrama de flujo para penalizaciones</i>	- 74 -
<i>Imagen 43: Cromosoma experimento controlado</i>	- 75 -
<i>Imagen 44: Características para cálculo</i>	- 75 -
<i>Imagen 45: Días de comienzo y finalización de las actividades</i>	- 76 -
<i>Imagen 46: Costos directos generados para cada actividad</i>	- 77 -
<i>Imagen 47: Costos totales generados para cada actividad</i>	- 77 -
<i>Imagen 48: Selección de los padres</i>	- 78 -
<i>Imagen 49: Población sin ordenar</i>	- 80 -
<i>Imagen 50: Población ordenada de mejor a peor</i>	- 81 -
<i>Imagen 51: Población con valores de adaptación corregidas</i>	- 81 -
<i>Imagen 52: Recombinación dos padres un punto</i>	- 83 -
<i>Imagen 53: Recombinación dos padres dos puntos</i>	- 84 -
<i>Imagen 54: Recombinación tres padres dos puntos</i>	- 85 -
<i>Imagen 55: Población de hijos en experimento controlado</i>	- 87 -
<i>Imagen 56: Población de hijos mutados en experimento controlado</i>	- 87 -
<i>Imagen 57: Características ejecución experimento controlado</i>	- 90 -
<i>Imagen 58: ejecuciones del algoritmo genético para experimento controlado</i>	- 91 -
<i>Imagen 59: Evolución promedio de la población</i>	- 92 -
<i>Imagen 60: VPN mínimo encontrado en cada ejecución del experimento controlado</i>	- 92 -
<i>Imagen 61: Análisis de duraciones para un cromosoma solución</i>	- 93 -
<i>Imagen 62: Cromosoma con diagrama de GANTT</i>	- 95 -

<i>Imagen 63: Control del algoritmo genético</i>	- 97 -
<i>Imagen 64: Reporte gráfico de la evolución del promedio de las poblaciones</i>	- 97 -
<i>Imagen 65: Parámetros fijos del estudio</i>	- 100 -
<i>Imagen 66: Evolución de la población para métodos de la selección</i>	- 100 -
<i>Imagen 67: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 101 -
<i>Imagen 68: Parámetros fijos del estudio</i>	- 101 -
<i>Imagen 69: Evolución de la población para métodos de recombinación</i>	- 102 -
<i>Imagen 70: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 102 -
<i>Imagen 71: Parámetros fijos del estudio</i>	- 103 -
<i>Imagen 72: Evolución de la población para hijos por recombinación</i>	- 103 -
<i>Imagen 73: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 104 -
<i>Imagen 74: Parámetros fijos del estudio</i>	- 104 -
<i>Imagen 75: Evolución de la población para tipos de generación de población inicial</i>	- 105 -
<i>Imagen 76: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 105 -
<i>Imagen 77: Parámetros fijos del estudio</i>	- 106 -
<i>Imagen 78: Evolución de la población para tipo de mutación</i>	- 106 -
<i>Imagen 79: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 107 -
<i>Imagen 80: Parámetros fijos del estudio</i>	- 107 -
<i>Imagen 81: Evolución de la población para porcentaje de mutación</i>	- 108 -
<i>Imagen 82: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 108 -
<i>Imagen 83: Parámetros fijos del estudio</i>	- 109 -
<i>Imagen 84: Evolución de la población para porcentaje de elitismo</i>	- 109 -
<i>Imagen 85: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 110 -
<i>Imagen 86: Parámetros fijos del estudio</i>	- 110 -
<i>Imagen 87: Evolución de la población para selección de la nueva generación</i>	- 111 -
<i>Imagen 88: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 111 -
<i>Imagen 89: Parámetros fijos del estudio</i>	- 112 -
<i>Imagen 90: Evolución de la población para cantidad de hijos y tamaño de población</i>	- 112 -
<i>Imagen 91: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 112 -
<i>Imagen 92: Parámetros fijos del estudio</i>	- 113 -
<i>Imagen 93: Evolución de la población para cantidad de generaciones</i>	- 113 -
<i>Imagen 94: Valores mínimos encontrados para 5, 30 y 50 generaciones</i>	- 114 -
<i>Imagen 95: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones</i>	- 114 -
<i>Imagen 96: Operadores seleccionados</i>	- 115 -
<i>Imagen 97: Resultados del proyecto para distintos costos de administración</i>	- 116 -
<i>Imagen 98: VPN del proyecto según el costo de administración</i>	- 117 -

<i>Imagen 99: Duración del proyecto según costo de administración.....</i>	<i>- 117 -</i>
<i>Imagen 100: Resultados del proyecto para las penalizaciones.....</i>	<i>- 119 -</i>
<i>Imagen 101: Resultados del proyecto para duraciones normales y duraciones corregidas para esperanza de ocurrencia.....</i>	<i>- 120 -</i>
<i>Imagen 102: Valor presente neto del proyecto para Tipos de duraciones del proyecto.....</i>	<i>- 120 -</i>
<i>Imagen 103: Resultados del proyecto para distintos costos de administración.....</i>	<i>- 121 -</i>
<i>Imagen 104: VPN del proyecto según el costo de administración.....</i>	<i>- 122 -</i>
<i>Imagen 105: Resultados del proyecto para las penalizaciones.....</i>	<i>- 123 -</i>
<i>Imagen 106: Duración del proyecto según penalizaciones.....</i>	<i>- 123 -</i>
<i>Imagen 107: Resultados del proyecto para duraciones normales y duraciones corregidas para esperanza de ocurrencia.....</i>	<i>- 124 -</i>
<i>Imagen 108: Valor presente neto del proyecto para Tipos de duraciones del proyecto.....</i>	<i>- 125 -</i>

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha generado un gran interés por el estudio de la relación entre el tiempo y el costo de los proyectos (Intercambio costo tiempo), siendo muy útil para disminuir la duración de estos sin influir considerablemente en sus costos.

El tiempo que toma cada una de las actividades de construcción en una obra civil y las relaciones existentes entre sí, son de vital importancia para el desarrollo de ésta, ya que se encuentra estrechamente relacionada con su costo final. En el presente trabajo se pretende analizar, con la ayuda de algoritmos genéticos, la relación entre los cambios que se realicen en las duraciones de las actividades, los costos de administración y las penalizaciones generadas por retraso en entregas del proyecto en el valor presente neto y la duración total en la construcción de un parque urbano.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Debido a los diversos problemas de búsqueda y optimización encontrados en las investigaciones y proyectos adelantados en los últimos tiempos, se han generado diferentes herramientas para facilitar su estudio y análisis. En la rama de desarrollo y optimización de problemas, entre algunas de estas soluciones se encuentran los algoritmos evolutivos (AE) y la programación lineal. Su uso depende de la relación existente entre sus variables, las cuales pueden ser lineales o no lineales, caso para los cuales, en la primer opción se prefiere el uso de programación lineal, y en la segunda el uso de AE.

Los AE se basan, como su nombre lo indica, en la teoría de evolución de Darwin y los procesos de la naturaleza. Algunos de los métodos desarrollados son mencionados por Kalyanmoy Deb: optimización de colonia de hormigas, evolución simulada, computación DNA y algoritmos culturales¹. También se encuentran los algoritmos genéticos (AG), las estrategias evolutivas y la programación evolutiva.

El fundamento de la estructura de los AE es la codificación generalmente en cadenas de la solución a un problema, simulando un genotipo. Cuando este genotipo es decodificado en su solución se encuentra el fenotipo: *“Cuando vemos a una persona vemos la representación fenotípica de esta, pero cada característica de la persona se encuentra precisamente escrita en sus cromosomas”*². Los genotipos se encuentran compuestos por cromosomas y cada cromosoma a su vez por genes que toman ciertos valores denominados alelos.

¹ DEB, Kalyanmoy. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Editorial John Wiley & Sons ltd, 2001 p: 81

² Ibid. 86

Los AE requieren funciones para evaluar el estado o valor al decodificar sus genotipos, existen dos funciones usadas con este fin y son definidas por Coello³ como:

- Función objetivo: Define la optimización del AE (tiene que ver con el problema matemático en sí).
- Función de adaptación: Mide qué tan bien una solución particular satisface una condición y asigna un valor real a su solución (relacionado con el algoritmo). La función de adaptación se basa en la teoría de Darwin que lo definió para miembros de una población como “*su habilidad para sobrevivir a los predadores, la pestilencia y otros obstáculos que interfieran en su crecimiento y reproducción*”⁴.

1.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

John Holland de la universidad de Michigan fue la persona que introdujo el tema de los AG que se encuentran dentro del grupo de los AE.

La idea general de los AG es crear cadenas o cromosomas, generalmente de manera aleatoria. Posteriormente se les evalúa y asigna su función de adaptación para saber qué tan bien se adecuan a las necesidades definidas y se aplican los operadores genéticos (reproducción, recombinación y mutación entre otros) que se explicarán más adelante. Los alelos con los que se trabaja en los algoritmos genéticos pueden ser números reales o binarios. El funcionamiento de los operadores con los que se trabaja es muy similar para ambos casos. A continuación se explican las tareas de los operadores para el caso binario que podrán ser usadas igualmente para cadenas con números reales:

³ COELLO, Carlos. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. Ciudad no disponible: Editorial Kluwer academic, 2002. p 23

⁴ GOLDBERG, David. Genetic algorithms in search optimization, and machine learning. Edición No 16 Ciudad no disponible: Editorial ADDISON-WESLEY, 1989. p 11

- Reproducción: Su objetivo es hacer copias de cromosomas que representen una buena solución al problema que se está atacando, sin aumentar el tamaño de la población, esto se logra al eliminar las cadenas que tengan malos resultados por medio de diferentes métodos. Estos son descritos por Deb Kalyanmoy (2001):
 - ❖ Torneo: Se enfrentan dos soluciones seleccionando la mejor entre ellas para pasar a la siguiente etapa. La idea es programar una buena organización de los torneos para que cada cadena pueda participar dos veces con el fin de que la mejor solución se copie dos veces (al sobrevivir ambos enfrentamientos) y la peor desaparezca (al perder ambos enfrentamientos) manteniendo el tamaño de la población.
 - ❖ Selección proporcional: Se asigna un porcentaje de copia a la cadena al relacionar su función de adaptación con la de la población. Después se realiza una escogencia aleatoria (como en una ruleta), de esta manera, los cromosomas con mayor porcentaje tendrán una probabilidad más alta de copia que las malas. Este es un método lento, debido a la necesidad de evaluar la función de adaptación promedio cada vez que se genere una población.
 - ❖ Escalafón: Dependiendo del valor de la función de adaptación, se clasifican todas las soluciones de la peor a la mejor, teniendo una mayor probabilidad la mejor cadena y aplicando luego, el método de selección proporcional⁵.
- Recombinación: Este es un operador usado para crear nuevas soluciones a partir del cruce de cadenas predecesoras. Se escogen dos o más cromosomas aleatoriamente y se selecciona uno o varios puntos de cruce para intercambiar su información, dando origen a dos o más soluciones. Estas nuevas cadenas no siempre serán buenas, por eso es que después se vuelven a someter al operador de reproducción.

⁵ DEB, Op. cit., p 89 - 92

No es recomendable realizar recombinación a todas las cadenas de la población, por esta razón se suele seleccionar un porcentaje mediante el cual se calcula la cantidad de cadenas que quedarán intactas (generalmente las que mejor respondan a la función de adaptación). A continuación se presentan esquemas para recombinaciones de un punto y de dos puntos con uno y dos padres con todas sus combinaciones posibles que pueden ser muy útiles para entender este operador:

Imagen 1: Ejemplo de recombinación con un punto de cruce

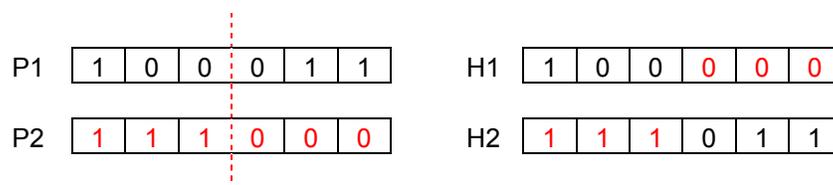


Imagen 2: Ejemplo de recombinación con dos puntos de cruce y dos padres

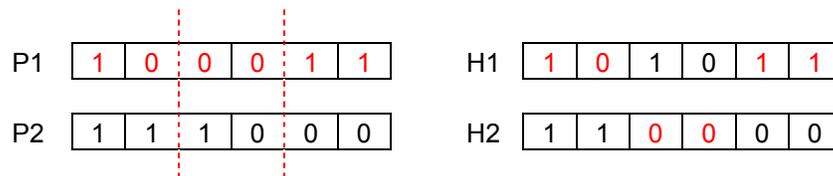
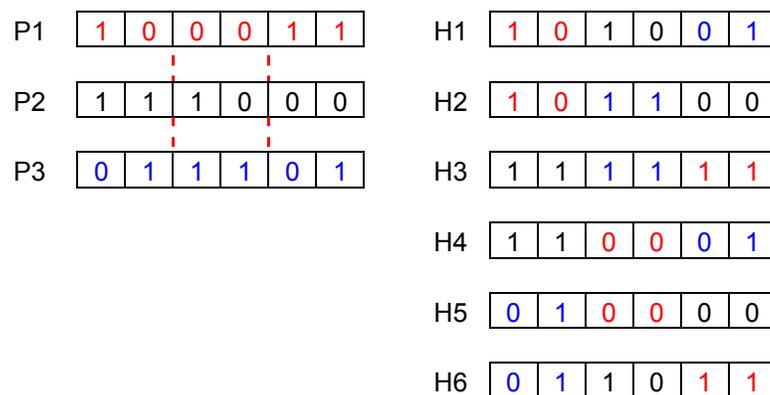


Imagen 3: Ejemplo de recombinación con dos puntos de cruce y tres padres



- Mutación: Mediante este proceso “se altera aleatoriamente la información de un valor en la cadena”⁶, generando un cromosoma distinto al inicial. La función de este operador es generar variedad en la población de esta manera: cuando se concibe la población inicial, dependiendo de su tamaño, puede quedarse un gran número de opciones por fuera del futuro estudio de las funciones, ya que por medio de la reproducción y la recombinación se generarán algunas nuevas cadenas, pero pueden quedar muchas otras sin estudiar, siendo factible el caso de encontrar soluciones locales por no investigar un espacio más amplio. Al tener cambios aleatorios en alguna posición del cromosoma, sería posible encontrar buenas o malas soluciones y además ampliar el campo de búsqueda. Estos nuevos cromosomas sobrevivirán o desaparecerán en las próximas generaciones dependiendo de su valor de adaptación gracias al operador de reproducción.

Imagen 4: Mutación en la 5ta posición de un cromosoma

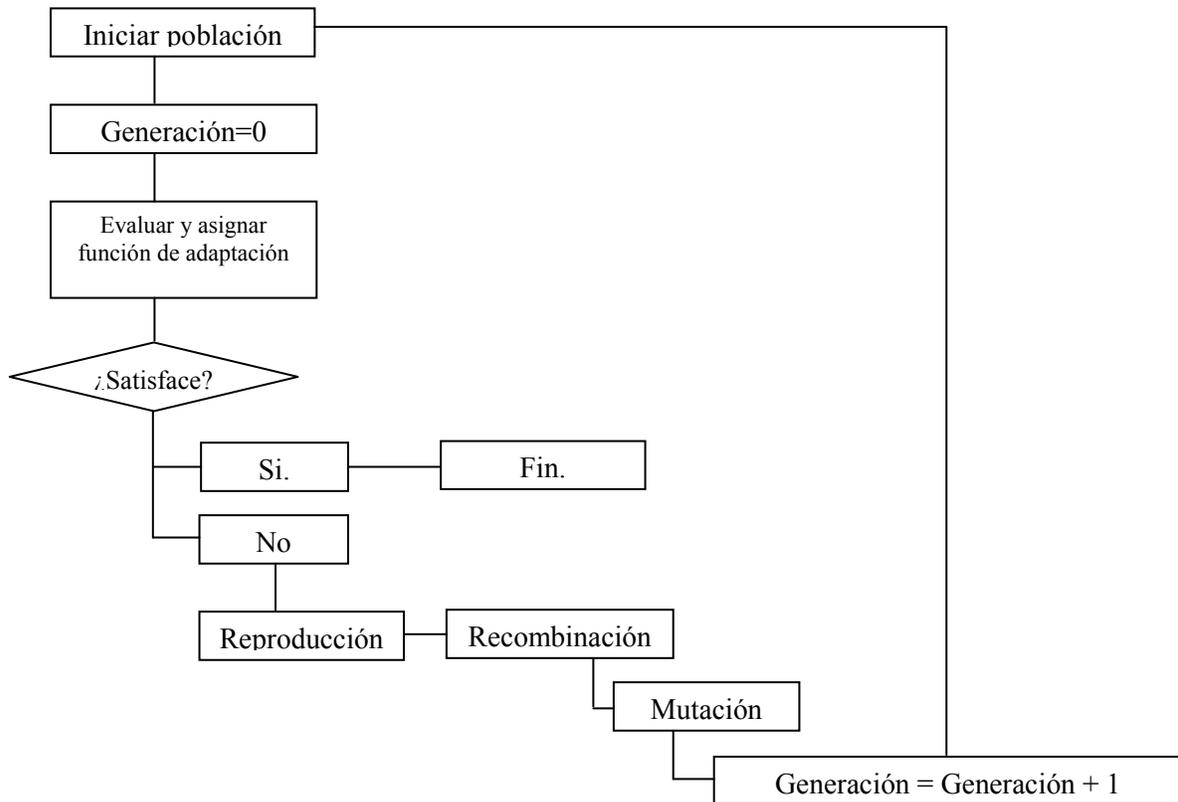
Pi	1	0	1	0	1	1
Pf	1	0	1	0	0	1

- Otros operadores: además de los mencionados anteriormente, también se encuentran otros operadores que a pesar de no ser ampliamente utilizados, es importante mencionarlos:
 - ❖ Incremento-disminución: Consiste en incrementar o disminuir el valor de un gen del cromosoma, para de esta manera, generar variedad en la población.
 - ❖ Transposición: Consiste en intercambiar los valores entre dos genes de un mismo cromosoma.

Un esquema del proceso de los operadores de los algoritmos genéticos se presenta a continuación

⁶ GOLDBERG, Op. cit., p 14

Imagen 5: Esquema de un proceso generalmente usado en los algoritmos genéticos



Fuente: Kalyanmoy Deb ⁷, traducido por Jairo Ossa

Cuando el problema implica trabajar con números de gran magnitud, no se recomienda el uso del alfabeto binario, ya que las cadenas serían muy extensas y el algoritmo sería más complejo. Para estos casos es mejor trabajar con números reales.

En los textos desarrollados por David Goldberg (1989) y por Kalyanmoy Deb (2001) se encuentran buenos ejemplos ilustrativos sobre el funcionamiento de los AG y su teoría. Recomendados para las personas que quieran saber más sobre el tema.

⁷ DEB, Op. Cit., p 87

1.3 ACTIVIDADES DE CONSTRUCCIÓN EN PROYECTOS

Debido a la complejidad que implica la realización de cualquier proyecto, este suele dividirse en actividades para tener un control apropiado sobre su ejecución. Cada una de las actividades debe tener ciertas características que lo definen, como son:

- Deben ser claramente identificables
- Deben ser realizadas en un momento específico
- Toman un tiempo determinado para su realización
- Consumen recursos humanos y físicos
- Tienen un costo económico⁸.

Las actividades de un proyecto deben estar relacionadas para darle continuidad, es decir, se debe definir que actividades deben estar realizadas o en proceso para poder continuar las siguientes. Estas relaciones pueden ser de distintos tipos dependiendo de su ubicación en el tiempo, y se clasifican como actividades concatenadas, paralelas y desfasadas.

- Actividades concatenadas: Son las que sólo pueden ser realizadas en el momento en el que su actividad predecesora haya sido terminada por completo, como por ejemplo, es necesario haber levantado los muros antes de pintarlos, entonces la actividad de construcción de muros y pintura son concatenadas.
- Actividades paralelas: Son las que pueden ser realizadas al mismo tiempo, sin importar si los recursos necesarios para su realización son compartidos o independientes. Un ejemplo de esto es la construcción de camino en adoquín y empedradización, que no tiene interferencia una con la otra y pueden ser realizadas al mismo tiempo.

⁸ Anónimo. Programación de la construcción y control de obra [on line]
www.katodos.com/doctos/e22e4d511d5e40892af541dbf29b3ca2. consultado el 1 de marzo de 2005

- Actividades desfasadas: Son muy similares a las actividades concatenadas pero no es necesario que la actividad predecesora haya sido terminada por completo para comenzar la siguiente. Es el caso de actividades como adecuación del piso de las canchas de Baloncesto e instalación de tableros, ya que no es necesario que la primera haya finalizado totalmente para comenzar la segunda.

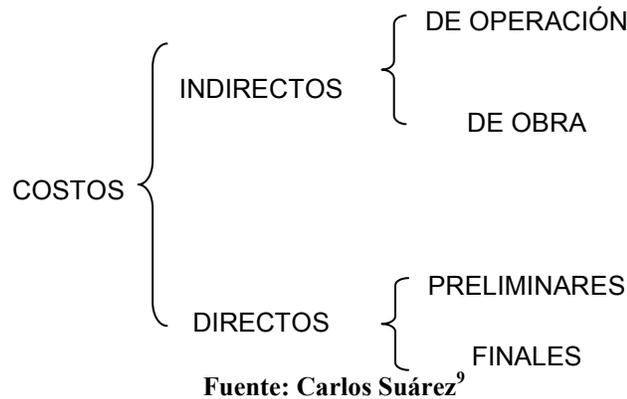
La secuencia de actividades concatenadas que implique el mayor tiempo de realización se conoce como ruta crítica. Esta es la secuencia a la que se le debe prestar mayor atención debido a que por su naturaleza, en el momento que se genere una demora o un adelanto en alguna de sus actividades, cambiará la duración total del proyecto. Para el caso de actividades que no se encuentren dentro de la ruta crítica, existirá un tiempo de holgura que representa la duración que se puede prolongar la actividad sin que interfiera con sus sucesoras.

La realización de las actividades de obra implica un costo que suele dividirse en costos indirectos y directos entendidos como:

- Costos directos: Gastos por materiales, mano de obra y equipos necesarios para la realización de un proceso productivo.
- Costos indirectos: Gastos administrativos y técnicos asociados a la realización de un producto final (en este caso un proyecto).

A su vez estos costos tienen otras subdivisiones:

Imagen 6: Divisiones y subdivisiones de los costos de obra



La definición de cada una de estas subdivisiones se encuentra a continuación:

- Costos de operación: Suma de gastos que por su naturaleza intrínseca son de aplicación a todas las obras efectuadas en un tiempo determinado
- Costos de obra: Suma de gastos que por su naturaleza intrínseca son aplicables a todos los conceptos de una obra en especial.
- Costos preliminares: Suma de gastos de material, mano de obra y equipo necesario para la realización de un subproducto.
- Costo directo final: Sumatoria de gastos de material, mano de obra, equipo y subproductos para la realización de un producto.

1.4 PARQUE URBANO

Es definido por la real academia española como: “*Terreno ubicado dentro de una población, con plantas, árboles, jardines, mobiliario de recreación y ornato destinado a un servicio público, especialmente al recreo de la comunidad*”¹⁰. Para el caso específico de este trabajo de grado, se tendrá un parque urbano de aproximadamente 10000 m² de área, que cumple con la definición mencionada anteriormente, ubicado en la ciudad de Bogotá.

⁹ SUAREZ Carlos, Costo y tiempo en edificación. 2da edición. editorial Limusa Wiley S.A 1971. p 25

¹⁰ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, Diccionario de la lengua española vigésima segunda edición 2001

1.5 INTERCAMBIO COSTO TIEMPO:

El intercambio entre el costo y el tiempo (ICT) es una herramienta que es ampliamente usada desde que fue estudiada por primera vez hace aproximadamente cuarenta años por J.E. Kelley y M.R. Walter¹¹. Su uso tiene como fin disminuir la duración del proyecto, más específicamente la ruta crítica, sin influir considerablemente en sus costos, y de esta manera *“recibir bonos por entregas tempranas, liberar restricciones de actividades y evitar daños”*¹².

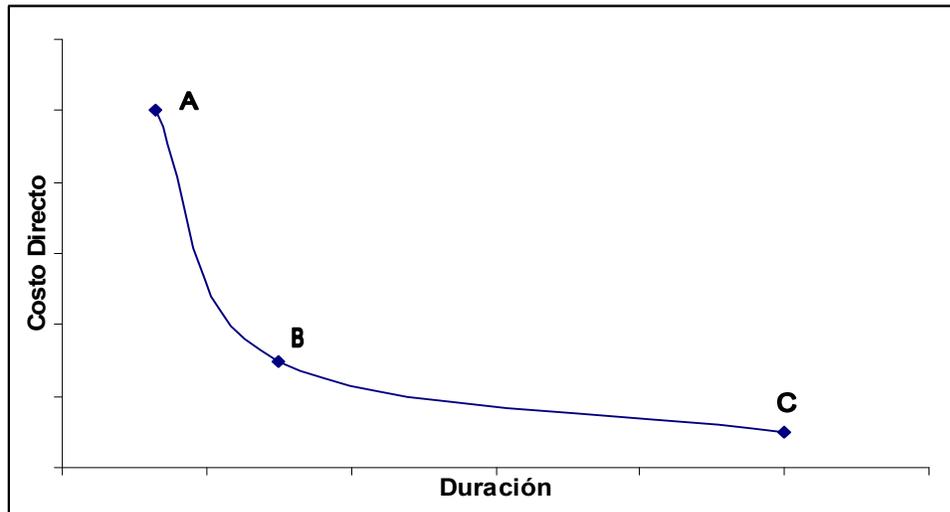
Consiste en suponer para cada actividad, métodos constructivos distintos al variar sus duraciones, es decir, para disminuir el tiempo de una actividad puede necesitarse un mayor número de mano de obra, incrementando el precio de la actividad y tomando esto como un método constructivo diferente al inicial.

Una actividad realizada en su duración normal tendrá unos costos directos asociados (ver imagen 7 punto C), a medida que se reduce su duración los costos directos aumentarán (ver imagen 7 punto A), esto debido principalmente a que para terminar una actividad antes del tiempo estipulado inicialmente será necesario trabajar con una mayor cantidad de obreros (como se mencionó anteriormente) o trabajar horas extras. El comportamiento del costo directo contra la duración se puede apreciar en la imagen 7:

¹¹ Martin Skutella, Problema del intercambio costo-tiempo [on line] <http://www.math.tu-berlin.de/coga/research/scheduling/tctp/> . consultado el 1 Marzo de 2005

¹² HEGAZY, Tarek. Computer based construction Project Management. New Jersey: Editorial Prentice Hall, 2002. p 212

Imagen 7: Influencia de la duración en los costos de un proyecto



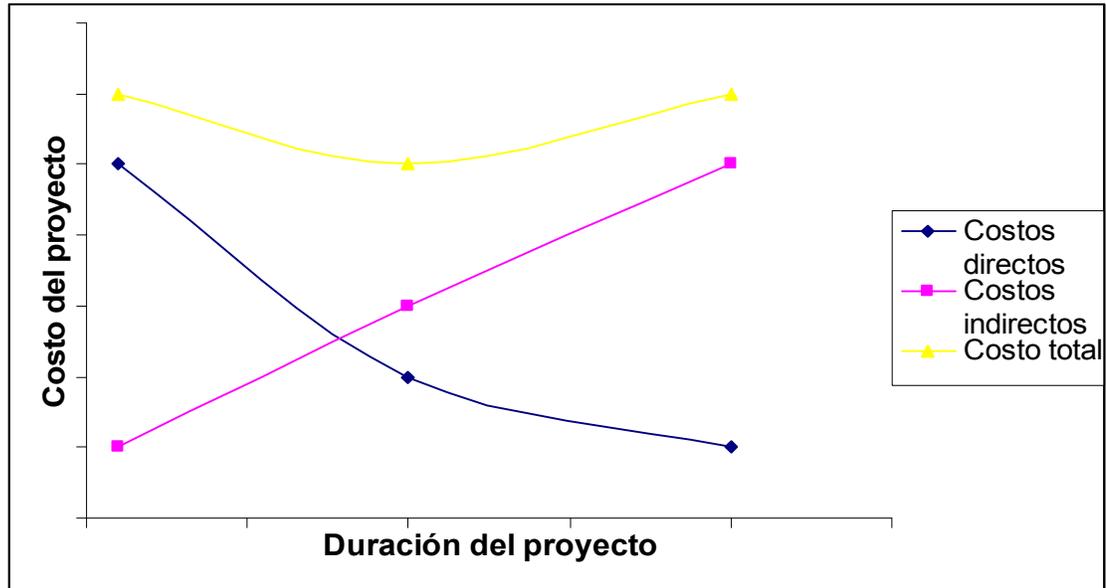
Fuente: Tarek Hegazy¹³. Traducido por Jairo Ossa

El caso contrario se dará para los costos indirectos, debido a que a menor duración de la actividad, menor tiempo en pago de salarios al personal de obra (mano de obra, celador, almacenista, profesionales, etc).

Al analizar independientemente los costos directos e indirectos como se explicó anteriormente y sumarlos, se podrá hallar un punto donde los costos totales serán bajos, este comportamiento se observa en la imagen 8:

¹³ Ibid. p 212

Imagen 8: Influencia de la duración en los costos directos, indirectos y totales de un proyecto



Fuente: Tarek Hegazy¹⁴, traducido por Jairo Ossa

Los intercambios de costo-tiempo pueden ser abordados por medio de distintas técnicas, algunas de estas son métodos Heurísticos, modelos de programación matemática y algoritmos genéticos. Las ventajas y desventajas de cada una de estas herramientas para el análisis son descritas por Hegazy (2002):

¹⁴Ibid. p 213

Imagen 9: Ventajas y desventajas de las diferentes técnicas para el análisis de ICT

TÉCNICAS PARA EL ANÁLISIS DE ICT			
	Métodos heurísticos	Modelos de programación matemática	Algoritmos genéticos
Descripción	Reglas simples de "dedo gordo"	Programación lineal, programación de enteros o programación dinámica	Búsqueda de optimización basada en teoría de la evolución y reproducción
Ventajas	1. Fácil de entender	1. Puede generar soluciones óptimas	1. Algoritmos con gran espacio de búsqueda
	2. Genera buenas soluciones		2. Pueden usarse relaciones tiempo-costo discretas
	3. Usado para proyectos de gran tamaño		3. Aplicable a problemas de gran tamaño
Desventajas	1. Deficiencia en bases matemáticas	1. Difícil de formular	1. Tiempos de compilación altos
	2. No garantiza soluciones óptimas	2. Las soluciones encontradas pueden ser mínimos locales	2. No se puede saber si se ha encontrado o cuando se ha encontrado una solución óptima
	3. Generalmente asume relaciones entre tiempo y costo lineales en lugar de asumir relaciones discretas	3. Generalmente asume relaciones entre tiempo y costo lineales en lugar de asumir relaciones discretas	
		4. Sólo aplica para problemas de tamaño pequeño	

Fuente: Tarek Hegazy¹⁵, traducido por Jairo Ossa

1.6 VALOR PRESENTE NETO

Este es un método usado como criterio de selección para la realización de proyectos, que consiste en evaluar la diferencia entre los egresos e ingresos generados a lo largo de la realización o construcción de un proyecto y trasladarlos al valor presente.

¹⁵Ibid. p 213

Es ampliamente usado debido a su fácil aplicación y a que éste incorpora el valor del dinero en el tiempo para determinar los flujos de efectivo netos, para el caso de este trabajo de grado, en la construcción de una obra de ingeniería civil, con el fin de poder hacer comparaciones entre los flujos de efectivo que se generan en periodos definidos a lo largo de la duración del proyecto. La manera de trasladar los flujos, es calculado mediante la tasa de interés o la tasa de oportunidad, que puede ser definida por el mercado o por la esperanza de interés del constructor o dueño del proyecto.

El uso del método del valor presente neto es muy útil, algunas de sus ventajas se mencionan a continuación:

- Fácil aplicación
- Uso del concepto del valor del dinero en el tiempo: Es necesario debido a que el valor del dinero se encuentra en constante cambio, entonces las inversiones realizadas en distintos periodos pueden variar.
- Decisión correcta de aceptación o rechazo del proyecto: Al realizar una estimación correcta de los flujos de caja que se presentarán a lo largo de los periodos, se puede tomar una decisión confiable sobre la rentabilidad del proyecto.

Uno de los aspectos a los que se debe prestar mayor atención cuando se usa el método del valor presente neto, es la tasa de oportunidad que vaya a ser usada, ya que el cálculo es muy sensible a la magnitud de la tasa seleccionada, a mayor tasa de interés, menor será el valor presente neto, y en caso de estimar una tasa de interés u oportunidad incorrecta, los resultados pueden ser muy diferentes en el momento de la construcción.

La expresión utilizada para trasladar los flujos de caja a valor presente se presenta a continuación:

$$\sum_{p=1}^m \frac{E_p}{(1+i)^p}$$

Dónde:

p: 1,2,..., m Período en el que se encuentra actualmente el proyecto

E_p : Egreso en el período p

i: Tasa de interés u oportunidad del inversionista

1.7 ESTIMACIONES DE DURACIONES PARA MÉTODO DE PERT

Debido a la gran incertidumbre que existe en las duraciones de las actividades de un proyecto, se pueden usar ciertas estimaciones, para encontrar la probabilidad de terminar el proyecto en una fecha esperada¹⁶.

Para esto se deben definir tres estimaciones de duraciones para el proyecto:

- La más probable: Es la duración que se cree, tenga la mayor probabilidad de ocurrencia.
- La más optimista: Es la duración en la que se realizaría una actividad si no se presentaran inconvenientes durante su ejecución.
- La más pesimista: Es la duración en la que se realizaría una actividad en el caso en que se presentaran inconvenientes durante la construcción.

Para hallar este valor esperado de la actividad, se hacen las siguientes dos suposiciones:

- La dispersión entre la duración optimista (a) y la duración pesimista (b) es de seis desviaciones estándar, esto debido a que “las colas de muchas distribuciones de probabilidad (como en la distribución normal) están más o menos a tres desviaciones estándar de la media de manera que existe una dispersión de alrededor de seis desviaciones estándar entre las colas” (Hillier 1997).

¹⁶ HILLIER, Frederick y LIEBERMAN. Introducción a la investigación de operaciones. México DF: Editorial McGraw-Hill, Sexta edición 1997. p 396

Esta suposición es expresada como:

$$6\sigma = b - a \rightarrow \sigma^2 = \left[\frac{1}{6}(b - a) \right]^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

- La distribución de probabilidad del tiempo de la actividad es una distribución beta, es decir, con una sola moda y dos puntos terminales.

Con estas dos suposiciones se puede expresar el valor esperado como se muestra a continuación:

$$t_e = \frac{1}{3} \left[2m + \frac{1}{2}(a + b) \right] \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

a: Estimación optimista

b: Estimación pesimista

m: Estimación más probable.

Teniendo la Variancia (Ecuación 1) y el tiempo esperado (Ecuación 2) para cada actividad y definiendo una probabilidad de ocurrencia para una duración en la actividad, se pueden hallar los días que se pueden quitar a la duración de la actividad en sus límites superior e inferior:

$$c = de * k \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

c: Días que se descuentan para la duración máxima y que se aumentan en la duración mínima

d: Desviación estándar, $\sqrt{\text{Variación}}$

k: valor k asociado al área bajo la curva normal para la mitad del complemento de la probabilidad de esperanza que se quiere. Es decir, si se quiere una esperanza de ocurrencia del 90%, se debe hallar el valor k asociado al área bajo la curva normal del 5%, y como se descuenta en la duración máxima y mínima de la actividad, se completa el 10% necesario.

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO

El problema a estudiar en este trabajo de grado se apoya en los datos reales de la construcción de un parque urbano localizado en la ciudad de Bogotá y realizada en el año 2004. Por medio de la información encontrada en el análisis de precios unitarios de esta obra, su presupuesto y duraciones se analizará la relación de los cambios realizados en los espacios de tiempo de las actividades de la obra y su VPN, con el fin de encontrar una programación de obra adecuada, es decir, la duración total del proyecto para la cual el costo de realización será más bajo.

El parque se encuentra ubicado en la avenida 9ª entre calles 135 y 136 en el costado occidental. Este consta de 30 actividades divididas en seis capítulos y consiste básicamente en la adecuación del terreno del parque y la dotación e instalación de mobiliario urbano y de recreación.

La idea de la realización de este trabajo de grado surgió con la intención de aplicar en Colombia el concepto usado por Dodin y Elimam¹⁷ (desarrollado sobre proyectos realizados en Estados Unidos) a un proyecto real de construcción. Aunque esta investigación se basa en la mencionada anteriormente, existen algunas diferencias debido a que la manera de abordar la minimización de costos es totalmente distinta y el escenario de trabajo en Colombia es diferente al de Estados Unidos.

Algunas de las diferencias presentadas entre Colombia y el país donde fue realizada la investigación inicialmente (Estados Unidos), se tendrán en cuenta en el desarrollo de este trabajo. Estas, tendrán influencia en los costos y duraciones de las actividades e igualmente generarán grandes diferencias en los modelos matemáticos de minimización del costo así:

¹⁷ DODIN, B y ELIMAM, A. Integrated Project scheduling and material planning with variable activity duration and rewards. En: IIE Transactions. Volumen 33 Número 11; Marzo de 2001; p 1005-1018.

- * En Colombia ocasionalmente se emplean penalizaciones monetarias (contratos con empresas del Estado y algunos particulares) por retraso en entregas, pero no existen bonificaciones monetarias por tiempos en obra menores a los requeridos. Dodin (2001) tuvo en cuenta estos factores en su investigación, pero en este trabajo no se usarán, ya que no son muy comunes los incentivos por finalización temprana en los proyectos de construcción Colombianos.

- * Las entregas de pedido de materiales no siempre se realizan a tiempo, ya sea por falta de organización del proveedor o por las condiciones en las que se encuentre el país en el momento (cierre de vías, paros de transporte, situación social del país, etc.). Este factor será tenido en cuenta como un tiempo extra en las duraciones máximas de las actividades, es decir, si se define una duración máxima de 10 días para una actividad, también se debe tener en cuenta la influencia de la disponibilidad de insumos en esta, adicionando unos días a la duración máxima, pudiendo terminar en el día 12 o 13.

- * No en todas las obras hay un buen manejo e inventario de materiales, facilitando robos, generando desperdicios, expiración de insumos etc., además usualmente existe falta de capacitación de la mano de obra que implica mayores tiempos en la construcción y aumentos en los desperdicios. Al igual que en la entrega de materiales, este factor será incluido como un tiempo extra de las duraciones máximas de las actividades.

- * Clima meteorológico muy variable, que en algunos casos puede retrasar el desarrollo del proyecto debido a los constantes cambios de temperatura que se pueden dar en un día de trabajo. Este se tendrá en cuenta en las duraciones máximas, al igual que en los dos puntos anteriores.

El hecho de que el enfoque de este trabajo sea para el caso colombiano, no quiere decir que las herramientas usadas para el análisis no puedan ser empleadas para casos de proyectos

que no sean realizados en este país o que no sean parques urbanos como se observará más adelante, porque la esencia del trabajo en sí y las diferencias mencionadas anteriormente se encuentran incluidas en los parámetros y características de las actividades que influirán directamente en los resultados arrojados, pero que no tiene nada que ver con el funcionamiento de las herramientas.

Los datos que se usarán para la realización de este trabajo fueron obtenidos del análisis de precios unitarios presentado por Construcciones Jairo Antonio Ossa en la licitación para la construcción del parque y por asesoría de personas con experiencia en realización de proyectos y obras. La información requerida corresponde a datos sobre los insumos, rendimientos de maquinaria y mano de obra, relaciones de precedencia entre actividades y costos en general.

Este análisis se apoyará en el uso de AG, debido a que el modelo matemático no es lineal (descartando la posibilidad de realizar el análisis por medio de programación lineal como fue realizado en el trabajo de Dodin (2001)) y se debe estudiar un campo de posibilidades muy amplio como se mostrará a continuación:

Existen 30 actividades de construcción del parque a realizar. Como se mencionará más adelante, habrá dos características que definirán cada actividad, una para la duración y otra para el retraso o días de holgura permitidos. La siguiente expresión permite calcular el número de combinaciones posibles en el caso de buscar exhaustivamente la mejor solución del problema:

$$\prod_{\forall a} d_a * r_a$$

Dónde:

d_a : Duraciones posibles de la actividad a

r_a : Retrasos posibles para actividad a

A: $\{1,2,\dots,30\}$ conjunto de actividades del proyecto

Para hacer el cálculo de la cantidad de combinaciones que puedan ser estudiadas y del tiempo que pueda tomar, se hallaron las duraciones de cada actividad y los retrasos posibles, que oscilan entre 5 y 10 días y además se supuso que el análisis de cada cromosoma toma aproximadamente 2 segundos, de esta manera el número de opciones de combinación existentes y el tiempo para calificarlas será:

$$\begin{aligned} \text{Combinaciones} &= 4.65 * 10^{45} \\ \text{Tiempo} &= 9.3 * 10^{45} \text{ segundos} = 2.58 * 10^{42} \text{ horas} = 2.95 * 10^{36} \text{ siglos} \end{aligned}$$

Para esta labor será indispensable el uso de una computadora que permita la exploración de algunas combinaciones de duraciones (obviamente no será posible llevar a cabo el estudio a todas las opciones), que como explica Hegazy (2002) los AG son una excelente herramienta para estos casos.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Definición de las características necesarias de las actividades.
- Suposiciones para aproximar el estudio del problema.
- Desarrollo del modelo matemático.
- Definición de la información que debe contener el cromosoma
- Clasificación de la información
- Programación del algoritmo genético.
- Resultados.

2.1 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS NECESARIAS DE LAS ACTIVIDADES

Las características de las actividades se encuentran relacionadas con los costos directos y los costos indirectos, que se encuentran afectados por los imprevistos que puedan suceder en la construcción. A continuación se presentan las características definidas para las actividades:

2.1.1 COSTOS DIRECTOS

Son los generados por los gastos que implica la realización de cada actividad:

Actividad:

- Tiempo de duración mínimo
- Tiempo de duración máximo
- Cantidad a ejecutar

Materiales

- Cantidad de material necesario para la actividad
- Valor unitario del material

Herramienta

- Costo de herramienta usada por cuadrilla
- Cantidad de herramienta usada por cada cuadrilla de mano de obra

Equipo

- Alquiler equipo por unidad de tiempo
- Rendimiento del equipo en actividad

Mano de obra

- Costo mano de obra por unidad de tiempo
- Rendimiento de la mano de obra

2.1.2 COSTOS INDIRECTOS

- Gastos de administración por cada periodo definido por el usuario

2.1.3 RETRASOS POSIBLES

Los posibles inconvenientes serán tenidos en cuenta como días adicionales en las duraciones máximas de cada actividad.

- Clima
- Fecha de entrega materiales
- Manejo de materiales (robos, desperdicios, expiración)
- Variación precios insumos

Las características definidas en esta sección son totalmente nuevas, razón por la cual el modelo matemático será distinto al usado en la investigación original.

2.2 *SUPOSICIONES PARA APROXIMAR EL ESTUDIO DEL PROBLEMA*

De acuerdo a las características del problema que se analiza en este trabajo de grado, se tienen en cuenta las siguientes suposiciones

- No habrá recompensa por terminar las actividades antes del tiempo estipulado.
- Se dispondrá de dinero permanentemente, es decir, no se tendrán en cuenta créditos ni préstamos, ya que por las especificaciones de la obra, se espera que el valor de la construcción pueda ser costada inicialmente por el contratista.
- Se definirán duraciones máximas, mínimas y retrasos posibles para la realización de cada actividad.
- Las duraciones de actividades se trabajarán por días.

- Una jornada o día de trabajo será equivalente a 8 horas y se trabajará de lunes a sábado, entonces un periodo tendrá 26 días al descontar los domingos.
- Los retrasos generados por el clima, fecha de entrega de materiales, manejo de materiales y otros son contemplados como un tiempo extra en la duración máxima de las actividades, es decir, las actividades que se vean afectadas en mayor grado por estos retrasos, tendrán la adición de unos días extra además de su límite de duración máximo (asesoría de personas con experiencia en el tema) que permita cubrir distintos tipos de demoras.
- Debido a que se espera que el proyecto no dure mucho tiempo, la variación de precios de insumos y mano de obra no afectará drásticamente los costos de la obra y por lo tanto, no serán tenidos en cuenta. Para el caso de proyectos de larga duración, se debe realizar un presupuesto que tenga en cuenta una variación de los precios de insumos y jornales esperada.
- Los insumos se encontrarán disponibles en obra tan pronto sean necesitados, desde el primer día de cada actividad.
- La relación entre actividades será de naturaleza concatenada, es decir, se debe terminar por completo la actividad predecesora para comenzar la siguiente. Esto no suele suceder muy seguido en los proyectos reales, donde no sólo se encuentran actividades concatenadas, sino también desfasadas y paralelas.
- El costo de una actividad en su duración total podrá ser desglosada por días, suponiendo gastos proporcionales diarios

2.3 *MODELO MATEMÁTICO*

El modelo matemático diseñado para este análisis incluye costos asociados al desarrollo del proyecto en dos distintas áreas: Costos directos (generados por el desarrollo en sí de la obra) que incluye gastos por materiales, mano de obra, herramienta y equipos, y costos indirectos (asociados con la supervisión y apoyo).

Inicialmente se había incluido en el análisis un factor de cálculo que tenía en cuenta los costos asociados por almacenamiento del material, es decir, influía en los costos directos dependiendo de la cantidad que fuera necesario tener en reserva para realizar la actividad. Después de consultar con personas con experiencia en obra, fue retirado porque estos costos no son muy importantes ya que, en la mayoría de obras, se exige la construcción de un campamento, donde se pueden almacenar los materiales. Este campamento debe ser construido sin importar la limitación de espacio.

A diferencia del modelo presentado por Dodin y Elimam (2001), quienes se enfocan totalmente en los costos asociados a los materiales, en este modelo matemático, se tienen en cuenta otros factores para el cálculo de la minimización que fueron mencionados anteriormente (Costo por herramienta, alquiler de equipo, mano de obra y el costo de administración). Estos nuevos factores surgen debido a la naturaleza del proyecto (construcción) mientras que los investigadores originales trabajan proyectos de producción industrial (no lo especifican en el artículo, se supone por el contexto).

Conjuntos:

A: {1, 2, ..., n}	Actividades del proyecto
P: {1, 2, ..., m}	Periodos de tiempo
Z _n :	Actividades predecesoras de la actividad n $Z_n \subseteq A \quad \forall n$
K: {1, 2, ..., o}	Tipos de mano de obra
E: {1, 2, ..., p}	Tipo de equipo
J: {1, 2, ..., q}	Tipo de material
H: {1, 2, ..., r}	Tipo de herramienta

Parámetros:

D _{j,a} :	Demanda de recurso j para la actividad a por unidad de actividad
U _j :	Costo unitario del recurso j
R _{k,a} :	Rendimiento de la mano de obra k en la actividad a
Y _{e,a} :	Rendimiento del equipo e en la actividad a
V _{k,a} :	Valor unitario de la mano de obra k por realizar actividad a para duración normal
Q _a :	Cantidad a ejecutar en la actividad a
M _a :	Duración máxima de la actividad a
N _a :	Duración mínima de la actividad a
L _{e,a} :	Costo alquiler equipo e por realizar la actividad a para una duración normal
G _p :	Costo administración por periodo
X _{h,k,a} :	Costo de herramienta usada por unidad de mano de obra k para unidad de actividad a
i:	Tasa de interés de oportunidad

Variables

m _{a,k} :	Cantidad de cuadrillas k necesarias para realizar unidad de actividad a
l _{a,e} :	Cantidad de equipo e necesario para realizar unidad de actividad a
d _a :	Duración de la actividad a
c _{a,p} :	Costo de la actividad a en el periodo p
s _a :	Día de inicio de la actividad a
f _a :	Día de finalización de la actividad a
e _p :	Egreso en el periodo p
y _{h,a} :	Desgaste por unidad de tiempo de la herramienta h para actividad a

Función objetivo

$$\text{Min} \sum_{p=1}^m (e_p + G_p) * \frac{1}{(1+i)^p} \quad \text{Ecuación 4}$$

Restricciones:

$$e_p = \sum_{a=1}^n C_{a,p} \quad \forall p \quad \text{Ecuación 5}$$

$$C_{a,p} = \underbrace{\sum_{\forall j} (D_{j,a} * U_j * Q_a)}_{(a)} + \underbrace{\sum_{\forall h} (y_{h,a})}_{(b)} + \underbrace{\sum_{\forall e} (L_e * Q_a * l_{a,e})}_{(c)} + \underbrace{(m_{a,k} * V_k * Q_a)}_{(d)} \quad \forall a \quad \text{Ecuación 6}$$

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1}{8} * \frac{1}{R_{k,a}} \quad \forall a \quad \forall k \quad \text{Ecuación 7}$$

$$y_{h,a} = m_{a,k} * X_{h,k,a} * Q_a \quad \forall a \quad \forall h \quad \text{Ecuación 8}$$

$$l_{a,e} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1}{8} * \frac{1}{Y_{e,a}} \quad \forall a \quad \forall e \quad \text{Ecuación 9}$$

$$C_{a,p} = 0 \quad \forall p < s_a \quad \forall a \quad \text{Ecuación 10}$$

$$C_{a,p} = 0 \quad \forall p > f_a \quad \forall a \quad \text{Ecuación 11}$$

$$N_a \leq d_a \leq M_a \quad \forall a \quad \text{Ecuación 12}$$

$$f_a - s_a > 0 \quad \forall a \quad \text{Ecuación 13}$$

$$s_{a+1} - f_a \geq 0 \quad \forall a \quad \text{Ecuación 14}$$

En la ecuación (4) se indica la intención de minimizar el VPN de todos los egresos. La ecuación (5) define la manera en que se calcularán los egresos, siendo una suma de los costos directos para cada actividad (ecuación 6). La ecuación (6) muestra los costos directos asociados a la realización de cada actividad de la siguiente manera: La sección (a) corresponde al valor de materiales para la actividad a así: cantidad de material necesario para realizar una unidad de la actividad por el costo unitario de los materiales por la cantidad de actividad necesaria. La sección (b) se relaciona con los costos por desgaste de herramienta que salen de la ecuación (8), que depende de la cantidad de mano de obra que interviene en la realización de la actividad y el desgaste por cada cuadrilla. La sección (c) obedece a los gastos de equipos y la (d) a los gastos de mano de obra.

En la expresión (7) se encuentra la definición de la demanda de mano de obra que es muy similar a la ecuación (9) que muestra la demanda de maquinaria para una actividad, éstas consisten en encontrar la cantidad de actividad que debe ser ejecutada a diario y relacionarla al rendimiento de la mano de obra o de la máquina, teniendo en cuenta que éstos se dan por horas y es necesaria su transformación a días (jornales de 8 horas). Todas éstas se encuentran incluidas en la ecuación (6).

Las siguientes ecuaciones presentadas son restricciones; la (10) y (11) expresan que si una actividad no se ha comenzado en el periodo que se está estudiando o la actividad ha terminado el nuevo periodo que se está estudiando, su costo asociado será cero. La expresión (12) restringe la duración de una actividad a sus límites máximo y mínimo, en la ecuación (13) se especifica que la duración de una actividad debe ser mayor a cero unidades y en la (14) se dice que una actividad no podrá comenzar sin que sus predecesores hayan terminado.

2.4 DEFINICIÓN DE LA INFORMACIÓN QUE CONTENDRÁ EL CROMOSOMA

2.4.1 Información del cromosoma

En la función objetivo, se observa que la información necesaria para resolverla se encuentra en su mayoría en función del tiempo. Sabiendo esto, se debe diseñar un cromosoma que contenga información sobre duración de actividades, pero la decisión del cromosoma que se quiere usar no puede ser tomada a la ligera, ya que se podrían generar soluciones infactibles o cromosomas que involucrarían revisiones para prevenirlas, que implicaría un gasto de tiempo innecesario en la ejecución de la aplicación.

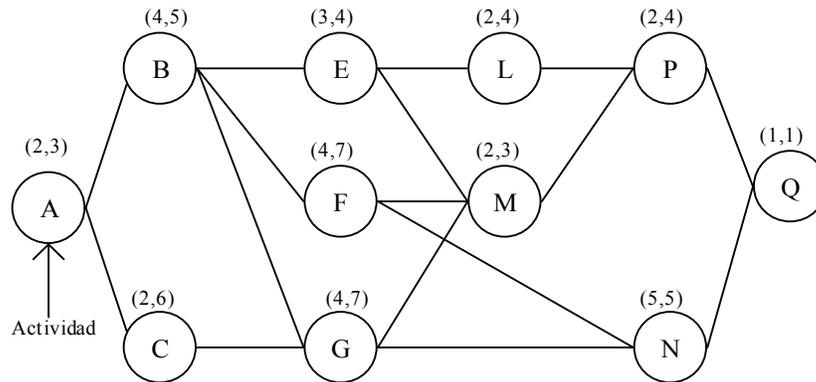
A continuación se presentan cromosomas que han sido usados por algunos autores en distintas investigaciones, y que se aplicaron para este problema en el ejemplo del artículo de Sou-Sen Leu y Chung-Huei Yang¹⁸, con el fin de estudiar las ventajas y desventajas de cada una de las codificaciones. De esta manera se diseñó un cromosoma que respondió de manera acertada a las necesidades de este trabajo de grado. Para este análisis se trabajó con recombinación de un punto. El ejemplo contiene la siguiente información:

¹⁸LEU, Sou y YANG, Chung. GA-Based multicriteria optimal model for construction scheduling. Journal of construction engineering and management. Volumen 125 Número 6; Diciembre de 1999; p 425

Imagen 10: Duraciones máximas y mínimas de las actividades del ejemplo

Actividad	Duración	
	Mínima	Máxima
A	2	3
C	2	6
B	4	5
E	3	4
L	2	4
F	4	7
G	4	7
M	2	3
N	5	5
P	2	4
Q	1	1

Imagen 11: Diagrama Pert del artículo de LEU y YANG (1999)



Leyenda: (Duración mínima, Duración máxima)

Fuente: Sou Leu¹⁹ Traducido por Jairo Ossa

El punto de cruce para la reproducción se encuentra entre la actividad L y la actividad F.

¹⁹ Ibid 425

- Sou-Sen Leu y Chung-Huei Yang¹² usaron cromosomas cuyos genes contenían la información sobre las duraciones de cada actividad. Al aplicarla en un ejemplo se encontró:

Imagen 12: Ejemplo de cromosoma usado por Leu y Yang, duraciones de cada actividad

A	B	C	D	E	F	G	H	I	→	Actividad
3	4	6	4	3	2	4	4	2	→	Duración de actividad

Imagen 13: Cromosoma usado por Leu y Yang aplicado su ejemplo con un punto de cruce

Orden precedencia		A	C	B	E	L	F	G	M	N	P	Q	Rutas críticas posibles							Duración crítica
Duración	Padre 1	2	2	5	4	2	7	4	2	5	4	1	18	18	21	20	18	15	14	21
	Padre 2	3	4	4	3	3	5	5	3	5	3	1	17	17	19	18	19	19	18	19
	Padre 3	3	6	4	4	4	4	7	3	5	4	1	20	19	19	17	22	24	22	24
Generación 1	P1+P2	2	2	5	4	2	5	5	3	5	3	1	17	18	19	18	19	16	15	19
	P1+P3	2	2	5	4	2	4	7	3	5	4	1	18	19	19	17	22	19	17	22
	P2+P3	3	4	4	3	3	4	7	3	5	4	1	18	18	19	17	22	22	20	22
	P2+P1	3	4	4	3	3	7	4	2	5	4	1	18	17	21	20	18	18	17	21
	P3+P1	3	6	4	4	4	7	4	2	5	4	1	20	18	21	20	18	20	19	21
	P3+P2	3	6	4	4	4	5	5	3	5	3	1	19	18	19	18	19	21	20	21

Ventaja

Al momento de cruzar cromosomas para generar una población no habrá soluciones infactibles.

Desventaja

Se obligará a cada actividad a empezar lo más rápido que se pueda, sin dar espacio para actividades con tiempo de holgura.

- Y. Cengiz²⁰ usó cromosomas cuyos genes contenían información sobre las fechas de comienzo de cada actividad. Al aplicarlo al ejemplo se encontró lo siguiente:

²⁰ CENGIZ, Y. Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constrains. En: Canadian journal of civil engineering. Vol 29 No 3Junio de 2002. p 423

Imagen 14: Ejemplo de cromosoma usado por Cengiz. Fechas de comienzo de cada actividad

A	B	C	D	E	F	G	H	I	→	Actividad
3	4	6	4	3	2	4	4	2	→	Fechas de comienzo de actividad

Imagen 15: Cromosoma usado por Cengiz aplicado al ejemplo de Leu con un punto de cruce

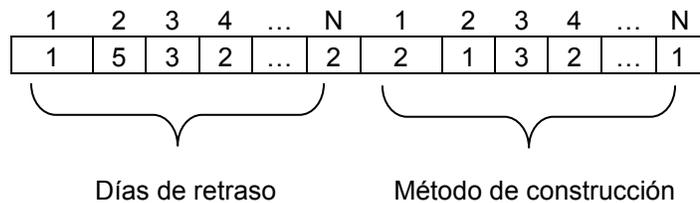
Orden precedencia		A	C	B	E	L	F	G	M	N	P	Q
Duración	Padre 1	0	2	2	6	9	6	6	10	10	12	15
	Padre 2	0	3	3	8	12	8	8	13	13	16	17
Generación 1	P1+P2	0	2	2	6	9	8	8	13	13	16	17
	P2+P1	0	3	3	8	12	6	6	10	10	12	15

Desventaja

Al momento de cruzar cromosomas para generar una población se pueden generar soluciones infactibles, como se observa en la generación P2 + P1 donde la actividad L y la actividad P comienzan el mismo día, sabiendo que L es predecesora de P (Imagen 15).

- Hegazy y Petzold²¹ usaron cromosomas con dos genes para cada actividad, basados en lo que ellos llaman “el síndrome del estudiante”. La primera parte del cromosoma son días de retraso para no empezar la actividad lo más temprano posible, sino, empezarla con demoras. La siguiente parte de la cadena es sobre método de realización usado para cada actividad, definiendo 3 métodos por cada una.

Imagen 16: Ejemplo de cromosoma usado por Hegazy y Petzold. Días de retraso de cada actividad y método de cada actividad



N: Número de actividades

²¹ HEGAZY Y PETZOLD. Genetic optimization for dynamic project control. *En* Journal of construction engineering and management. Vol. 129 no. 4 Julio 2003. p 401

Imagen 17: Cromosoma usado por Hegazy y Petzold aplicado al ejemplo de Leu con un punto de cruce

Orden precedencia		A	C	B	E	L	F	G	M	N	P	Q	Rutas críticas posibles						Duración crítica	
Duración	P 1	1	4	1	1	2	3	3	1	0	2	0	21	20	23	21	23	24	22	24
	P 2	0	3	1	0	1	3	2	1	0	1	0	17	17	21	20	20	20	19	21
	P 3	1	2	0	1	2	1	3	0	0	0	0	18	16	17	18	19	19	20	20
Generación 1	P1+P2	1	4	1	1	2	3	2	1	0	1	0	20	19	22	21	21	22	21	22
	P1+P3	1	4	1	1	2	1	3	0	0	0	0	19	17	18	19	20	21	22	22
	P2+P3	0	3	1	0	1	1	3	0	0	0	0	16	15	17	18	19	19	20	20
	P2+P1	0	3	1	0	1	3	3	1	0	2	0	18	18	22	20	22	22	20	22
	P3+P1	1	2	0	1	2	3	3	1	0	2	0	20	19	22	20	22	22	20	22
	P3+P2	1	2	0	1	2	3	2	1	0	1	0	19	18	21	20	20	20	19	21

Ventaja

Con los días de retraso no se generan infactibilidades y no se obliga a la actividad a empezar lo más temprano posible.

Desventaja

Generalmente, en los proyectos de construcción se trabaja con un método por cada actividad, por lo tanto sería escasa la información para codificar el cromosoma.

2.4.2 Contenido de cromosoma escogido

Después de analizar las ventajas y desventajas de cada cromosoma, se decidió trabajar con una cadena que contendrá dos características por cada actividad. El primer gen tendrá la información sobre su duración y el segundo contendrá la información sobre los días de retraso de cada actividad. De esta manera se garantiza que no existirán generaciones con información infactible, como se observó en los ejemplos mencionados anteriormente y que las actividades no se encontrarán obligadas a comenzar lo más temprano posible, ya que se trabajará con genes que retrasarán el comienzo de las actividades permitiendo la holgura. A continuación se muestra un ejemplo del cromosoma escogido:

Imagen 18: Ejemplo de cromosoma escogido. Primero información sobre duraciones y luego de retrasos para cada actividad

	Duración generada						Días de retraso					
Actividad	A	C	B	E	...	Q	A	C	B	E	...	Q
	2	4	4	4	...	1	0	2	1	0	...	0

Puesto que cada actividad estará contenida por dos alelos, la configuración del cromosoma podría darse de dos maneras, la primera opción es que inicialmente se encuentre la cadena de duraciones y luego la de días de retraso, teniendo así los dos genes de cada actividad separados. La segunda opción es tener los dos alelos de la actividad pegados como se muestra en la Imagen 19:

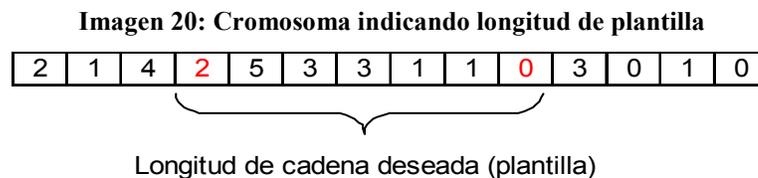
Imagen 19: Ejemplo de cromosoma escogido. La información sobre duraciones y retrasos de cada actividad se encuentra unida

	Duraciones													
Actividad	A	A	B	B	C	C	D	D	E	E	F	F	G	G
	2	1	4	2	5	3	3	1	1	0	3	0	1	0
	Retrasos													

2.4.3 Configuración del cromosoma

Para tomar la decisión sobre la configuración del cromosoma, se observó la influencia de las distribuciones mencionadas en la teoría de las plantillas similares²².

Al evaluar la función de adaptación de un grupo de cromosomas e identificar los que mejor respondan, puede darse el caso que se reconozcan características similares en el cromosoma y que éstas sean las que mejoren su adaptación. Si esto sucede se suele dejar estos puntos fijos, es decir, la porción de cadena que se encuentre entre los puntos identificados se denomina plantilla y se desea que esta se transmita a sus hijos, con el fin de esperar generaciones futuras mejores. En el momento de realizar la recombinación se corre el riesgo de que un punto o alguno de los puntos de corte caigan dentro de la plantilla que se quiere mantener unida y destruya su información. Un ejemplo ilustrativo ayudará a entender mejor el concepto:

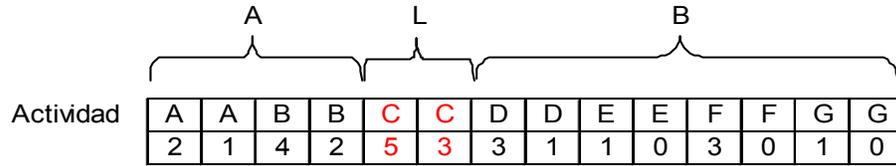


Se puede observar que solo dos puntos son necesarios, pero debido a su separación el tamaño de la plantilla será de 7 posiciones, dentro de las cuales no puede caer un punto de corte ya que se destruiría la porción deseada.

Ahora, entendiendo este concepto se estudiará cual de las dos opciones mencionadas previamente será mejor, tomando como ejemplo un proyecto de 7 actividades en las cuales es necesario mantener la plantilla de duración-retraso para una actividad, caso que será muy posible encontrar en el desarrollo de este trabajo (para este ejemplo, la tercera actividad).

²² GOLDBERG, Op. cit. p 19

Imagen 23: Cromosoma con los alelos de cada actividad unidos



2.4.3.1.1 Para 1 punto de corte:

La probabilidad de mantener la plantilla unida es:

$$Pl = \frac{(n-1) - (L-1)}{(n-1)} \tag{Ecuación 15}$$

Expresado como la cantidad de puntos posibles por fuera de la plantilla del cromosoma dividido en el total de puntos, siendo para este caso igual a la longitud del cromosoma menos uno.

- Alelos de la actividad separados (Imagen 22)

Para este caso la dimensión L de la plantilla será igual a:

$$L = \frac{n}{2} + 1 \tag{Ecuación 16}$$

Donde L es reemplazado en la ecuación 15 para encontrar la probabilidad de mantener la plantilla unida.

- Alelos de la actividad unidos (
- Imagen 23)

Para este caso la dimensión L de la plantilla será igual a 2

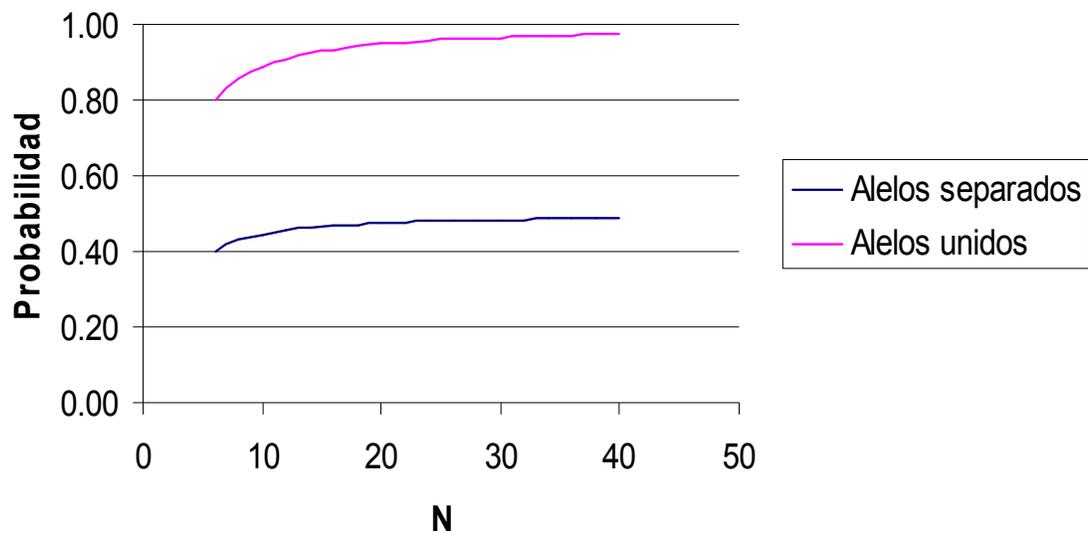
$$L = 2$$

Ecuación 17

Dónde L es reemplazado en la ecuación 15 para encontrar la probabilidad de mantener la plantilla unida.

La curva de probabilidades se muestra a continuación:

Imagen 24: Probabilidad de mantener la plantilla unida vs. longitud del cromosoma para el caso de alelos separados y alelos unidos con un punto de cruce.



2.4.3.1.2 Para 2 puntos de corte:

La probabilidad de mantener la plantilla unida depende ahora de dos puntos posibles de corte:

$$Pl = \left(\underbrace{\frac{(n-1)-(L-1)-B}{(n-1)}} + \underbrace{\frac{(n-1)-(L-1)-A}{(n-1)}} \right) * \left(\underbrace{\frac{(n-1)-(L-1)-B}{(n-1)}} + \underbrace{\frac{(n-1)-(L-1)-A}{(n-1)}} \right) \text{Ecuación 18}$$

$$Pl = \left(\frac{(n-1)-(L-1)-B}{(n-1)} + \frac{(n-1)-(L-1)-A}{(n-1)} \right)^2$$

$$Pl = \left(\frac{2*(n-1)-2*(L-1)-B-A}{(n-1)} \right)^2$$

$$Pl = \left(\frac{2n-2L-B-A}{(n-1)} \right)^2$$

Ecuación 19

La ecuación 18 expresa la probabilidad de mantener la plantilla unida, pero para este caso hay que tener en cuenta que habrá dos puntos de recombinación. En las secciones (1) y (2) se tiene en cuenta la posibilidad de que el primer punto caiga por fuera de la plantilla, en (1) se tiene en cuenta la cantidad de puntos de recombinación posibles a la izquierda de la plantilla (longitud de A) y en (2) se tiene en cuenta la cantidad correspondiente a la derecha de la plantilla (Longitud de B), ambas divididas entre la cantidad de puntos total. Como la recombinación puede darse en A o en B, las relaciones se suman. Puesto que el siguiente punto de recombinación se encontrará sujeto a exactamente las mismas condiciones mencionadas anteriormente, (3) y (4) será igual a (1) y (2).

Después se simplifica la expresión llegando a la ecuación 19.

- Alelos de la actividad separados (Imagen 22)

Para este caso la dimensión L de la plantilla será igual a:

$$L = \frac{n}{2} + 1$$

Ecuación 20

Dónde L es reemplazado en la ecuación 16 para encontrar la probabilidad de mantener la plantilla unida.

- Alelos de la actividad unidos (
- Imagen 23)

Para este caso la dimensión L de la plantilla será igual a 2

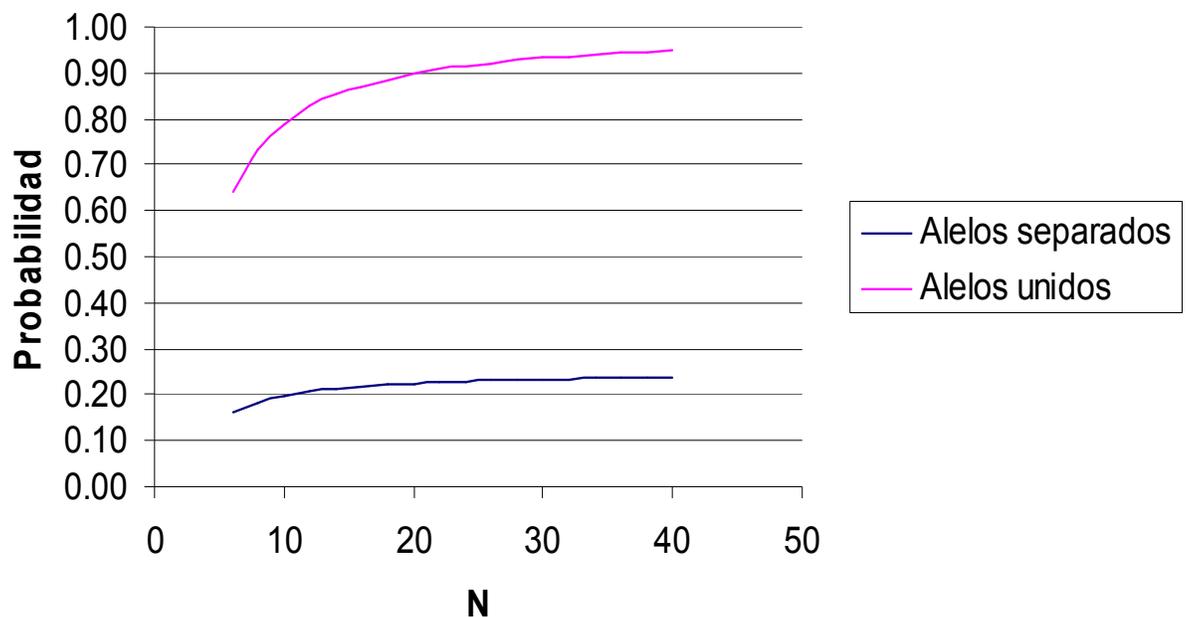
$$L = 2$$

Ecuación 21

Dónde L es reemplazado en la ecuación 19 para encontrar la probabilidad de mantener la plantilla unida.

La curva de probabilidades se muestra a continuación

Imagen 25: Probabilidad de mantener la plantilla unida vs. longitud del cromosoma para el caso de alelos separados y alelos unidos con dos puntos de cruce.



Para estas situaciones (1 y 2 puntos) la mejor opción posible se encuentra cuando la configuración del cromosoma tiene los alelos unidos, ya que en el caso de identificar una plantilla similar de los genes de una misma actividad, su probabilidad de no destruir los datos deseados es mucho más alta, sobre todo cuando no se trabaja con 1 sino con más puntos de cruce, caso para el cual, en el arreglo de alelos separados disminuye considerablemente la probabilidad de unión de la plantilla.

También se puede observar que entre más largo sea el cromosoma, mayor probabilidad de unión en la distribución de alelos unidos, comportándose, para ambos casos (1 y 2 puntos) asintóticamente al 100%.

2.4.3.2 Análisis para puntos de corte igual a elementos de cromosoma

Este es el caso en el que el número posible de cortes es igual a la longitud del cromosoma, un esquema que puede explicar esta situación se encuentra en la Imagen 26.

Imagen 26: Cromosoma con número posible de cortes igual a la longitud del cromosoma

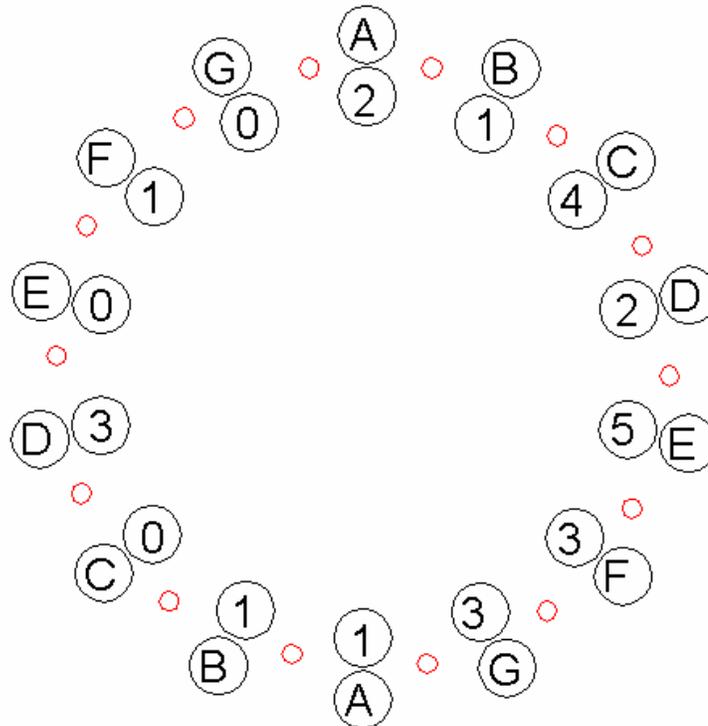


Imagen 27: Cromosoma con alelos de cada actividad separados

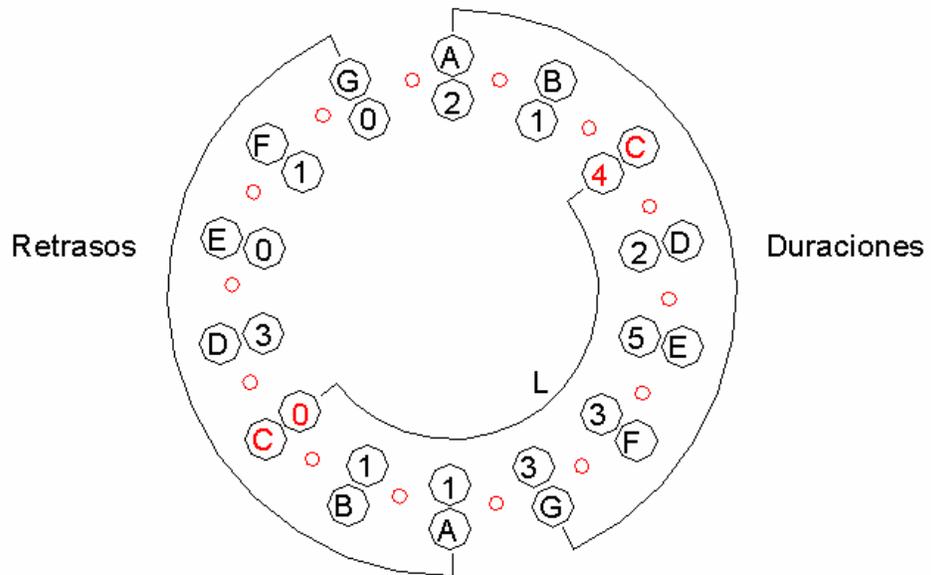
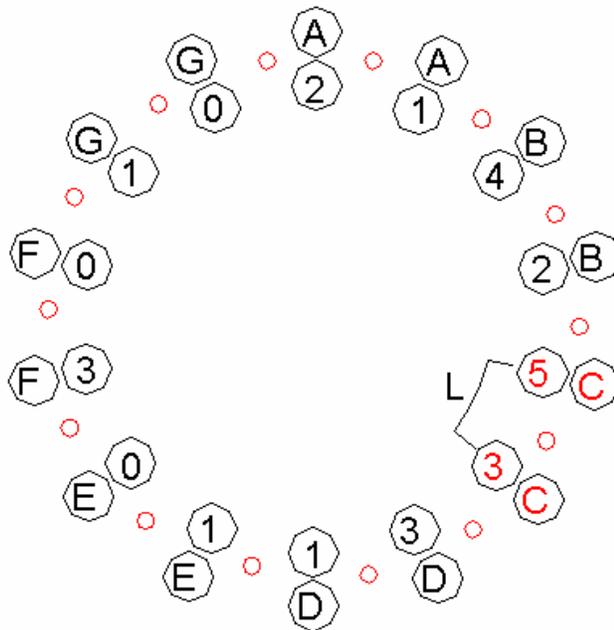


Imagen 28: Cromosoma con alelos de cada actividad unidos



Para este caso el número de puntos posibles de corte es igual al número de elementos de la cadena, entonces las probabilidades para 1 y 2 puntos quedarán así:

2.4.3.2.1 Para 1 punto de corte:

La probabilidad de mantener la plantilla unida es:

$$Pl = \frac{n - (L - 1)}{n} \quad \text{Ecuación 22}$$

Expresado como la cantidad de puntos posibles por fuera de la plantilla dividido en el total de puntos, siendo para este caso igual a la longitud del cromosoma

- Alelos de la actividad separados (Imagen 27)

Para este caso la dimensión L de la plantilla será igual a:

$$L = \frac{n}{2} + 1 \quad \text{Ecuación 23}$$

Dónde L es remplazado en la ecuación 22 para encontrar la probabilidad de mantener la plantilla unida.

- Alelos de la actividad unidos (Imagen 28)

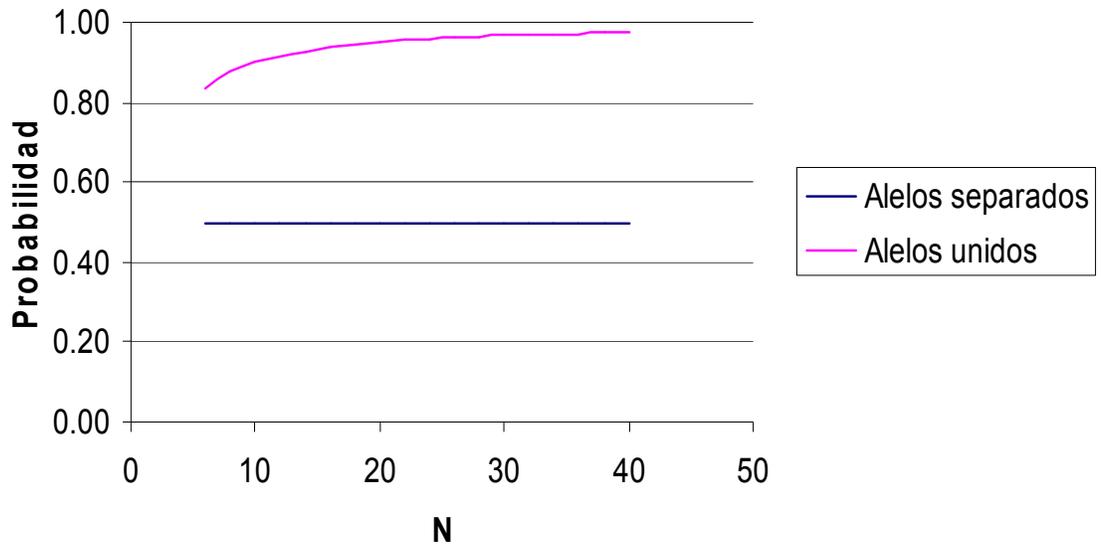
Para este caso la dimensión L de la plantilla será igual a 2

$$L = 2 \quad \text{Ecuación 24}$$

Dónde L es remplazado en la ecuación 22 para encontrar la probabilidad de mantener la plantilla unida.

La curva de probabilidades se muestra a continuación:

Imagen 29: Probabilidad de mantener la plantilla unida vs. longitud del cromosoma para el caso de alelos separados y alelos unidos con un punto de cruce.



2.4.3.2.2 Para 2 puntos de corte:

La probabilidad de mantener la plantilla unida es:

$$Pl = \underbrace{\left(\frac{n-(L-1)}{n}\right)}_{(1)} * \underbrace{\left(\frac{n-(L-1)}{n}\right)}_{(2)}$$

Ecuación 25

$$Pl = \left(\frac{n-(L-1)}{n}\right)^2$$

$$Pl = \left(1 - \frac{L-1}{n}\right)^2$$

Ecuación 26

La ecuación 25 expresa la probabilidad de mantener la plantilla unida, pero para este caso hay que tener en cuenta que habrá dos puntos de recombinación. En la sección (1) se tiene en cuenta la posibilidad de que el primer punto caiga por fuera de la plantilla, es decir, la cantidad posible de puntos de corte por fuera de esta dividida entre la cantidad de puntos total. Como el siguiente punto de recombinación se encontrará sujeto a exactamente la misma condición mencionada anteriormente, (2) será igual a (1).

Después se simplifica la expresión llegando a la ecuación 26.

- Alelos de la actividad separados (Imagen 27)

Para este caso la dimensión L de la plantilla será igual a:

$$L = \frac{n}{2} + 1$$

Dónde L es remplazado en la ecuación 26 para encontrar la probabilidad de mantener la plantilla unida.

- Alelos de la actividad unidos (Imagen 28)

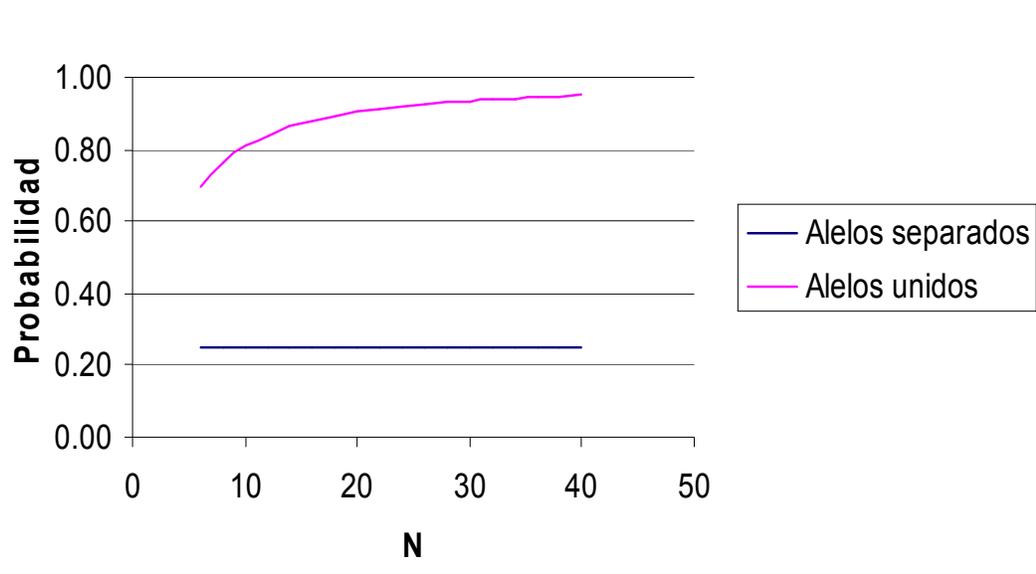
Para este caso la dimensión L de la plantilla será igual a 2

$$L = 2$$

Dónde L es remplazado en la ecuación 26 para encontrar la probabilidad de mantener la plantilla unida.

La curva de probabilidades se muestra a continuación:

Imagen 30: Probabilidad de mantener la plantilla unida vs. longitud del cromosoma para el caso de alelos separados y alelos unidos con dos puntos de cruce.



Para estas situaciones (1 y 2 puntos), al igual que en el escenario visto anteriormente, la mejor opción posible se encuentra cuando la configuración del cromosoma tiene los alelos unidos, debido a que la probabilidad de no destruir los datos deseados es más alta y tiende a un 100% a medida que aumenta el número de actividades del proyecto. Si se observa el arreglo de alelos separados, este disminuye a medida que aumenta el número de puntos de corte y no varía con la longitud del cromosoma, haciendo menos atractivo su uso para el trabajo.

Como se ha advertido en el comportamiento de las configuraciones de los alelos con ayuda de las gráficas, se decidió trabajar con el arreglo de genes unidos, además, al comparar sus probabilidades de unión para el caso de número de puntos menor al número de elementos y número de puntos igual al número de elementos, no se percibe una gran diferencia en las magnitudes de las posibilidades de unión, es más, los porcentajes son muy parecidos y el

desempeño de ambos es igual (comportamiento asintótico al 100% a medida que crece la longitud del cromosoma). Para efectos de facilidad en la programación del AG, se usará el caso de número de puntos posibles para la recombinación menor al total de genes. Pues como se expresó previamente la cantidad de puntos no será muy influyente en la teoría de las plantillas similares.

2.5 CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN

A continuación se presentan los datos, que como se mencionó en la sección 2.2, serán necesarios para estudiar el problema. Esta información se divide en costos directos e indirectos.

La información se organizó en una tabla de Excel, la cual servirá de formato para estudiar cualquier proyecto que se quiera analizar debido a que la programación del algoritmo se encontrará referenciada a las diferentes posiciones en la página. Por esto es muy importante la ubicación de cada una de las características del proyecto en las columnas o filas definidas, ya que cualquier cambio alteraría totalmente el funcionamiento del programa.

El archivo se encuentra dividido en diferentes hojas, donde cada una contiene cierta información del proyecto y el algoritmo, organizado de la siguiente manera:

Imagen 31: Descripción sobre el contenido del archivo de EXCEL

HOJA	DESCRIPCIÓN
Insumos	Contiene el listado de todos los insumos que serán usados en la obra
Unitarios	Análisis de precios unitarios para cada actividad
Precedencias	Relación de precedencia para todas las actividades del proyecto
Actividades	Descripción sobre la cantidad y duración de cada una de las actividades
Población	Individuos candidatos a ser padres en la generación actual. Clasificados por columnas
Pob_intermedia	La primera columna contiene la información sobre los padres de la generación. A partir de ésta se encuentran los hijos
Pob_mejores	Individuos escogidos para continuar a la siguiente generación
Resultados previos	Almacena los mejores cromosomas de cada corrida
Control	Se definen todos los parámetros bajo los cuales se ejecutará el algoritmo genético
Reporte	Información sobre los resultados finales de la ejecución del algoritmo
Reporte gráfico	Gráfica sobre la evolución del valor de adaptación promedio para cada ejecución del algoritmo a través de las diferentes generaciones

Para la presentación de la información y los formatos, se emplearán las características de un experimento controlado que fue usado para la validación del algoritmo genético (sección 2.6). Este proyecto corresponde a la pavimentación de los lotes números 135 C, D, E, F y G de automotriz interamericana S.A. y tiene seis actividades.

La información completa para el experimento controlado y los demás proyectos que se analizaron en este trabajo de grado se puede encontrar en el anexo 1.

2.5.1 Costos directos

- Relacionado con las actividades: información de las duraciones (mínimas, máximas con adiciones por retrasos posibles y retraso permitido), unidad, cantidad y órdenes de precedencia de cada actividad.

Imagen 32 Descripción de las actividades, cantidad a realizar y límites de tiempo

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "Proyecto adecuacion lotes automotriz americana". The spreadsheet contains a table with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H
	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	DURACIÓN MÁXIMA	DURACIÓN MÍNIMA	RETRASO PERMITIDO	
1	1	Pavimento en concreto reforzado, con manto de polietileno No6	m2	540	20	8	10	
2	2	Cuneta prefabricada en concreto de 0.4m de ancho	ml	415	30	10	10	
3	3	Cajas de inspeccion de 0.8 x 0.8m	Und	4	5	3	10	
4	4	Tuberia novafort de 8"	ml	60	15	8	10	
5	5	Cerramiento en malla y tubo	ml	415	20	10	10	
6	6	Puerta en malla y tubo de 16.5m	Und	1	1	1	10	
7								
8								
9								
10								
11								
12								

Dónde:

- Columna A: Es el código de la actividad
- Columna B: descripción de la actividad
- Columna C: Unidades en las que se cuantifica la actividad

- Columna D: Cantidad de actividad que debe ser realizada
- Columna E: Duración máxima permitida para la actividad
- Columna F: Duración mínima permitida para la actividad
- Columna G: Retraso u holgura máxima permitida para la actividad

Imagen 33 Órdenes de precedencia

	A	B	C	D
1	Actividad	Predecesoras		
2	1	3		
3	2	1		
4	3	4		
5	4	0		
6	5	2		
7	6	5		
8				
9				

Dónde en la columna de predecesoras se indica la o las actividades que deben encontrarse terminadas antes de empezar con la realización de la actividad actual. Para el caso del experimento controlado, cada actividad solo tiene una predecesora. Cuando los proyectos contienen más de una predecesora, estas se ubican de izquierda a derecha en la fila de la actividad actual.

- Relacionada con el costo de los insumos: se presentan los insumos que fueron usados en la construcción con sus respectivas unidades, código y precios unitarios.

Imagen 34: Información de insumos utilizados en la obra

	A	B	C	D	E	F
	Código	Descripción	Unidad	Precio unitario	Tipo	
2	3	Tubería novafort D=8"	ml	29928	Material	
3	4	Malla electrosoldada M-084	Kg	2200	Material	
4	5	Marco y tapa para caja de 0.8 x 0.8	Und	160000	Material	
5	30	Concreto MR 36 Kg/cm ²	m ³	275152	Material	
6	35	Arena lavada de pozo	m ³	30000	Material	
7	37	Sikaflex 151m	Can	697798	Material	
8	38	Cortadora con disco diamantado	dia	30000	Equipo	
9	39	Sika road de 1/4"	ml	450	Material	
10	40	Regla vibradora	Dia	40000	Equipo	
11	44	Polietileno No 6	m ²	800	Material	
12	45	puerta en malla y tubo de 16.5 m	Und	4856032	Material	
13	46	Cerramiento perimetral en malla	ml	140000	Material	
14	133	Cuadrilla general	Hra	10000	M. obra	
15	295	Formaleta	m ²	4000	Material	
16	306	Ladrillo recocido	Und	220	Material	
17	342	Acero de refuerzo Fy 2600 Kg/cm ²	Kg	1800	Material	
18	375	Herramienta menor	Glb	300	Herramienta	
19	455	Mortero 1:3	m ³	190000	Material	
20	1031	Concreto de 3000psi	m ³	268192	Material	
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						

Dónde:

- Columna A: indica el código del insumo
- Columna B: descripción del insumo
- Columna C: indica las unidades en las que se cuantifica el insumo
- Columna D: es el costo del insumo por unidad
- Columna E: tipo de insumo. Estos pueden ser: herramienta, equipo, material o mano de obra

- Relacionada con análisis de precios unitarios: Actividad a la que pertenece, insumo usado, cantidad, rendimiento y costos.

Imagen 35: Información relacionada con el análisis unitario de las actividades.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Actividad	Cod_insumo	Cantidad de insumo	Rendimiento	Costo herramienta usada por obra	Costo ordinario por actividad	Costo ordinario maquinaria por actividad	
2	1	44	1.10	1.10				
3	1	375		2.00	760.00			
4	1	133		4.82		7147.00		
5	1	295	0.25	0.25				
6	1	39	0.85	0.85				
7	1	37	0.0033	0.0033				
8	1	30	0.16	0.16				
9	1	38		4.82			1200	
10	1	40		4.82			1000	
11	1	342	0.61	0.61				
12	1	4	4.38	4.38				
13	2	295	1.00	1.00				
14	2	1031	0.07	0.07				
15	2	375		0.50	600.00			
16	2	133		2.59		5000.00		
17	3	1031	0.06	0.06				
18	3	306	148.00	148.00				
19	3	455	0.11	0.11				
20	3	5	1.00	1.00				
21	3	375		1.00	300.00			
22	3	133		0.13		60024.01		
23	4	3	1.03	1.03				
24	4	35	0.08	0.08				
25	4	1031	0.04	0.04				
26	4	375		1.00	300.00			
27	4	133		0.65		6002.40		
28	5	1031	0.02	0.02				
29	5	342	3.00	3.00				

Dónde:

- Columna A: indica la actividad a la cual pertenece el insumo
- Columna B: indica el código del insumo que se usa en la actividad
- Columna C: indica la cantidad de insumo necesario, para el caso de materiales
- Columna D: indica el rendimiento del insumo para herramienta, mano de obra y equipo. Para el caso de materiales toma el mismo valor que se encuentra en la columna C

- Columna E: Es el costo que implica el uso de herramienta por cuadrilla de trabajo para la actividad
- Columna F: Costo de mano de obra por realización de la actividad en tiempo ordinario
- Columna G: Costo de equipo por realización de la actividad en tiempo ordinario

2.5.2 Costos indirectos

Son los costos generados cada periodo (en este caso mensualmente) por los gastos de administración.

$$\text{Gastos Administrativos} = \$ 13'300.000$$

El detalle de los gastos administrativos para el experimento controlado y para los demás proyectos estudiados en este trabajo de grado se puede ver en el ANEXO 2.

2.6 PROGRAMACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO

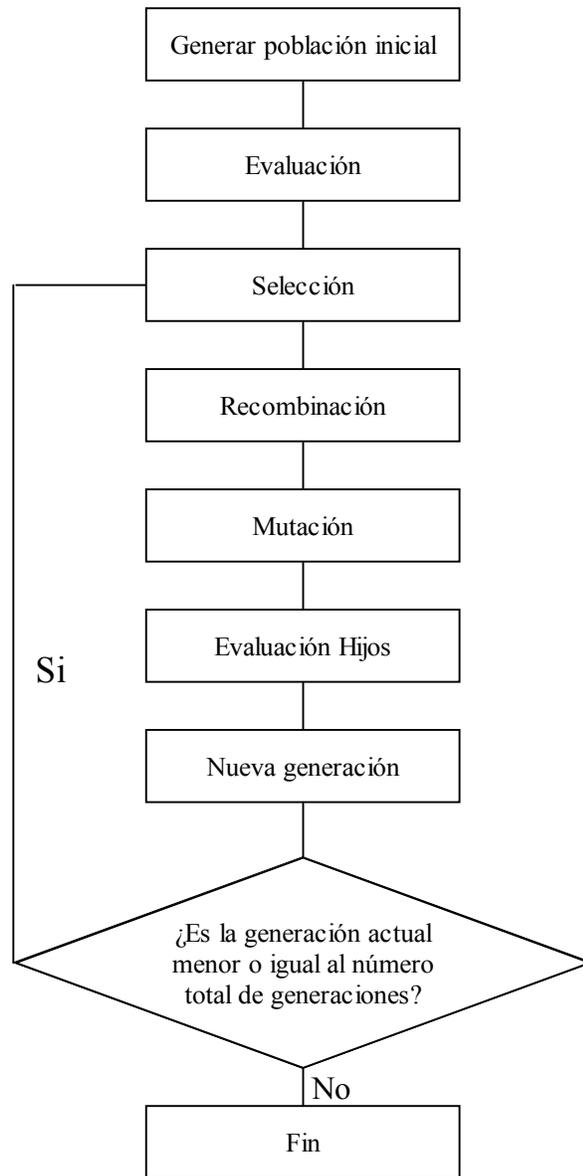
Como se mencionó en la sección 1.2, existen diversos operadores que pueden ser usados en los algoritmos genéticos. En esta sección se mencionarán y explicarán los operadores que fueron programados para este trabajo de grado, y además se ilustrará cada uno de estos con un experimento controlado, el cual consta de 6 actividades y es un proyecto para la adecuación y pavimentación de lotes de 540 m². En esta explicación se trabajó con un tamaño de población de 5 cromosomas y 10 hijos por generación.

El uso y análisis del experimento controlado se realizó con el fin de comprender mejor los operadores programados y validarlos.

El algoritmo fue programado en lenguaje Visual Basic y Microsoft Excel, debido a la necesidad de definir las características del proyecto como información de entrada al programa, características que, como se explica en la sección 2.5, se encuentran clasificadas en una hoja de Excel. Además este Software, en el ámbito de la ingeniería civil, para cualquiera de sus áreas, es de común uso y de fácil acceso, haciéndolo una alternativa muy atractiva y práctica.

El diagrama de flujo del programa se puede observar en la Imagen 36. A continuación se explica su funcionamiento y las diferentes alternativas para cada operador.

Imagen 36: Diagrama de flujo del algoritmo genético



2.6.1 Generación de la población inicial

El tamaño de la población, es decir, la cantidad de cromosomas que serán escogidos en cada generación para convertirse en padres, será definido por el usuario. Pero para el primer ciclo o generación del algoritmo, los padres deben ser creados en la hoja “Población”, la cuál contiene un individuo por cada columna a partir de la tercera fila. Las dos primeras filas son espacios reservados para el valor de adaptación de cada cromosoma.

Se escogieron tres alternativas para este operador:

2.6.1.2 Población inicial aleatoria

Para este caso, los alelos del cromosoma son ocupados por valores aleatorios, pero teniendo cuidado de no sobrepasar los límites establecidos en las características de las actividades para sus duraciones y los retrasos (Imagen 32). La población generada para el experimento controlado se observa en la Imagen 37.

Imagen 37: Población inicial aleatoria

	A	B	C	D	E
1					
2					
3	16	10	17	18	10
4	9	3	4	3	7
5	21	21	30	23	26
6	0	9	2	9	3
7	5	4	5	5	4
8	2	6	8	0	4
9	15	11	12	10	10
10	6	4	3	5	6
11	12	16	20	17	11
12	5	5	7	8	6
13	1	1	1	1	1
14	4	4	6	9	6
15					

Al comparar la Imagen 32 con la Imagen 37 se puede afirmar que las duraciones y los retrasos generados aleatoriamente se encuentran dentro de los rangos establecidos

2.6.1.2 Población inicial retraso 0

Para este caso, los alelos del cromosoma que representan duración son ocupados por valores aleatorios, teniendo cuidado de no sobrepasar los límites establecidos en las características de las actividades (Imagen 32), todos los retrasos que sean generados tendrán un valor de cero, con el fin de tener la posibilidad de estudiar comportamientos cuando no existe holgura entre actividades. La población generada para el experimento controlado en este caso se observa en la Imagen 38.

Imagen 38: Población inicial aleatoria retraso 0

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3	8	17	16	20	19	
4	0	0	0	0	0	
5	21	23	19	17	26	
6	0	0	0	0	0	
7	5	4	4	5	3	
8	0	0	0	0	0	
9	15	11	9	12	12	
10	0	0	0	0	0	
11	16	17	17	13	20	
12	0	0	0	0	0	
13	1	1	1	1	1	
14	0	0	0	0	0	
15						
16						
17						

Al comparar la Imagen 32 con la Imagen 38 se puede afirmar que las duraciones generadas aleatoriamente se encuentran dentro de los rangos establecidos, además que todos los retrasos tienen valor cero.

2.6.1.3 Población inicial mejores anteriores

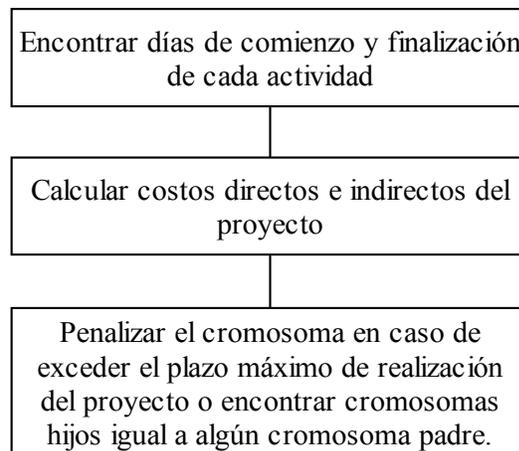
Cada vez que el programa se corre, al final del ciclo, es decir cuando se ha completado el número total de generaciones, se identifica el mejor cromosoma y se almacena en una sección especial que tiene como fin recopilar buenas soluciones y poder crear poblaciones iniciales a partir de resultados previos, teniendo la oportunidad de analizar nuevos espacios de soluciones partiendo de soluciones no aleatorias.

Esta alternativa escoge al azar un número de padres igual al tamaño de población desde la hoja de almacenamiento de resultados históricos. En caso de no existir un número suficiente de cromosomas históricos, se completa la diferencia con cromosomas aleatorios.

2.6.2 Evaluación de cromosomas

Esta función evalúa el valor de aptitud de los cromosomas, siguiendo 3 pasos básicos de la siguiente manera:

Imagen 39: Diagrama de flujo general para evaluación de valor de aptitud

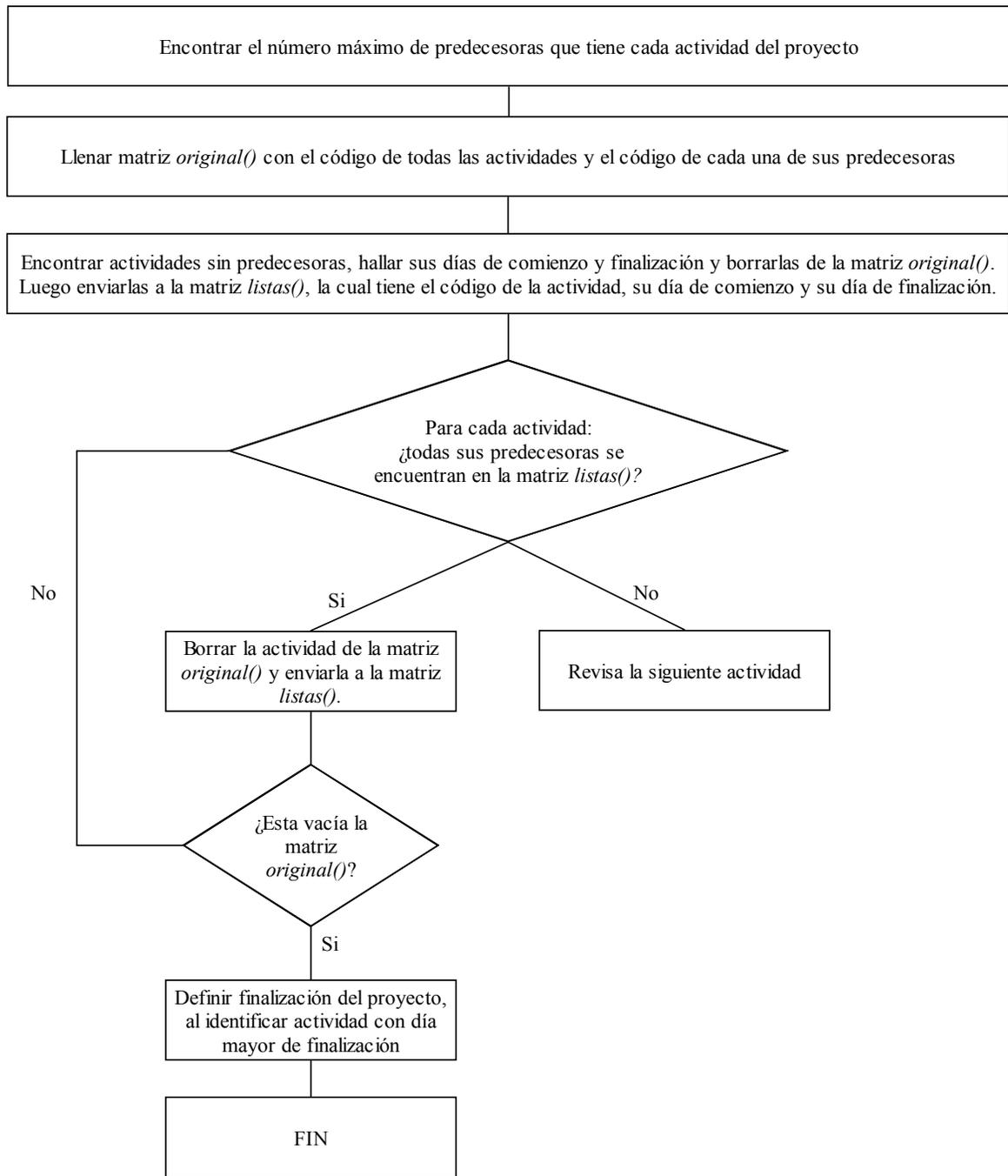


2.6.2.1 Calculo de costos

Cada uno de estos pasos sigue los siguientes procedimientos:

2.6.2.1.1 Días de comienzo y finalización

Imagen 40: Diagrama de flujo para días de comienzo y finalización

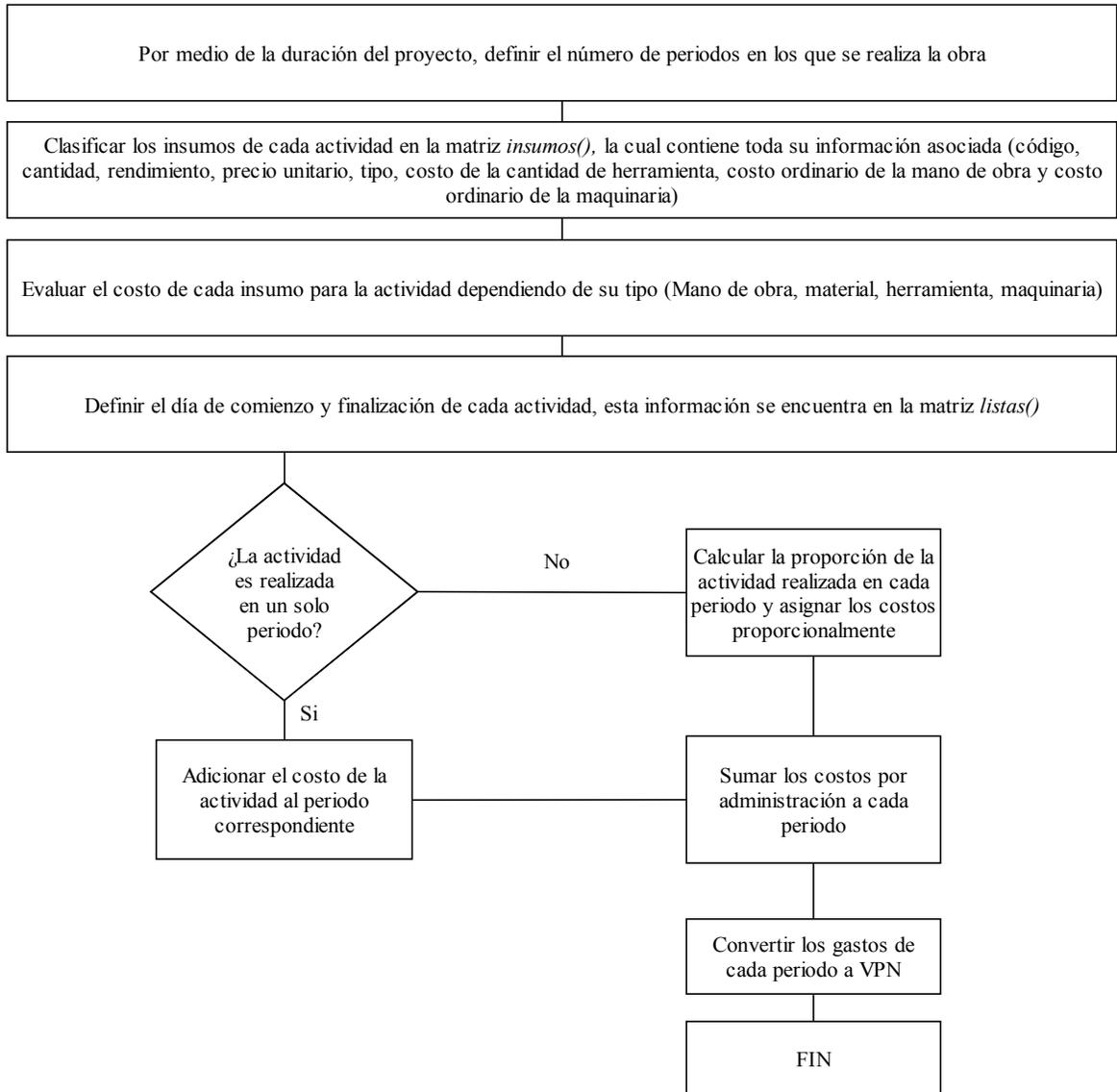


Este procedimiento es muy importante, ya que se debe identificar en que periodo o periodos, para este caso meses, se esta realizando la actividad, para asignar su costo directo al espacio de tiempo correspondiente y poder trasladarlos a VPN.

Además al buscar en la matriz *listas ()* el día de finalización más tardío, se puede identificar la terminación del proyecto, dato que será importante para el análisis de la solución encontrada.

2.6.2.1.2 Costos directos e indirectos del proyecto

Imagen 41: Diagrama de flujo para cálculo de costos directos e indirectos



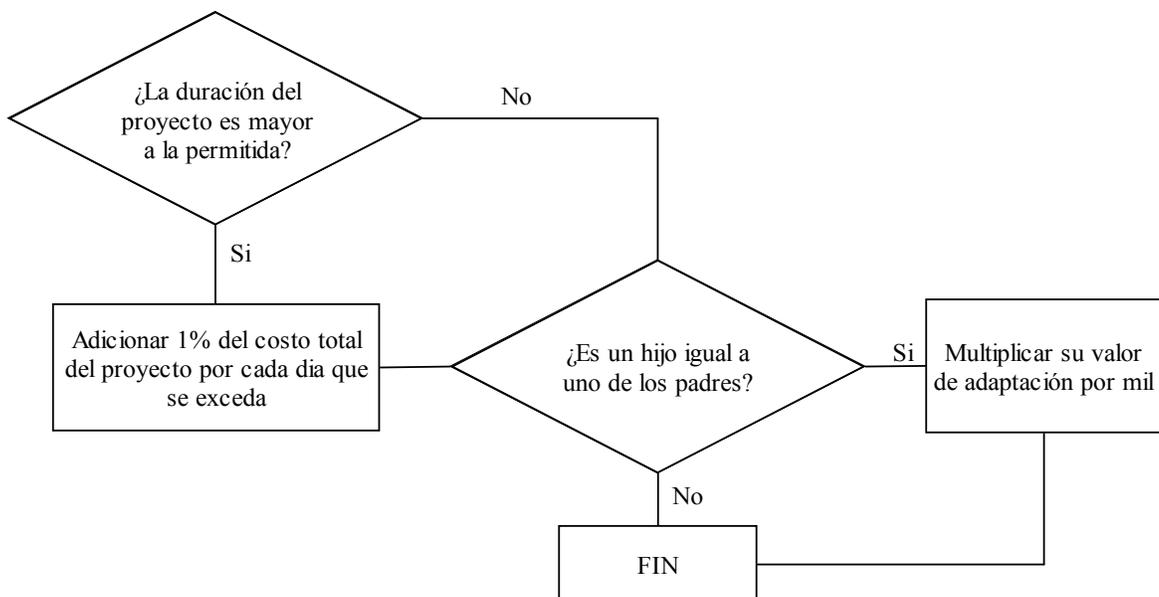
2.6.2.1.3 Penalizaciones

Existen dos tipos de penalizaciones para los individuos de la población:

Cuando un hijo es igual a un padre, se corre el riesgo de que éste individuo se adueñe de la población, es decir, cada vez que se generan cromosomas iguales, se multiplica la probabilidad de que éste sea escogido ya que su presencia es cada vez mayor. El problema puede ser evitado al penalizar los hijos que sean iguales a los padres, para hacerlos indeseables en la selección de la nueva generación. Se penalizará multiplicando el valor de la función objetivo por mil.

Cuando se firma un contrato de construcción existe un compromiso en la fecha de entrega de la obra. Si esta fecha es excedida, suele cobrarse un uno por ciento del valor del contrato por cada día de retraso. Para el caso de este trabajo de grado, se definió el plazo máximo de cada proyecto, con el fin de aplicar las sanciones en la eventualidad de excederlo.

Imagen 42: Diagrama de flujo para penalizaciones



2.6.2.2 Validación del cálculo de la función objetivo

Para la validación del algoritmo se continuará trabajando con el experimento controlado. Tomando un individuo cualquiera, se calculó su valor de adaptación manualmente y por medio del Macro, esperando los mismos resultados.

El cromosoma escogido para la validación con su costo hallado por medio del macro se encuentra en la Imagen 43

Imagen 43: Cromosoma experimento controlado

\$ 212,247,743
11
5
22
1
4
0
10
5
16
4
1
8

Las características definidas para su cálculo fueron las siguientes:

Imagen 44: Características para cálculo

Característica	Valor
Días que tiene un periodo	26
Plazo máximo del proyecto	52
Costo de administración por periodo	\$13,300,000
Tasa de oportunidad del inversionista	5%

Con la información del cromosoma de la Imagen 43, y las relaciones de precedencia de la Imagen 33 se calculó el día de comienzo y finalización de cada actividad de la siguiente manera:

Imagen 45: Días de comienzo y finalización de las actividades

Actividad	Duración	Retraso	Actividad predecesora	Finalización actividad predecesora	Comienzo	Final
1	11	5	3	19	25	35
2	22	1	1	35	37	58
3	4	0	4	15	16	19
4	10	5	0	-	6	15
5	16	4	2	58	63	78
6	1	8	5	78	87	87

Como se puede observar, aunque la actividad 4 no tenga predecesoras, su realización comienza el día 6, debido a los 5 días de retraso generados en el cromosoma.

La fecha de finalización para este proyecto es el día 87, en el cual finaliza la última actividad (actividad 6). Sabiendo esto, y el número de días que tiene un periodo, se puede calcular la cantidad de periodos en las que se realiza el proyecto:

$$\frac{87}{26} = 3.34 \approx 4 \text{ meses} \qquad \text{Ecuación 27}$$

Los costos por cada una de las actividades, se calcularon por medio de las ecuaciones encontradas en la sección 2.3 y la información del proyecto que se presenta en el ANEXO

1. A continuación se indican los resultados:

Imagen 46: Costos directos generados para cada actividad

Costo	Actividad					
	1	2	3	4	5	6
Mano de obra	\$ 4,901,912	\$ 1,867,500	\$ 230,492	\$ 414,165	\$ 780,200	\$ 20,000
Materiales	\$ 32,034,318	\$ 9,450,977	\$ 918,206	\$ 2,637,210	\$ 63,728,993	\$ 4,979,400
Equipo	\$ 1,508,760	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Herramienta	\$ 521,208	\$ 224,100	\$ 1,152	\$ 20,700	\$ 234,060	\$ 600
Total	\$ 38,966,198	\$ 11,542,577	\$ 1,149,850	\$ 3,072,075	\$ 64,743,253	\$ 5,000,000
Mes 1 directos	\$ 7,013,825	\$ 0	\$ 1,149,850	\$ 3,072,075	\$ 0	\$ 0
Mes 2 directos	\$ 31,951,872	\$ 8,310,655	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Mes 3 directos	\$ 0	\$ 3,231,921	\$ 0	\$ 0	\$ 64,743,253	\$ 0
Mes 4 directos	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 5,000,000

Imagen 47: Costos totales generados para cada actividad

	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Costos directos	\$ 11,235,750	\$ 40,262,527	\$ 67,975,174	\$ 5,000,000
Costos indirectos	\$ 13,300,000	\$ 13,300,000	\$ 13,300,000	\$ 13,300,000
Total	\$ 24,535,750	\$ 53,562,527	\$ 81,275,174	\$ 18,300,000

Al trasladar todos los valores generados a VPN con un índice de oportunidad del 5% se obtiene.

VPN	\$ 157,220,000
-----	----------------

Como el plazo máximo de finalización del proyecto es de 52 días y el cromosoma evaluado tiene una duración de 87 días, se debe penalizar el individuo por los 35 días que se excede, aumentando el valor del VPN un 35%.

VPN	\$ 212,247,000
-----	----------------

Como se puede observar, el VPN hallado manualmente concuerda con el encontrado por medio del Macro. Para la información detallada sobre el cálculo del VPN en el experimento controlado observar el ANEXO 3.

2.6.3 Selección

Este operador es el encargado de seleccionar los cromosomas que se convertirán en padres, fundamentado básicamente en el valor de la función de adaptación de cada uno de los individuos.

Se programaron cuatro distintas opciones para el operador. Cada una de estas elige un número de individuos para convertirse en padres y ubica su identificación (columna en la que se encuentra el cromosoma en la hoja “Población”) en la primera columna de la hoja “Pob_intermedia”, como se muestra en la siguiente imagen:

Imagen 48: Selección de los padres

	A	B	C	D	E
1	2				
2	5				
3	4				
4	2				
5	1				
6	4				
7	5				
8	2				
9	4				
10	1				
11	2				
12	4				
13	3				
14	2				
15	4				
16	5				
17	1				
18	4				
19	2				
20	1				
21	5				
22	4				
23					
24					
25					
26					
27					
28					

Como se puede observar, el primer padre se encuentra en la segunda columna de la hoja “Población”, el segundo padre se encuentra en la quinta columna de la hoja “Población” y así sucesivamente hasta completar todos los padres. Hay que tener en cuenta que no se pueden elegir dos padres iguales seguidos, ya que al recombinarlos, el hijo será igual al padre, caso que no es deseable para evitar que este individuo se adueñe de la población.

El número de padres elegidos depende del número de hijos, el tipo de recombinación y el número de hijos por recombinación que se elijan. La explicación detallada sobre este tema se encuentra en la sección 2.6.4.

2.6.3.1 Selección aleatoria

Conociendo el tamaño de la población, se generan números aleatorios entre uno y el tamaño de la población para elegir el padre. Una vez elegido, su posición será enviada a la hoja “Pob_intermedia”.

2.6.3.2 Selección por torneo

En este tipo de selección se eligen dos individuos de la hoja “Población” aleatoriamente y se comparan sus valores de aptitud, el mejor de ellos se convierte en padre y su posición es enviada a la hoja “Pob_intermedia”.

2.6.3.3 Selección proporcional

Según el valor de adaptación del individuo, a este se le asigna una porción entre 0 y 1, definida respecto a la sumatoria total de los valores de adaptación de todos los individuos encontrados en la hoja “Población”. Es decir, para un individuo con un valor en la función objetivo más bajo que el resto de la población, su porción será más grande (ya que son más deseables los cromosomas con costos bajos debido a la finalidad del problema). Luego se genera un número aleatorio entre 0 y 1 para elegir al padre, cuya posición se enviará a la

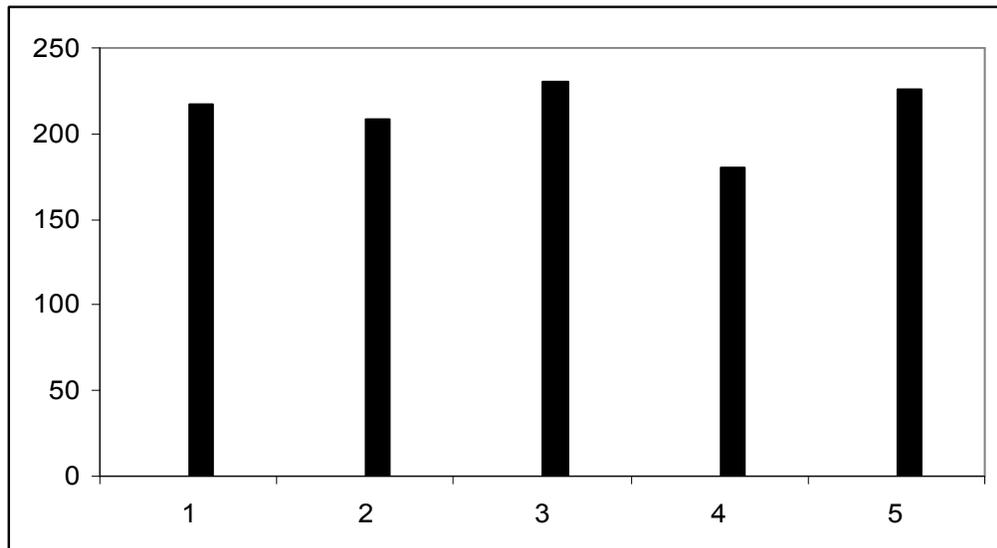
hoja “Pob_intermedia”, teniendo mayor probabilidad de ser escogido el individuo que tenga una mayor porción del rango, es decir, el que tenga un menor costo.

2.6.3.4 Selección escalonada

Esta opción es muy similar a la selección proporcional, con la diferencia que los valores de adaptación de los individuos de la población son corregidos de la siguiente manera:

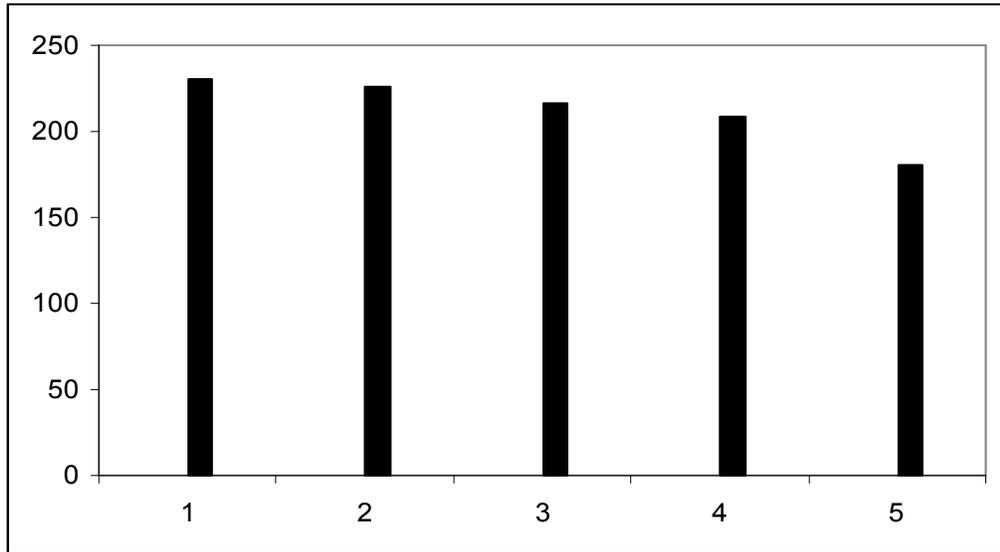
- Para la población que se muestra:

Imagen 49: Población sin ordenar



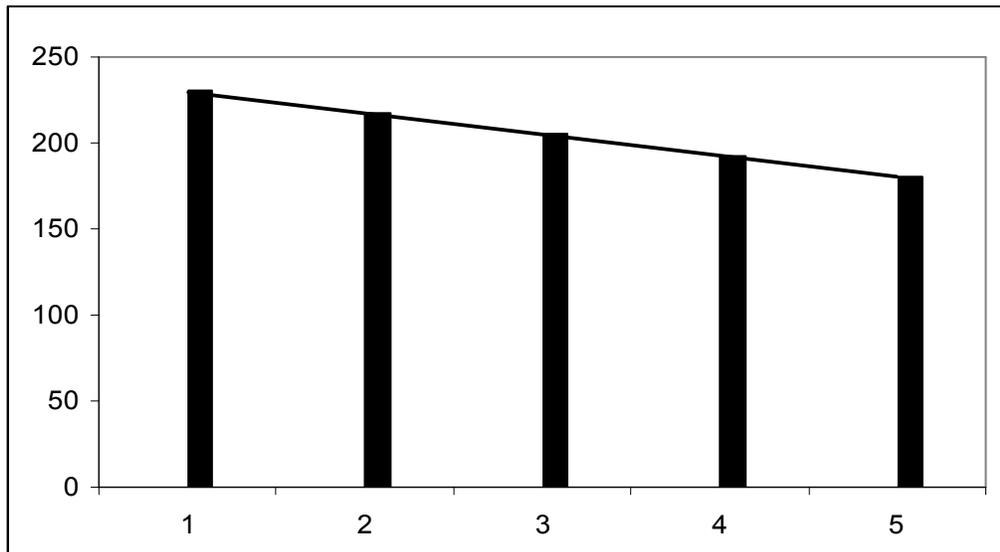
- Se ordenan los individuos de la población de mejor a peor:

Imagen 50: Población ordenada de mejor a peor



- Se define una línea imaginaria entre el mejor y el peor individuo y luego se ajustan los cromosomas intermedios a esta línea de tendencia.

Imagen 51: Población con valores de adaptación corregidas



Al tener la población con los valores de adaptación corregidos, se sigue el procedimiento explicado en la selección proporcional (sección 2.6.3.3).

Esta opción es muy útil ya que “uniforma” la población, es decir, en el caso de que exista un individuo muy bueno, este no se adueñará de la mayoría del rango entre 0 y 1, sino que se corregirá el resto de los individuos para que estos tengan una probabilidad más alta de reproducirse, sin llegar a exceder al mejor individuo.

2.6.4 Recombinación

Luego de haber elegido los padres, se generan los hijos por medio de una de las tres opciones que se programaron. Por cada grupo de padres que se escoge para recombinar, se pueden generar máximo el mismo número de hijos, entonces, si se escogen dos padres, podrían generarse uno o dos hijos, y si se escogen tres padres pueden generarse uno, dos o tres hijos, teniendo en cuenta que el punto de recombinación será diferente para cada uno de ellos. Esta cantidad de hijos se denominó como hijos por recombinación

Sabiendo esto, se puede calcular el número de padres que deben ser elegidos para generar descendencia en función del número de hijos y el número de hijos por recombinación por medio de la siguiente expresión:

$$P = \left(\frac{NH}{NHR} + 1 \right) * NP \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

P: Cantidad total de padres

NH: Número de hijos en la población

NHR: Número de hijos por recombinación

NP: Número de padres por recombinación

2.6.4.1 Recombinación con dos padres y un punto

En esta opción se escogen dos padres y un punto de cruce para generar uno o dos hijos dependiendo de la elección del usuario. La Imagen 52, tomada de individuos del experimento controlado puede ayudar a entender mejor este operador

Imagen 52: Recombinación dos padres un punto

P1	P2	H1	H2
18	9	18	9
7	6	7	6
17	17	17	17
4	5	5	5
3	4	4	4
5	5	5	5
10	8	8	10
3	5	5	3
14	15	15	14
3	2	2	3
1	1	1	1
8	6	6	8

Donde H1 tiene la cabeza de P1 y la cola de P2 y H2 tiene la cabeza de P2 y la cola de P1.

En el caso de elegir un hijo por recombinación, el cromosoma resultante tendrá la forma mostrada en H1 en la Imagen 52. En caso de elegir dos hijos por recombinación, se generarán cromosomas con la forma H1 y H2 de la Imagen 52.

2.6.4.2 Recombinación con dos padres y dos puntos

En esta opción se escogen dos padres y dos puntos de cruce para generar uno o dos hijos dependiendo de la elección del usuario. La Imagen 53, tomada de individuos del experimento controlado puede ayudar a entender mejor este operador

Imagen 53: Recombinación dos padres dos puntos

P1	P2	H1	H2
18	9	18	9
7	6	7	6
17	17	17	17
4	5	4	4
3	4	4	3
5	5	5	5
10	8	8	10
3	5	5	3
14	15	15	14
3	2	2	3
1	1	1	1
8	6	8	6

Donde H1 tiene la cabeza y la cola de P1 y el cuerpo de P2 y H2 tiene la cabeza y la cola de P2 y el cuerpo de P1

En el caso de elegir un hijo por recombinación, el cromosoma resultante tendrá la forma mostrada en H1 en la Imagen 53. En caso de elegir dos hijos por recombinación, se generarán cromosomas con la forma H1 y H2 de la Imagen 53

2.6.4.3 Recombinación con tres padres y dos puntos

En esta opción se escogen tres padres y dos puntos de cruce para generar uno, dos o tres hijos dependiendo de la elección del usuario. La Imagen 54, tomada de individuos del experimento controlado puede ayudar a entender mejor este operador

Imagen 54: Recombinación tres padres dos puntos

P1	P2	P3	H1	H2	H3
18	9	17	18	17	9
7	6	1	7	1	6
17	17	23	17	23	17
4	5	0	5	0	5
3	4	4	4	3	4
5	5	8	5	5	8
10	8	13	13	10	13
3	5	9	9	3	9
14	15	19	19	15	14
3	2	6	6	2	3
1	1	1	1	1	1
8	6	3	3	6	8

Donde H1 tiene la cabeza de P1, el cuerpo de P2 y la cola de P3, H2 tiene la cabeza de P3, el cuerpo de P1 y la cola de P2 y H3 tiene la cabeza de P2, el cuerpo de P3 y la cola de P1

En el caso de elegir un hijo por recombinación, el cromosoma resultante tendrá la forma mostrada en H1 en la Imagen 54. En caso de elegir dos hijos por recombinación, se generarán cromosomas con la forma H1 y H2 de la Imagen 54 y en caso de elegir tres hijos por recombinación se tendrán cromosomas con la forma H1, H2 y H3 de la Imagen 54.

2.6.5 Mutación

Este es un operador que es aplicado a los hijos de cada generación (“Pob_intermedia”) y es muy importante para generar diversidad en la población y evitar una convergencia temprana a soluciones locales. Se programaron los siguientes tres métodos para la mutación:

2.6.5.1 Mutación aleatoria

Por medio de esta mutación se cambia aleatoriamente alelos del cromosoma, teniendo en cuenta que el nuevo valor del alelo se encuentre dentro del rango definido en la hoja “Actividades”.

El número de mutaciones que habrá en una generación (ecuación 26), depende de la cantidad de alelos de la población y el porcentaje de mutación que defina el usuario.

$$\text{Cant.Mutaciones} = \text{Hijos} * \text{Actividades} * 2 * \% \text{Mutación} \qquad \text{Ecuación 29}$$

Donde:

Hijos: Cantidad de cromosomas en Pob_intermedia

Actividades: Cantidad de actividades del proyecto

% Mutación: Porcentaje de la población de los hijos que el usuario desea mutar.

En la Imagen 55, se observa una población de diez hijos del experimento controlado, es decir 120 alelos. Para un porcentaje de mutación del 5% habrá cambios en 6 alelos de la población (alelos rojos, Imagen 56)

Imagen 55: Población de hijos en experimento controlado

15	12	15	12	16	15	16	15	12	15
0	3	0	3	0	0	0	0	3	0
11	10	11	10	11	11	11	11	10	11
3	6	4	6	4	3	4	3	6	3
5	5	5	5	3	3	5	3	5	5
5	6	5	6	3	3	5	3	6	6
12	11	12	11	11	11	11	8	12	11
7	2	7	2	2	2	2	6	7	5
13	10	13	10	14	15	14	15	10	13
6	3	6	3	5	6	5	6	3	6
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	6	0	6	3	6	3	6	3	6

Imagen 56: Población de hijos mutados en experimento controlado

15	12	15	12	16	15	16	15	12	15
0	3	0	2	0	0	0	0	3	0
11	10	11	10	11	11	11	11	10	11
3	6	4	6	4	3	4	3	6	3
5	4	5	5	3	3	5	3	5	5
5	7	5	6	3	3	5	3	6	6
12	11	12	11	11	11	11	8	12	11
7	2	7	2	2	2	2	6	7	5
13	10	13	10	14	15	14	15	10	13
7	3	6	3	5	6	5	6	3	6
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	6	0	6	3	7	3	6	3	4

2.6.5.2 Mutación incremento decremento

Este método es muy similar a la mutación aleatoria; el número de mutaciones también se calcula como se explica en la ecuación 26. La diferencia radica en que el alelo elegido para ser mutado en el caso aleatorio, cambiaba dentro de un rango establecido mientras que en este se suma o resta una unidad al valor original del alelo.

2.6.5.3 Mutación Variable

Para este caso, se definen porcentajes de mutación mínimo y máximo, con el fin de que a medida que pasen las generaciones aumenten los cambios en la población, basados en que para las últimas generaciones son necesarios porcentajes más altos de mutación para evitar convergencia a un óptimo local.

La expresión que define la cantidad de cambios por mutación se muestra a continuación:

$$Cant.mutaciones = \%mín * 100 + ((\%máx - \%mín) * generación) \quad \text{Ecuación 30}$$

Dónde:

%mín: Porcentaje mínimo de mutación definido por el usuario

%máx: Porcentaje máximo de mutación definido por el usuario

Generación: Generación actual

El cambio que se realiza en el alelo seleccionado es aleatorio, teniendo en cuenta que no se salga de los rangos establecidos en la hoja “Actividades”

2.6.6. Nueva población

Este es el operador que selecciona cuales individuos pasarán a la siguiente generación, fundamentado básicamente en el valor de adaptación de estos. Se programaron dos métodos para esta acción:

2.6.6.1 Mejores padres e hijos

En esta opción, se seleccionan y ordenan los mejores padres y los mejores hijos de la generación que esté terminando, y pasa a la siguiente generación una cantidad igual al tamaño de la población, de los mejores individuos escogidos

2.6.6.2 Elitismo

Por medio de éste, se garantiza que siempre sobreviva en porcentaje de los padres, el cual es definido por el usuario. Al final de cada generación se revisa la cantidad de padres (los mejores) que pasarán a la siguiente generación por medio del porcentaje de mutación, y se completa el resto del tamaño de la población con los mejores hijos.

2.6.7 Experimento controlado

Para comprobar que el algoritmo genético esta cumpliendo con su función, se ejecutó el macro con la información del experimento controlado que ha sido mencionado anteriormente, sobre el cual se puede realizar un análisis para determinar si los resultados arrojados son realistas o si se acercan a la solución esperada.

El número de combinaciones posibles para el experimento controlado, será calculado según la siguiente ecuación:

$$\prod_{\forall a} d_a * r_a$$

Donde:

da: Duraciones posibles de la actividad a

ra: Retrasos posibles para actividad a

A: {1,2,...,6} número de actividades del proyecto

Al aplicarla se encuentra que el número de posibilidades de combinación existentes para una búsqueda exhaustiva es:

$$\text{Número de posibilidades: } 7.2 * 10^{10}$$

Como tomaría una gran cantidad de tiempo realizar la evaluación de cada una de las posibilidades, se trabajó el algoritmo genético con una población de 25 padres y 50 hijos para 30 generaciones, analizando un máximo de 2250 posibilidades o menos, para encontrar una solución al proyecto

La configuración con la que se ejecutó el algoritmo genético se muestra a continuación:

Imagen 57: Características ejecución experimento controlado

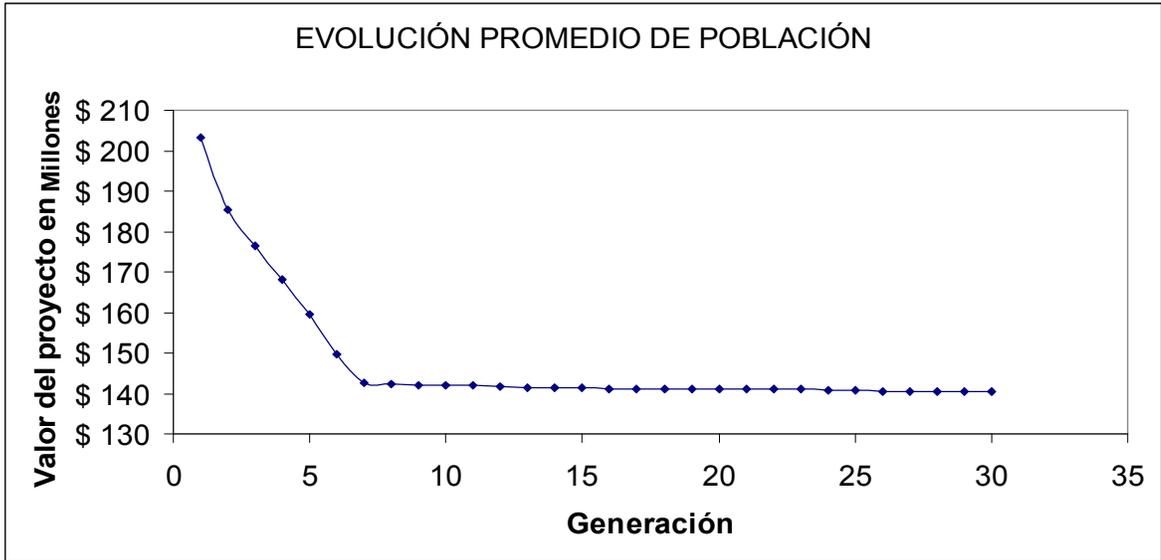
EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Cantidad de Hijos por Recombinación:	1
Porcentaje de Mutación:	5%
Días que tiene un periodo	26
Límite de duración de la obra	52 días
Costo administración por periodo	\$13'300.000
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Proporcional
Método de Recombinación:	3 Padres 2 Puntos
Método de Mutación:	Incremento-decremento
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos
Generación de la Población Inicial:	Aleatorio

Se realizaron tres ejecuciones con estas características (imagen 58) y se promediaron los resultados del promedio de la función de adaptación para cada generación, obteniendo la siguiente curva (imagen 59):

Imagen 58: ejecuciones del algoritmo genético para experimento controlado

	Adaptaciones promedio en las corridas			
	1	2	3	Promedio
1	\$ 204,447,664	\$ 200,111,008	\$ 203,349,296	\$ 202,635,989
2	\$ 186,371,456	\$ 176,581,760	\$ 185,485,552	\$ 182,812,923
3	\$ 170,810,112	\$ 167,538,752	\$ 176,334,176	\$ 171,561,013
4	\$ 164,956,032	\$ 159,995,584	\$ 168,098,208	\$ 164,349,941
5	\$ 160,984,368	\$ 155,450,352	\$ 159,395,872	\$ 158,610,197
6	\$ 158,856,432	\$ 147,026,624	\$ 149,744,512	\$ 151,875,856
7	\$ 156,293,504	\$ 142,721,776	\$ 142,636,592	\$ 147,217,291
8	\$ 152,017,808	\$ 142,291,584	\$ 142,261,696	\$ 145,523,696
9	\$ 142,740,784	\$ 142,041,824	\$ 142,147,568	\$ 142,310,059
10	\$ 142,144,384	\$ 141,706,800	\$ 142,030,976	\$ 141,960,720
11	\$ 142,005,856	\$ 141,578,688	\$ 141,899,936	\$ 141,828,160
12	\$ 141,910,800	\$ 141,440,704	\$ 141,727,840	\$ 141,693,115
13	\$ 141,736,544	\$ 141,201,936	\$ 141,445,136	\$ 141,461,205
14	\$ 141,544,880	\$ 141,084,368	\$ 141,328,128	\$ 141,319,125
15	\$ 141,397,744	\$ 141,000,912	\$ 141,253,232	\$ 141,217,296
16	\$ 141,219,568	\$ 140,886,720	\$ 141,212,880	\$ 141,106,389
17	\$ 141,030,560	\$ 140,805,168	\$ 141,212,880	\$ 141,016,203
18	\$ 140,926,416	\$ 140,776,432	\$ 141,212,880	\$ 140,971,909
19	\$ 140,807,920	\$ 140,758,912	\$ 141,211,520	\$ 140,926,117
20	\$ 140,696,512	\$ 140,735,168	\$ 141,208,784	\$ 140,880,155
21	\$ 140,589,120	\$ 140,688,432	\$ 141,184,944	\$ 140,820,832
22	\$ 140,467,072	\$ 140,655,264	\$ 141,139,760	\$ 140,754,032
23	\$ 140,329,024	\$ 140,630,064	\$ 141,057,856	\$ 140,672,315
24	\$ 140,227,088	\$ 140,565,904	\$ 140,870,384	\$ 140,554,459
25	\$ 140,141,296	\$ 140,544,304	\$ 140,618,816	\$ 140,434,805
26	\$ 140,040,320	\$ 140,478,768	\$ 140,548,896	\$ 140,355,995
27	\$ 139,938,000	\$ 140,357,552	\$ 140,470,768	\$ 140,255,440
28	\$ 139,870,192	\$ 140,170,592	\$ 140,406,784	\$ 140,149,189
29	\$ 139,842,768	\$ 140,139,824	\$ 140,406,784	\$ 140,129,792
30	\$ 139,827,792	\$ 140,096,064	\$ 140,406,784	\$ 140,110,213

Imagen 59: Evolución promedio de la población



Donde los valores presentes netos mínimos, las duraciones del proyecto y los cromosomas correspondientes para cada una de las ejecuciones fueron:

Imagen 60: VPN mínimo encontrado en cada ejecución del experimento controlado

	Ejecución 1	Ejecución 2	Ejecución 3
VPN mínimo	\$ 139,516,873	\$ 139,764,342	\$ 140,035,166
Duración (días)	52	52	52
Mejores cromosomas de cada ejecución	15	14	13
	0	0	0
	13	14	15
	0	0	0
	4	3	3
	0	0	0
	9	10	9
	0	0	0
	10	10	11
	0	0	0
	1	1	1
	0	0	0

Como se puede observar, el valor mínimo hallado para cada una de las ejecuciones es muy similar, pero la característica destacada, para asegurar que el algoritmo genético está funcionando correctamente es que las poblaciones que inicialmente fueron creadas

aleatoriamente, tienden a buscar soluciones de proyectos con duraciones que no excedan el límite de tiempo permitido, preferiblemente iguales o muy cercanas a éste (Imagen 57 e Imagen 60), esto lo logran al llevar los alelos de duraciones a un valor de cero días y prolongar las duraciones de las actividades lo máximo posible, sin que la programación exceda el plazo.

La explicación de este comportamiento es que, como los retrasos de las actividades son cero, estas podrán ser realizadas tan pronto terminen sus predecesoras, permitiendo asignar duraciones un poco más prolongadas de una actividad (observar Imagen 60 y anexo 1), disminuyendo de esta manera los costos directos del proyecto, pero teniendo en cuenta no exceder su límite de tiempo o no pasar al siguiente periodo para evitar un gasto adicional por administración.

A manera de ejemplo para el análisis se escogerá el primer cromosoma de la Imagen 60 y se realizarán variaciones en las duraciones de algunos sus alelos de duración (identificados por color rojo) para observar como estos cambios influyen en el costo final:

Imagen 61: Análisis de duraciones para un cromosoma solución

\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$	\$
139,516,873	151,903,162	139,965,399	152,063,896	139,787,122	152,139,207	139,704,590	152,139,150	139,685,510	152,163,062
15	16	14	15	15	15	15	15	15	15
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	13	13	14	12	13	13	13	13	13
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	4	4	4	4	5	3	4	4	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	9	9	9	9	9	9	10	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	10	10	10	10	10	10	10	10	11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cromosoma Original	Cromosoma 1	Cromosoma 2	Cromosoma 3	Cromosoma 4	Cromosoma 5	Cromosoma 6	Cromosoma 7	Cromosoma 8	Cromosoma 9

Se realizaron cambios incrementando y disminuyendo en una unidad las duraciones encontradas en el cromosoma original, observando que ninguno de estos cambios hace que los individuos mejoren el valor de aptitud hallado originalmente, las razones son:

- Para el caso en que se aumenta una unidad, aunque los costos directos de la actividad disminuyen, la duración del proyecto excede el límite establecido, generando penalización.
- Para el caso en que se disminuye la duración, los costos directos de la actividad aumentan, generando un aumento en el valor total del proyecto.

Para confirmar las afirmaciones realizadas anteriormente, se ejecutó de nuevo el algoritmo, pero esta vez variando el número de generaciones, esperando que el mejor cromosoma hallado al final de cada ejecución tenga como característica principal una duración de proyecto que llegue hasta el límite del plazo pero sin excederlo, sin importar las combinaciones de duraciones de cada actividad. Los resultados fueron los siguientes:

Número de generaciones	Duración del proyecto (días)	Valor del proyecto para el mejor cromosoma
10	52	\$140'643,827
20	52	\$140'041,379
30	52	\$139'734,213
40	52	\$139'566,437
50	52	\$139'547,458

Como se puede observar, las duraciones esperadas para el proyecto en el mejor individuo se cumplieron, siendo esta de 59 días. Vale la pena anotar que aunque estos individuos tienen en común su duración, los valores del proyecto son menores a medida que aumentan las generaciones, es decir que el algoritmo mejora los individuos a medida que pasan las poblaciones.

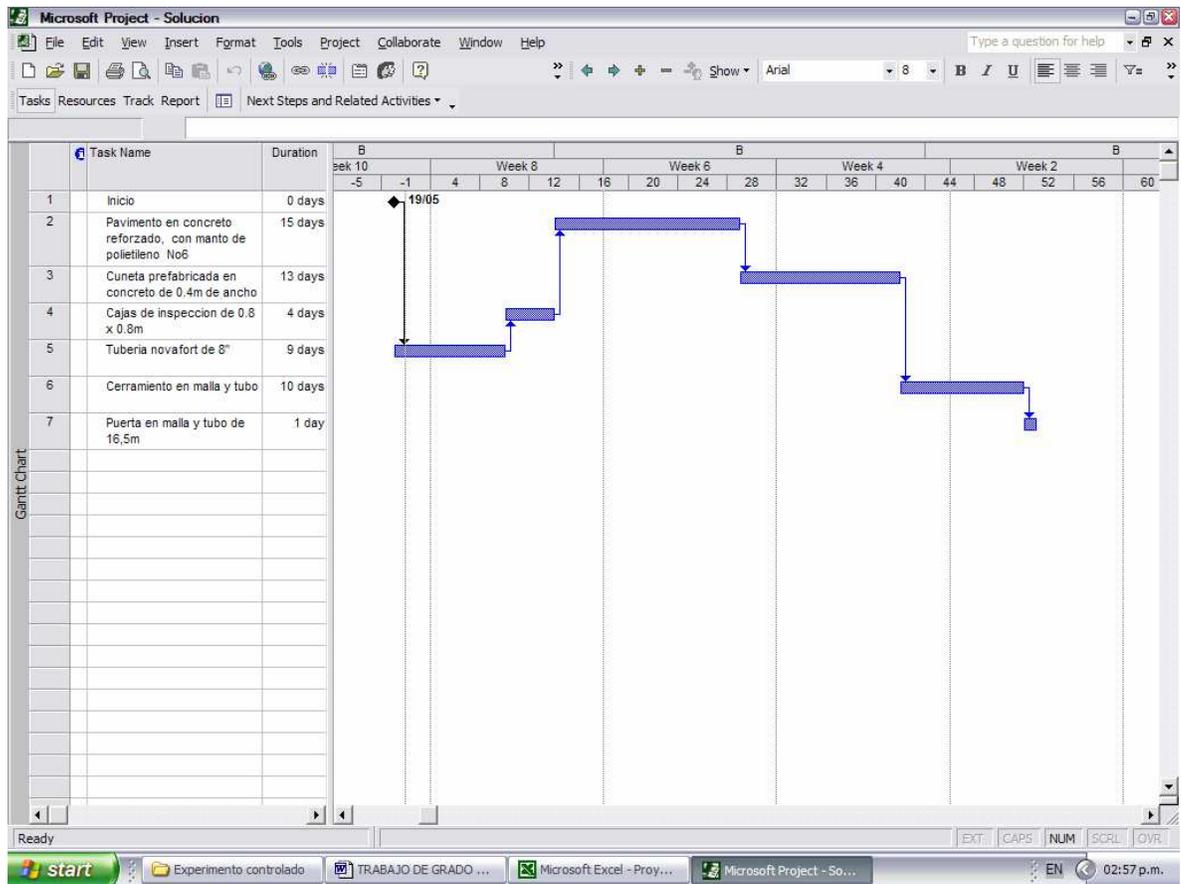
2.6.8 Solución gráfica a los cromosomas, comunicación con Microsoft Project

Microsoft Project es una herramienta útil para observar gráficamente y entender mejor las soluciones generadas por el algoritmo, o en otras palabras “decodificar” la información del cromosoma en un diagrama de barras.

Por esta razón, se programó en *Microsoft Project Visual Basic* un procedimiento que grafica en un diagrama tipo Gantt, alguna de las soluciones finales encontradas para cada ejecución, usando 3 datos básicos: La duración y el retraso de cada actividad encontrados en el cromosoma y las relaciones de precedencia para cada actividad encontradas en la hoja “Precedencias” del archivo. En la siguiente imagen se observa un cromosoma del experimento controlado y la gráfica generada por el macro:

Imagen 62: Cromosoma con diagrama de GANTT

15
0
13
0
4
0
9
0
10
0
1
0
Duración: 52d



2.6.9 Interfaz gráfica del algoritmo genético

La interfaz diseñada para controlar todos los operadores y datos de entrada del algoritmo genético, se encuentran en la hoja “Control” del archivo de trabajo, adicionalmente, hay una gráfica dinámica en la hoja “reporte grafico” en el archivo, donde se grafican los promedios de cada población para cada generación de una ejecución.

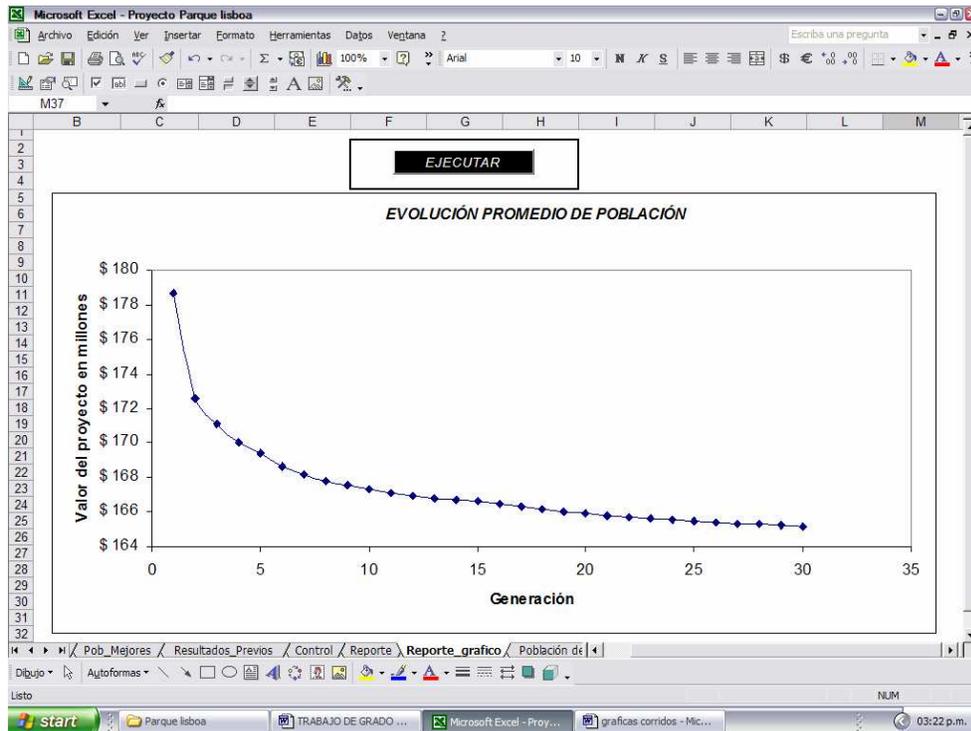
Imagen 63: Control del algoritmo genético

The screenshot displays the 'Hoja de Control General' (General Control Sheet) for a genetic algorithm. It is divided into several sections:

- Datos de Control General:**
 - Cantidad de Actividades: 30
 - Tamaño de la Población: 25
 - Cantidad de Generaciones: 30
 - Días que tiene un periodo: 26
 - Costo de administración por periodo: \$ 12,500,000
 - Costo oportunidad del inversionista: 1.00%
 - Plazo máximo del proyecto: 104
- Recombinación:**
 - Cantidad de Hijos por Generación: 50
 - Cantidad de Hijos por Recombinación: 1
- Mutación:**
 - Porcentaje de Mutación: 5%
 - Porcentaje Mínimo de Mutación: 5%
- Elitismo:**
 - Porcentaje de Elitismo: 80%

At the bottom of the control sheet, it shows 'Generación #: 30'. To the right, a flowchart illustrates the algorithm's process: Generar Población Inicial → Evaluación → Selección → Recombinación → Mutación → Evaluación-Hijos → Nueva Generación. A feedback loop arrow connects 'Nueva Generación' back to 'Evaluación'. On the far right, there are dropdown menus for 'Mejores Anteriores', 'Proporcional', '3 Padres 2 Puntos', 'Aleatoria', and 'Elitismo'. Below the flowchart are buttons for 'EJECUTAR' and 'EXPORTAR A PROYECTO' (with a dropdown for 'Posición del cromosoma que desea exportar' set to 1).

Imagen 64: Reporte gráfico de la evolución del promedio de las poblaciones



3. Análisis del problema y resultados

En esta sección se analizó el comportamiento de los operadores programados para definir cuales se usarían. Al tomar esta decisión, se realizó el estudio del caso para encontrar resultados del cambio de distintos factores del problema y su influencia en el valor presente neto del parque urbano, además para validar el análisis, se ejecutó bajo los mismos parámetros que el parque, un nuevo proyecto de 20 actividades que consiste en la construcción de una escombrera, que aunque va más allá del alcance del trabajo, se realizó con el fin de demostrar que el algoritmo genético programado para este trabajo de grado puede ser aplicado para cualquier tipo de proyecto de ingeniería civil con resultados satisfactorios.

Los análisis fueron realizados con la información del proyecto de construcción del parque Lisboa y de la construcción de la escombrera (Ver ANEXO 1).

3.1 Análisis de los operadores

Este estudio se realizó ejecutando el algoritmo con distintas combinaciones de operadores en el proyecto de construcción del parque urbano. Para cada análisis, se dejaron fijos todos los parámetros y operadores del algoritmo genético, variando solo las opciones del operador en estudio. Además, se ejecutó el algoritmo tres veces por cada observación, con el fin de identificar si las poblaciones y el comportamiento del algoritmo a través de las generaciones fueron homogéneos y promediar los resultados para realizar las comparaciones.

Los criterios tenidos en cuenta para las comparaciones fueron los siguientes:

- Valor promedio de la función objetivo en la población final y en el mejor cromosoma encontrado: Como la idea de este trabajo de grado es la minimización

del valor presente neto, es importante identificar los operadores que encuentran los valores del proyecto más bajos.

- Diferencia entre la función objetivo de la última y la primera generación: Es un factor importante, ya que luego de realizar varias ejecuciones, se observó que el valor final hallado en un algoritmo genético depende de los valores generados en la primera generación, entonces, aunque son importantes las funciones objetivo más bajas, no se puede decidir directamente por ellas, sin tener en cuenta el valor promedio de la población inicial.
- Forma y suavidad de la curva evolución de los promedios del valor presente neto para las poblaciones a través de las generaciones: La importancia de la forma y suavidad de esta curva es que ella indica que tan “inteligentemente” funciona el algoritmo genético, es decir, su comportamiento tiene que cumplir con la forma esperada, para este caso la curva deberá disminuir o tender hacia un valor del proyecto mínimo durante todo su recorrido, además, si la forma de la curva contiene variaciones muy bruscas, el algoritmo puede estar realizando búsquedas o evolucionando aleatoriamente, caso que no debería suceder, ya que los operadores de selección de padres y selección de individuos para la siguiente generación son los encargados de controlar este tipo de cambios.

3.1.1 Método de selección

Imagen 65: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Cantidad de Hijos por Recombinación:	1
Porcentaje de Mutación:	5.0%
Operadores Empleados:	
Método de Recombinación:	2 Padres 2 Puntos
Método de Mutación:	Incremento-decremento
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos
Generación de la Población Inicial:	Aleatorio

Imagen 66: Evolución de la población para métodos de la selección

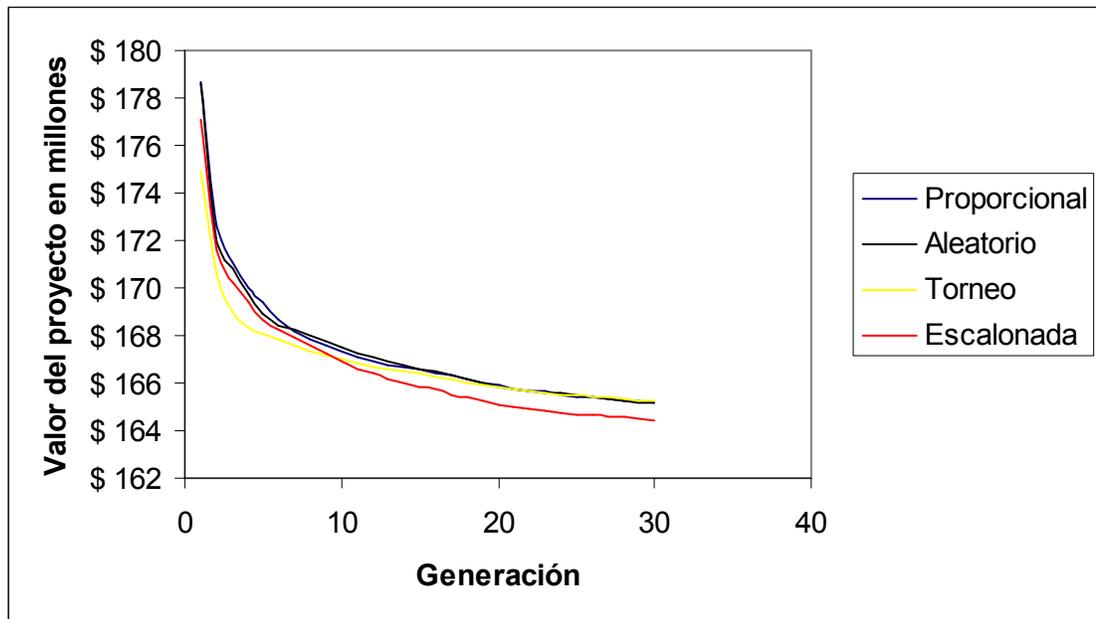


Imagen 67: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
Proporcional	26m 54s	\$ 165.040.351	\$ 165.180.272	\$ 13,471,056
Aleatorio	27m 40s	\$ 165,029,476	\$ 165,145,205	\$ 13,439,184
Torneo	27m 56s	\$ 165,150,896	\$ 165,250,469	\$ 9,629,211
Escalonada	27m 51s	\$ 164,335,960	\$ 164,448,192	\$ 12,664,597

Como se puede observar, los valores mínimos encontrados y la forma de las curvas son muy similares entre sí, y aunque para la selección escalonada se encontró el mínimo VPN, se prefirió el uso de la selección proporcional ya que la diferencia entre la función objetivo de la generación inicial y final es la mayor.

3.1.2 Método de recombinación

Imagen 68: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Cantidad de Hijos por Recombinación:	1
Porcentaje de Mutación:	5.0%
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Escalonada
Método de Mutación:	Incremento-decremento
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos
Generación de la Población Inicial:	Aleatorio

Imagen 69: Evolución de la población para métodos de recombinación

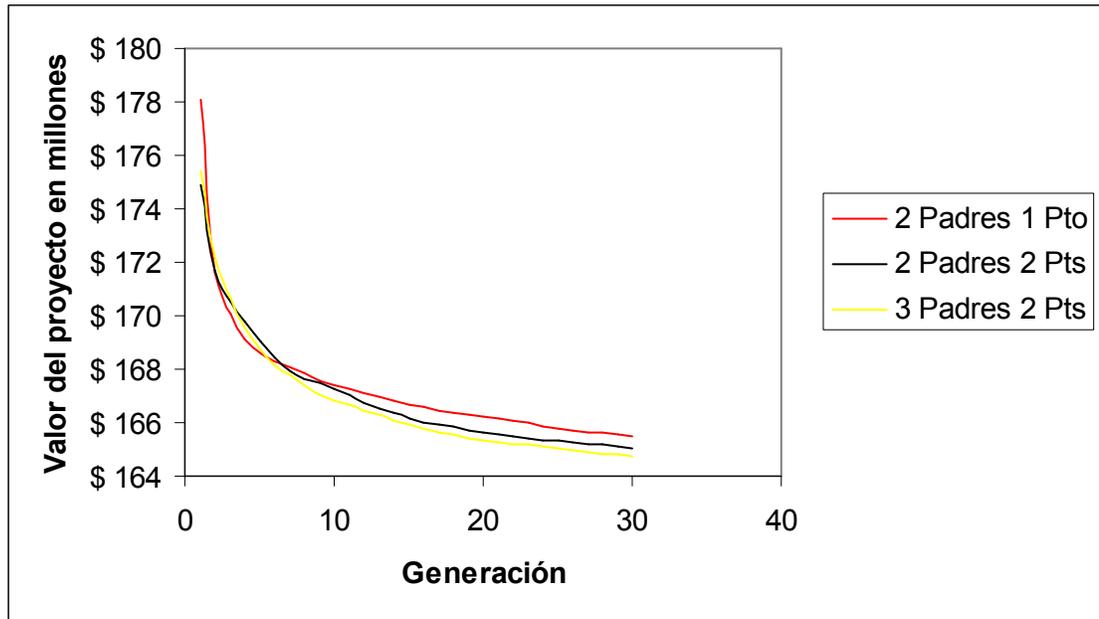


Imagen 70: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
2 P 1 Pto	28m 20s	\$ 165,380,392	\$ 165,488,592	\$ 12,610,043
2 P 2 Pts	26m 57s	\$ 164,878,189	\$ 165,037,291	\$ 9,824,917
3 P 2 Pts	25m 54s	\$ 164,579,594	\$ 164,738,069	\$ 10,696,640

Aunque inicialmente, la mejor opción parece ser tres padres dos puntos, por el valor mínimo encontrado (\$164,579,594), el operador de dos padres un punto supera al mencionado anteriormente, por el delta generación, que significa que el promedio de la generación inicial tuvo un valor más alto y que hubo un mayor cambio desde la generación 1 hasta la 30.

Se decidió usar tres padres dos puntos, que, aunque no es tan bueno como 2 padres un punto, tiene un delta generación muy similar al de este y toma menos tiempo en su ejecución.

3.1.3 Número de hijos por recombinación

Imagen 71: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Porcentaje de Mutación:	5.0%
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Escalonada
Método de Recombinación:	3 Padres 2 Puntos
Método de Mutación:	Incremento-decremento
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos
Generación de la Población Inicial:	Aleatorio

Imagen 72: Evolución de la población para hijos por recombinación

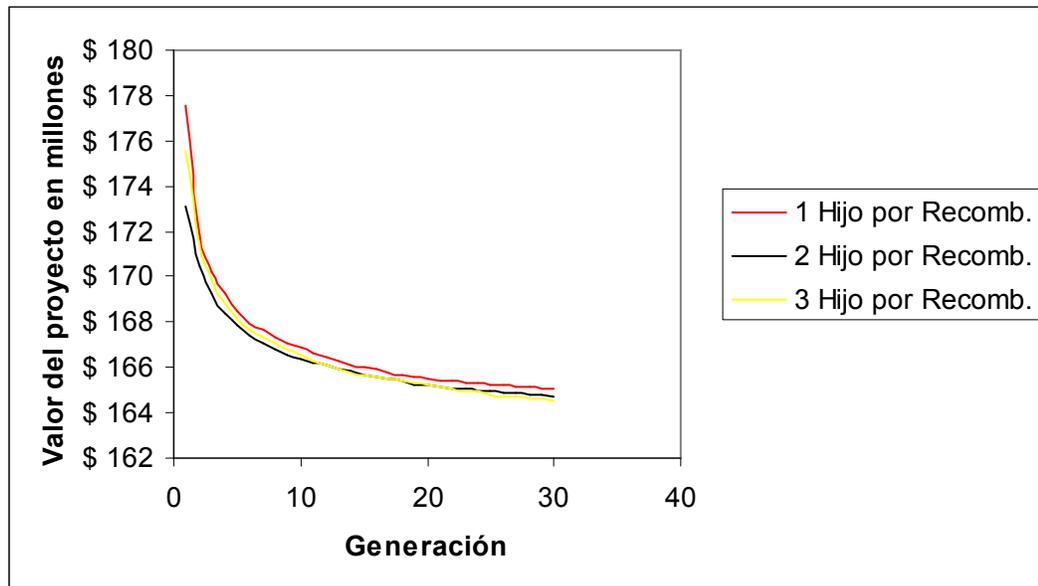


Imagen 73: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
1 Hijo	26m 14s	\$ 164,909,759	\$ 165,065,269	\$ 12,498,827
2 Hijos	26m 3s	\$ 164,555,797	\$ 164,719,835	\$ 8,371,152
3 hijos	25m 26s	\$ 164,468,242	\$ 164,562,139	\$ 11,018,048

Se escogió un hijo por recombinación ya que la evolución durante todas las generaciones, concibió un delta generación mayor a los demás, esto debido talvez a mayor variedad en la población de hijos porque para este caso cada hijo tiene una selección de padres diferentes, mientras que para los otros casos, por cada grupo de padres genera dos o tres hijos, cabiendo la posibilidad de engendrar individuos muy similares.

3.1.4 Generación de la población inicial

Imagen 74: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Cantidad de Hijos por Recombinación:	3
Porcentaje de Mutación:	5.0%
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Escalonada
Método de Recombinación:	3 Padres 2 Puntos
Método de Mutación:	Incremento-decremento
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos

Imagen 75: Evolución de la población para tipos de generación de población inicial

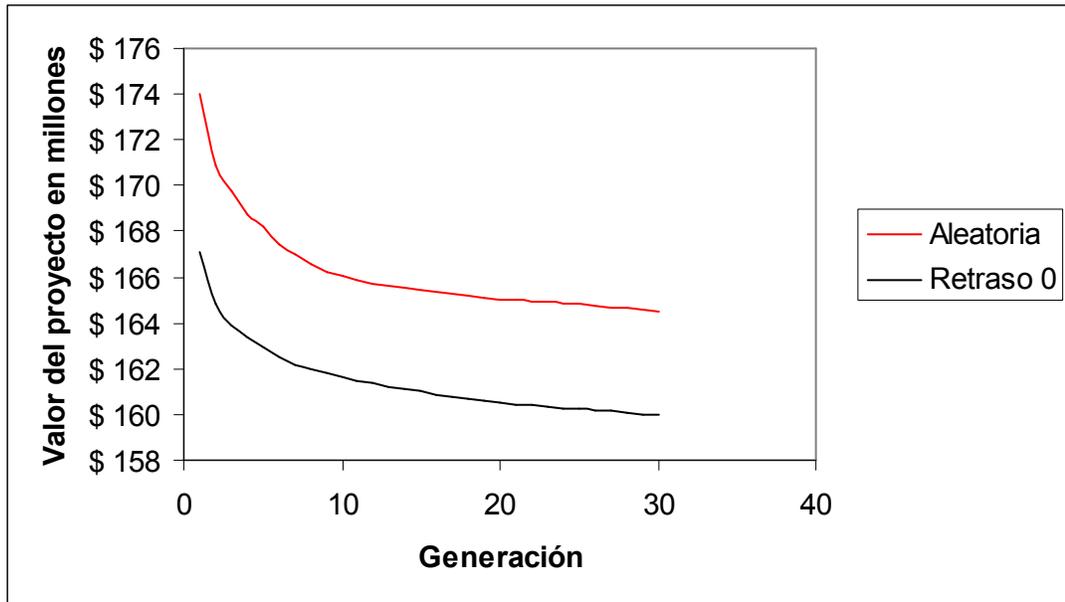


Imagen 76: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
Aleatoria	25m 14s	\$ 164,439,762	\$ 164,522,096	\$ 9,509,152
Retraso 0	25m 18s	\$ 159,882,470	\$ 159,979,829	\$ 7,121,856

Para este caso no importa el delta generación, ya que los valores hallados por medio de generación inicial con retraso 0 son mucho menores que por el método aleatorio, entonces se escogió retraso 0.

3.1.5 Método de mutación

Imagen 77: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Cantidad de Hijos por Recombinación:	3
Porcentaje de Mutación:	10%
Porcentaje Mínimo de Mutación:	5%
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Escalonada
Método de Recombinación:	3 Padres 2 Puntos
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos
Generación de la Población Inicial:	Retraso 0

Imagen 78: Evolución de la población para tipo de mutación

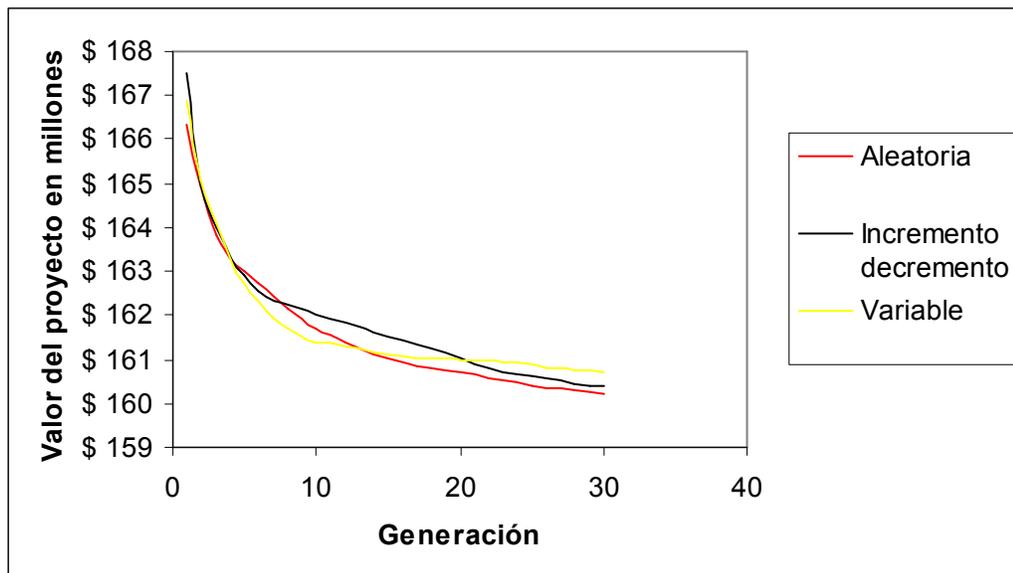


Imagen 79: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
Incremento-Decremento	26m 16s	\$ 160,076,075	\$ 160,234,597	\$ 6,094,256
Aleatoria	25m 42s	\$ 160,284,074	\$ 160,384,469	\$ 7,138,363
Variable	25m 52s	\$ 160,669,811	\$ 160,724,464	\$ 6,172,267

Se escogió mutación aleatoria ya que es la que concibe el mayor delta generación de todas las opciones y además es la que realiza la búsqueda de una manera más ordenada, es decir, cuya curva tiene la forma más suave.

3.1.5 Porcentaje de mutación

Imagen 80: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Cantidad de Hijos por Recombinación:	3
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Escalonada
Método de Recombinación:	3 Padres 2 Puntos
Método de Mutación:	Aleatoria
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos
Generación de la Población Inicial:	Retraso 0

Imagen 81: Evolución de la población para porcentaje de mutación

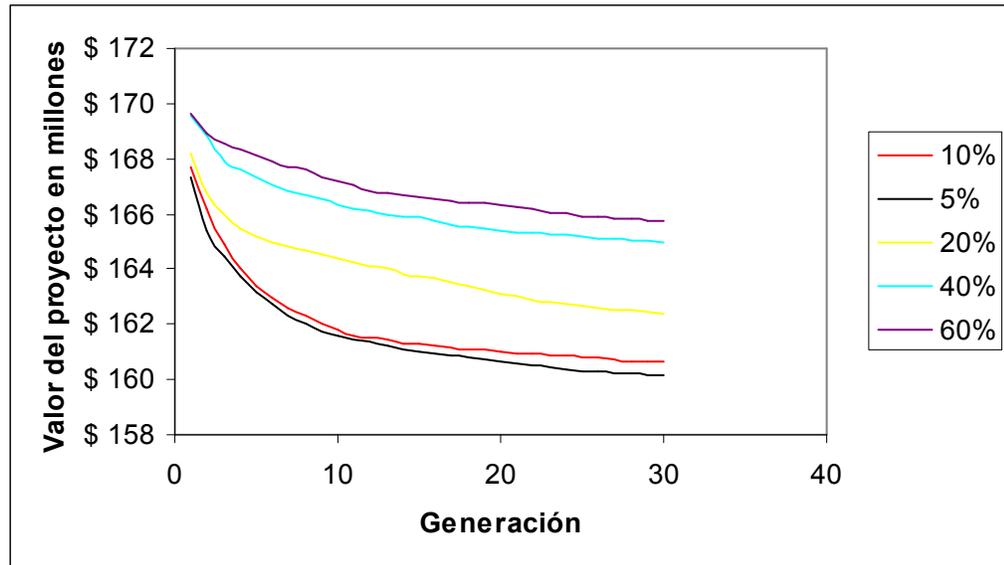


Imagen 82: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
5%	27m 51s	\$ 160,061,904	\$ 160,170,405	\$ 7,164,117
10%	25m 34s	\$ 160,361,488	\$ 160,623,957	\$ 7,036,277
20%	26m 33s	\$ 161,693,573	\$ 162,387,675	\$ 5,773,808
40%	27m 12s	\$ 163,982,334	\$ 164,979,680	\$ 4,596,912
60%	25m 44s	\$ 163,694,393	\$ 165,731,445	\$ 3,884,571

Se escogió mutación de 5% ya que es la que mayor delta generación encuentra, además es la búsqueda más ordenada de todas, esto se puede observar en la Imagen 81, donde su curva tiene una forma más suave que las demás. Para el caso de mutaciones de mayor porcentaje, la evolución del promedio de la función objetivo a través de las generaciones (delta generación) no es tan buena debido a que gran parte de los alelos de la población de los hijos es mutada y la búsqueda no se realiza de una manera ordenada sino aleatoria.

3.1.6 Porcentaje de elitismo

Imagen 83: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Cantidad de Hijos por Recombinación:	3
Porcentaje de Mutación:	5.0%
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Escalonada
Método de Recombinación:	3 Padres 2 Puntos
Método de Mutación:	Aleatoria
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos
Generación de la Población Inicial:	Retraso 0

Imagen 84: Evolución de la población para porcentaje de elitismo

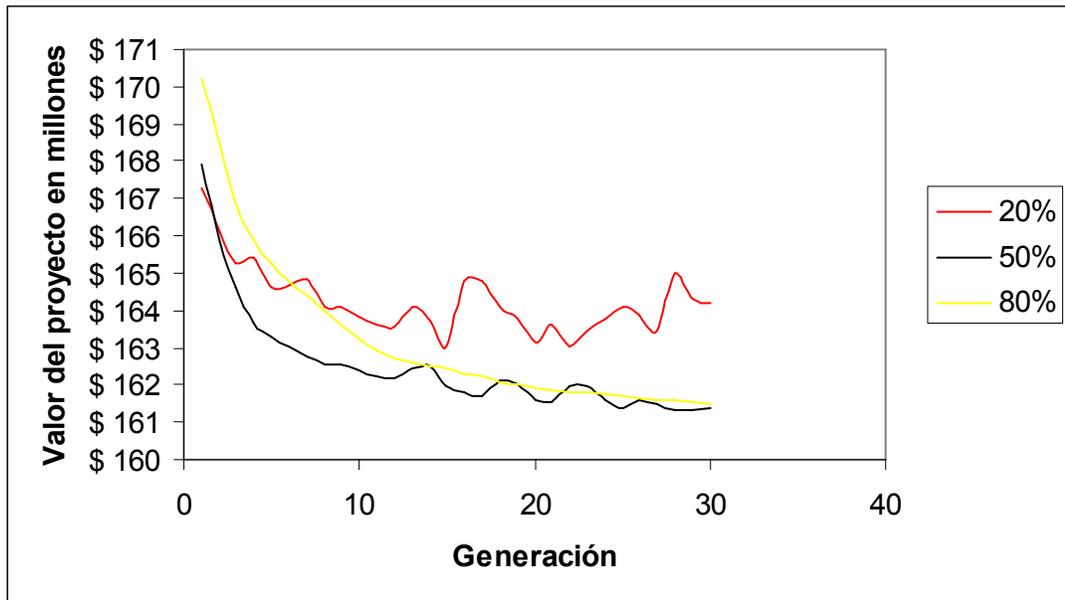


Imagen 85: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
20%	26m 48s	\$ 161,052,459	\$ 164,187,269	\$ 3,105,136
50%	27m 33s	\$ 160,837,121	\$ 161,396,667	\$ 6,547,760
80%	26m 45s	\$ 161,182,576	\$ 161,491,323	\$ 8,693,552

Al observar la Imagen 84, se puede ver que entre más bajo sea el porcentaje de elitismo, más desordenada será la búsqueda, debido a que una pequeña porción de los padres, que se supone, deben ser los mejores individuos que sobreviven generación a generación, son los que se escogen, dejando una gran fracción de la siguiente población a los hijos, que así como pueden ser buenos individuos, también pueden generar soluciones muy malas, dañando las poblaciones futuras y generando una búsqueda desordenada.

Por esta razón la opción escogida es el 80% de elitismo, que mantiene una gran cantidad de los padres y deja un pequeño espacio para los hijos.

3.1.7 Método de selección de la nueva generación

Imagen 86: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Cantidad de Hijos por Recombinación:	3
Porcentaje de Mutación:	5.0%
Porcentaje de Elitismo:	80%
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Escalonada
Método de Recombinación:	3 Padres 2 Puntos
Método de Mutación:	Aleatoria
Generación de la Población Inicial:	Retraso 0

Imagen 87: Evolución de la población para selección de la nueva generación

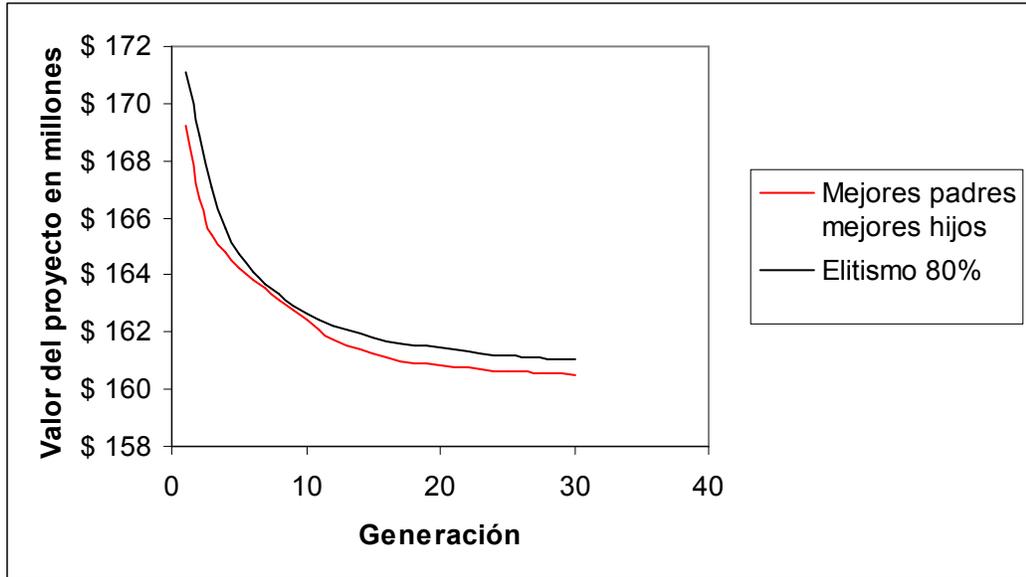


Imagen 88: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
Mejores padres e hijos	25m 30s	\$ 160,312,595	\$ 160,527,531	\$ 8,674,917
Elitismo 80%	28m 56s	\$ 160,683,549	\$ 161,016,064	\$ 10,093,355

Para la selección de la nueva generación se decidió usar elitismo de 80%, ya que encuentra un delta de generación más alto que mejores padres e hijos, además su curva de evolución (ver Imagen 87) tiene una forma más suave, es decir, una búsqueda más ordenada.

3.1.8 Tamaño de población y cantidad de hijos por generación

Imagen 89: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Cantidad de Generaciones:	30
Cantidad de Hijos por Recombinación:	3
Porcentaje de Mutación:	5.0%
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Escalonada
Método de Recombinación:	3 Padres 2 Puntos
Método de Mutación:	Aleatoria
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos
Generación de la Población Inicial:	Retraso 0

Imagen 90: Evolución de la población para cantidad de hijos y tamaño de población

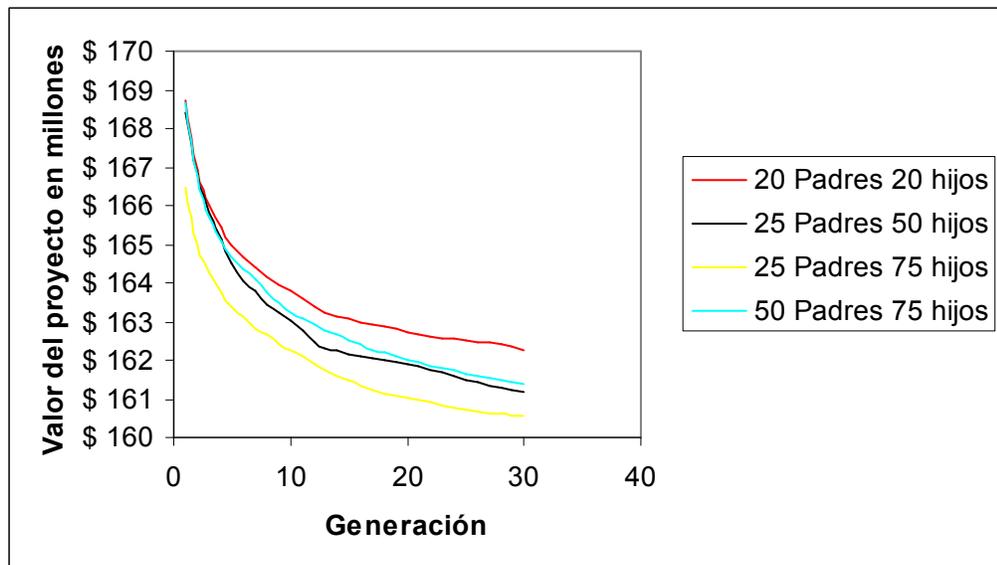


Imagen 91: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
20 Padres 20 hijos	11m 27s	\$ 161,562,073	\$ 162,254,469	\$ 6,438,565
25 Padres 50 hijos	28m 20s	\$ 160,842,292	\$ 161,193,701	\$ 7,229,227
25 Padres 75 hijos	39m 40s	\$ 160,379,928	\$ 160,562,117	\$ 5,886,741
50 Padres 75 hijos	40m 17s	\$ 160,851,189	\$ 161,361,952	\$ 7,326,347

Se decidió usar 25 padres 50 hijos, que aunque no tiene un delta generación tan bueno como 50 padres 75 hijos (Imagen 95), su valor es muy cercano y además su tiempo de compilación es mucho más bajo, evitando un tiempo adicional de ejecución de casi 12 minutos.

3.1.9 Cantidad de generaciones

Imagen 92: Parámetros fijos del estudio

EJECUCIÓN EN ESTUDIO	
Generales	
Tamaño de la Población:	25
Cantidad de Hijos por Generación:	50
Cantidad de Hijos por Recombinación:	3
Porcentaje de Mutación:	5.0%
Operadores Empleados:	
Método de Selección:	Escalonada
Método de Recombinación:	3 Padres 2 Puntos
Método de Mutación:	Aleatoria
Selección de la Nueva Generación:	Mejores padres e hijos
Generación de la Población Inicial:	Retraso 0

Imagen 93: Evolución de la población para cantidad de generaciones

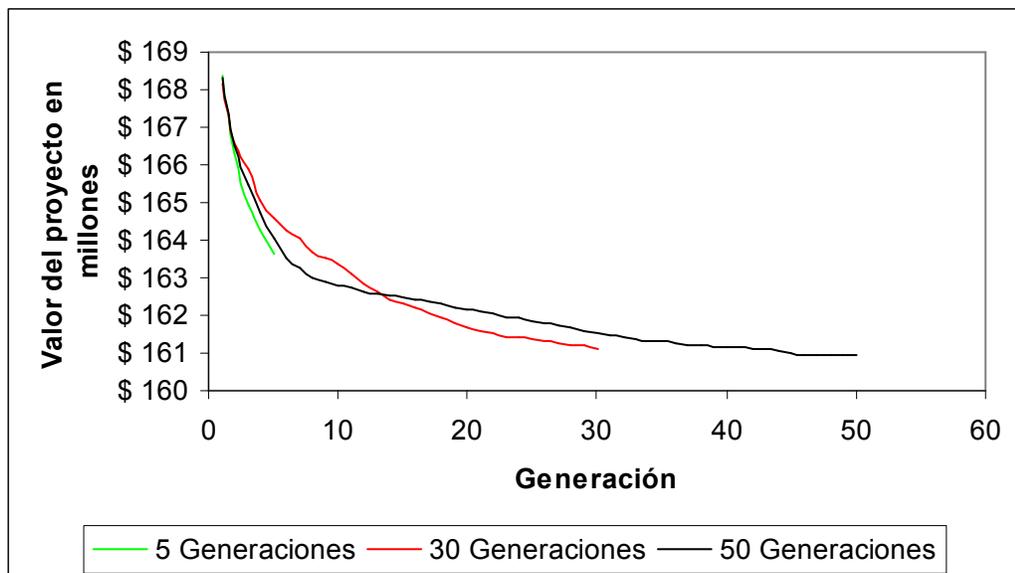


Imagen 94: Valores mínimos encontrados para 5, 30 y 50 generaciones

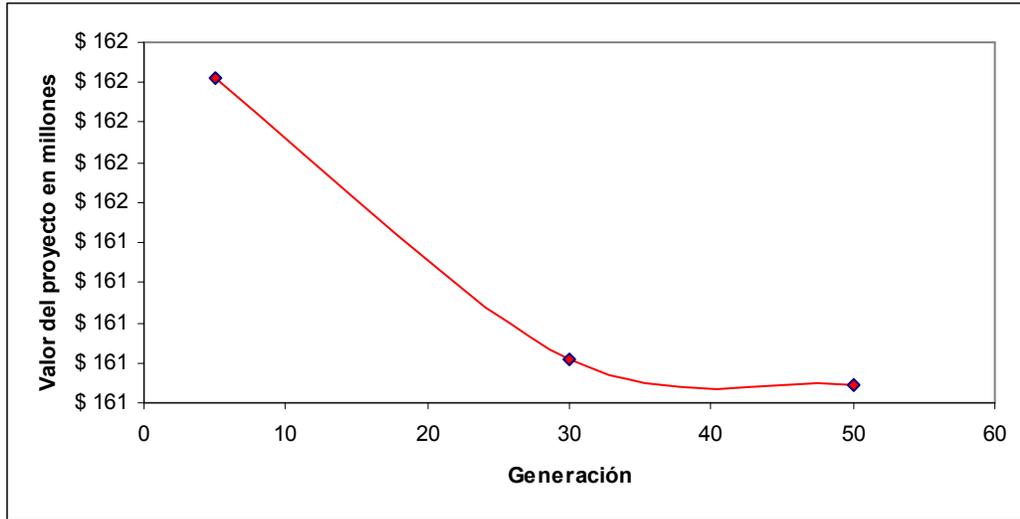


Imagen 95: Resumen de resultados promedio de las ejecuciones

Método	Tiempo ejecución	Valor mínimo	Promedio última generación	Delta Generación 1 - 30
5 Generaciones	4m 55s	\$ 162,217,496	\$ 163,651,600	\$ 4,737,413
30 Generaciones	28m 34s	\$ 160,818,195	\$ 161,116,600	\$ 7,052,840
50 Generaciones	43m 26s	\$ 160,691,497	\$ 160,921,872	\$ 7,390,536

Como se puede observar en la Imagen 93 y la Imagen 94, los resultados arrojados por la ejecución de 50 generaciones son mucho mejores que las demás, pero toma mucho más tiempo. Por esto es que se escogió 30 generaciones, ya que los resultados son muy cercanos pero se ahorran aproximadamente 15 minutos de ejecución.

3.1.10 Resumen operadores seleccionados

A continuación se presenta una tabla con el resumen de los operadores seleccionados a lo largo de la sección 3.1 que serán usados para el análisis del problema

Imagen 96: Operadores seleccionados

Operador	Opción seleccionada	Cantidad
Método de selección	Proporcional	-
Método de recombinación	3 Padres 2 Puntos	1 hijo por recombinación
Población inicial	Retraso 0	-
Método de mutación	Aleatoria	5%
Selección nueva generación	Elitismo	80%
Número de padres e hijos	-	25 Padres 50 Hijos
Número de generaciones	-	30 Generaciones

3.2 Análisis proyecto Parque Lisboa

Luego de haber elegido los operadores con los que hay un buen comportamiento y resultados para los algoritmos genéticos en el proyecto, se procedió a realizar el análisis sobre la influencia de distintos factores del proyecto en su valor presente neto.

Para esta fase, se generaron las poblaciones iniciales del algoritmo mediante la opción de mejores resultados anteriores, con el fin de tener individuos en la población inicial con valores de función de aptitud uniformes, ya que como se mencionó anteriormente, los resultados finales del algoritmo se encuentran estrechamente relacionados con la población inicial, de esta manera se garantiza que todas las comparaciones sean realizadas bajo condiciones similares.

Los criterios tenidos en cuenta para el análisis de sensibilidad del proyecto fueron los siguientes:

- Costo de administración: Como afecta el valor del costo por administración del proyecto su duración
- Penalizaciones: Como influyen las penalizaciones por excedencia de límites de tiempo establecido la duración y costos del proyecto

- Corrección de duraciones de las actividades por esperanza probabilística: Comportamiento de los algoritmos genéticos e influencia en costos y duración del proyecto por ajustes de las duraciones de sus actividades.

Plazo del proyecto: 104 días

Índice de oportunidad: 1%

La información detallada del proyecto se encuentra en el ANEXO 1.

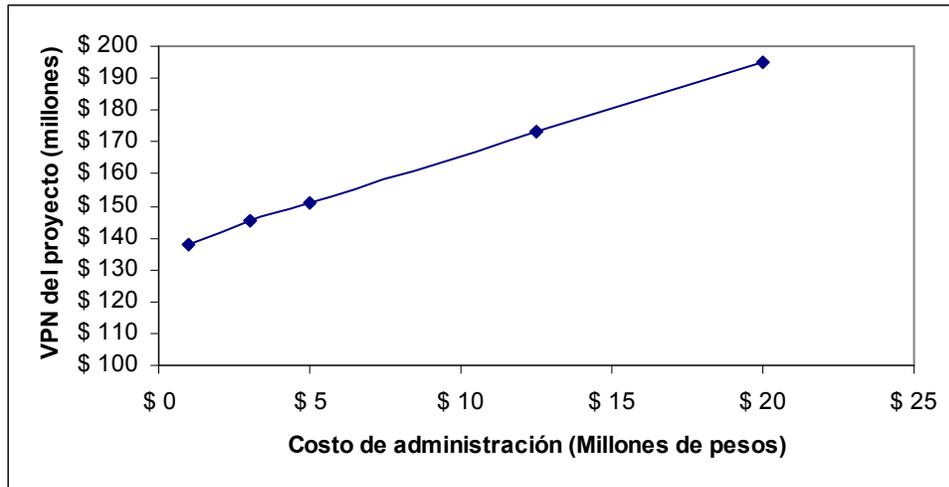
3.2.1 Costo de administración

En esta sección se analizó la influencia del costo de administración en las características del proyecto:

Imagen 97: Resultados del proyecto para distintos costos de administración

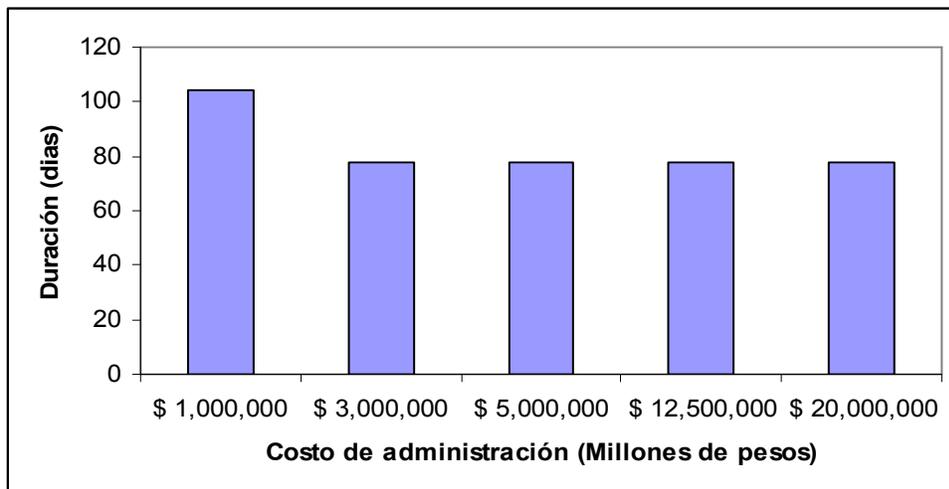
	Costo de administración					Desviación Estándar
	\$ 1,000,000	\$ 3,000,000	\$ 5,000,000	\$ 12,500,000	\$ 20,000,000	
Duración del proyecto (días)	104	78	78	78	78	
Valor mínimo encontrado	\$ 137,662,131	\$ 145,153,005	\$ 151,096,617	\$ 173,318,383	\$ 195,162,942	\$ 23,512,498
Promedio generación inicial	\$ 140,047,584	\$ 146,155,675	\$ 152,376,309	\$ 174,771,803	\$ 196,842,203	\$ 23,466,237
Promedio última generación	\$ 137,668,949	\$ 145,157,749	\$ 151,116,571	\$ 173,396,368	\$ 195,169,253	\$ 23,521,074
Delta generación 30-1	\$ 2,378,635	\$ 997,925	\$ 1,259,739	\$ 1,375,435	\$ 1,672,949	\$ 213,168

Imagen 98: VPN del proyecto según el costo de administración



Como es de suponerse, el costo de administración es una fracción económica muy importante en el valor total del proyecto, a menor costo de administración menor valor del proyecto para un periodo (ver Imagen 98). Pero la influencia en el proyecto de la magnitud de este factor va más allá, la duración de la obra se encuentra altamente influenciada por este elemento como se puede observar en la Imagen 99.

Imagen 99: Duración del proyecto según costo de administración



Los periodos tomados para el proyecto fueron de 26 días con un plazo total para la obra de 4 periodos, es decir, el primer periodo termina el día 26, el segundo el día 52, el tercero el día 78 y el cuarto el día 104. Para el caso del costo de administración de \$1,000,000, el algoritmo concibió una solución para una duración de 104 días, es decir, es preferible pagar otro periodo adicional de administración (teniendo en cuenta no exceder el plazo) para poder extender las duraciones de las actividades y de esta manera tener costos directos menores. Por el otro lado, para los costos de administración más altos, es preferible comprimir las duraciones de las actividades del proyecto, generando costos directos más altos pero evitando el pago de los costos de administración de un mes. Este punto de equilibrio obedece a la teoría de intercambio costo-tiempo (ver Imagen 8), que se encuentra implícito en el análisis del algoritmo genético, ya que este busca la mejor solución variando la duraciones para encontrar la mejor proporción entre costos directos e indirectos.

El costo de administración seleccionado no influye en el desempeño del algoritmo genético, ya que las duraciones de ejecución se mantienen uniformes, además el delta generación es muy parejo sin importar la magnitud de la administración, con una desviación estándar de \$213.168.

3.2.2 Penalizaciones

Se estudió el problema omitiendo las penalizaciones por exceder el límite de tiempo dado al proyecto, con el fin de ver como influye este factor en las duraciones y el costo del proyecto. Los resultados se muestran a continuación:

Imagen 100: Resultados del proyecto para las penalizaciones

	Penalizaciones		Desviación Estándar
	Sin penalizaciones	Con penalizaciones	
Duración del proyecto (días)	78	78	
Valor mínimo encontrado	\$ 173,207,730	\$ 173,318,383	\$ 78,243
Promedio generación inicial	\$ 174,770,347	\$ 174,771,803	\$ 1,030
Promedio última generación	\$ 173,273,493	\$ 173,396,368	\$ 86,886
Delta generación 30-1	\$ 1,496,853	\$ 1,375,435	\$ 85,856

Como se puede observar en las duraciones del proyecto para ambos casos, las penalizaciones no influyen ni en los costos ni en las duraciones, teniendo resultados muy similares en los valores presentes netos, con desviación estándar máxima de \$86,886. Esto se debe a que para la construcción del parque, es más influyente el costo de administración, restringiendo la duración a no sobrepasar los días del último periodo y evitar un sobre costo de los \$12'500,000 que significaría un mes adicional de obra.

3.2.3 Corrección de duraciones de las actividades por esperanza probabilística

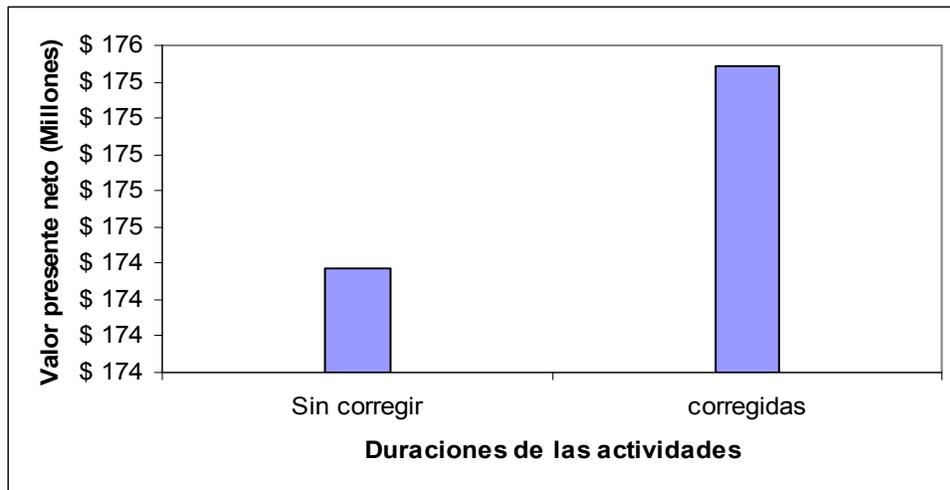
Debido a que en una obra se pueden presentar una gran cantidad de imprevistos, es interesante analizar el comportamiento del proyecto realizando una corrección en las duraciones de cada actividad.

Para este caso se realizó la corrección teniendo una esperanza de ocurrencia del 90%, es decir, limitar las duraciones del proyecto en cada extremo un 5%. El valor K asociado a un área del 5% bajo la curva normal es de 1.65. La corrección de las duraciones fue hallada con ayuda de las ecuaciones 1 y 2. Los resultados se pueden observar en el ANEXO 4.

Imagen 101: Resultados del proyecto para duraciones normales y duraciones corregidas para esperanza de ocurrencia

	Duraciones		Desviación Estándar
	Sin corregir	corregidas	
Duración del proyecto (días)	78	78	
Valor mínimo encontrado	\$ 174,373,557	\$ 175,490,926	\$ 790,099
Promedio generación inicial	\$ 184,973,451	\$ 184,242,912	\$ 516,569
Promedio última generación	\$ 174,621,323	\$ 175,490,832	\$ 614,836
Delta generación 30-1	\$ 10,352,128	\$ 8,752,080	\$ 1,131,405

Imagen 102: Valor presente neto del proyecto para Tipos de duraciones del proyecto



Como se puede observar en la Imagen 101 y la Imagen 102 los resultados son mejores para el rango de duraciones sin corrección, ya que el valor del proyecto encontrado y el delta generación son mejores que para la configuración de las duraciones corregidas, sin embargo es preferible trabajar con las duraciones corregidas por esperanza de ocurrencia ya que es una búsqueda más inteligente y además sus duraciones tienen una mayor probabilidad de incidencia por encontrarse dentro de un rango de probabilidad de ocurrencia del 90%.

3.3 Análisis del proyecto de construcción adicional, Escombrera “Guadalcanal”

Este análisis, es un proyecto adicional al trabajo de grado que fue realizado con los mismos operadores elegidos en la sección 3.1 y además se tuvieron en cuenta los mismos criterios de análisis usados en la sección 3.2 para el proyecto de la construcción del parque urbano, con la diferencia que para este proyecto, los algoritmos genéticos generaron la población inicial con retraso 0 y no con resultados históricos, ya que no se tenían las suficientes ejecuciones del programa para este caso.

Plazo del proyecto: 156 Días

Índice de oportunidad: 1%

La información detallada del proyecto se encuentra en el ANEXO 1.

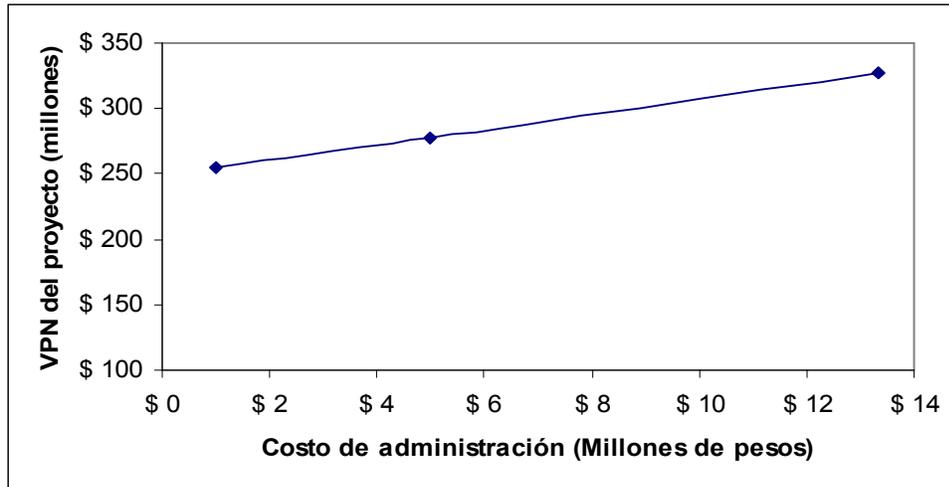
3.3.1 Costo de administración

En esta sección se analizó la influencia del costo de administración en las características del proyecto:

Imagen 103: Resultados del proyecto para distintos costos de administración

	Costo de administración			Desviación Estándar
	\$ 1,000,000	\$ 5,000,000	\$ 13,320,000	
Duración del proyecto (días)	156	156	156	
Valor mínimo encontrado	\$ 254,309,978	\$ 277,051,318	\$ 326,786,937	\$ 37,066,854
Promedio generación inicial	\$ 331,553,888	\$ 357,289,856	\$ 434,297,419	\$ 53,461,416
Promedio última generación	\$ 254,706,240	\$ 277,415,243	\$ 327,223,872	\$ 37,093,138
Delta generación 30-1	\$ 76,847,648	\$ 79,874,613	\$ 107,073,547	\$ 16,646,068

Imagen 104: VPN del proyecto según el costo de administración



Al igual que en el proyecto de construcción del parque, el costo de administración es una fracción económica muy importante en el valor total del proyecto, a menor costo de administración menor valor del proyecto para un periodo (ver Imagen 104).

Para este caso, la evolución del algoritmo sí se vio afectada por los operadores usados en la ejecución, más específicamente por la generación de la población inicial, que a diferencia del proyecto de construcción del parque, se realizó aleatoria con retraso 0 existiendo una gran diferencia en la evolución de la búsqueda con una desviación estándar del delta generación de casi \$17'000,000 comparado con los \$213,000 pesos de desviación estándar del proyecto del parque Lisboa. Esto se debe a que en el caso de generar la población inicial con resultados históricos, todos los individuos iniciales tendrán valores de la función de aptitud muy cercanos, mientras que de manera aleatoria los individuos iniciales tendrán grandes diferencias en sus funciones de aptitud, afectando la evolución del algoritmo genético con evoluciones distintas

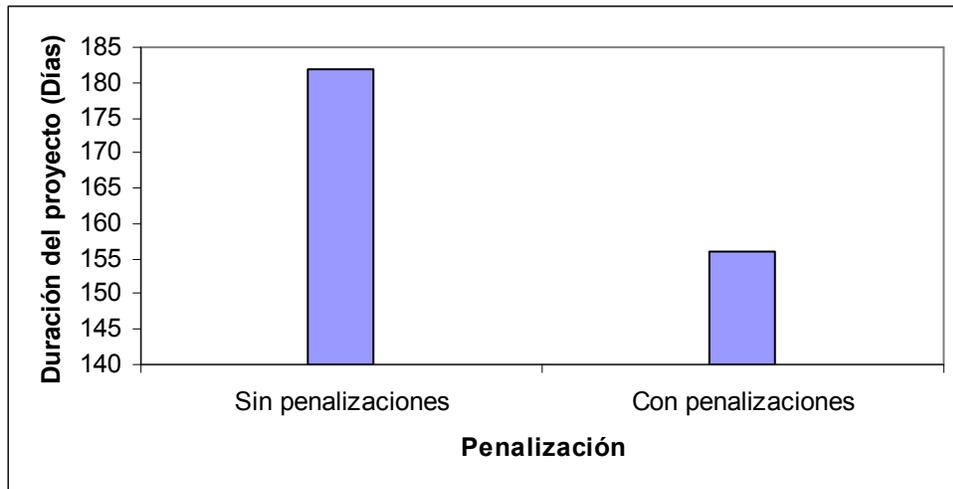
3.3.2 Penalizaciones

Se estudió el problema omitiendo las penalizaciones por exceder el límite de tiempo dado al proyecto, con el fin de ver como influye este factor en las duraciones y el costo del proyecto. Los resultados se muestran a continuación:

Imagen 105: Resultados del proyecto para las penalizaciones

	Penalizaciones		Desviación Estándar
	Sin penalizaciones	Con penalizaciones	
Duración del proyecto (días)	182	156	
Valor mínimo encontrado	\$ 323,908,608	\$ 320,995,513	\$ 2,059,869
Promedio generación inicial	\$ 352,227,776	\$ 424,350,347	\$ 50,998,359
Promedio última generación	\$ 324,074,400	\$ 321,754,112	\$ 1,640,691
Delta generación 30-1	\$ 28,153,376	\$ 102,596,235	\$ 52,639,050

Imagen 106: Duración del proyecto según penalizaciones



En este caso se observa un efecto muy importante que ejercen las penalizaciones y la generación de las poblaciones en las duraciones y el costo del proyecto. Cuando se genera la población inicial con resultados históricos, el campo de búsqueda de soluciones está reducido, debido a que la búsqueda se realizará con los mejores individuos de distintas áreas del espacio del problema. Cuando las poblaciones se generan de manera aleatoria, la búsqueda se debe realizar en el espacio total de las soluciones, para este caso, las

penalizaciones son una excelente herramienta para acotar este gran espacio. Al comparar las duraciones halladas para las mejores soluciones del parque Lisboa (en el límite del plazo sin importar las penalizaciones) con las de éste proyecto (excediendo el límite del plazo si no existen penalizaciones), se puede ver que si no existen restricciones o penalizaciones en el campo de búsqueda, los individuos exploran todo el espacio sin importar infactibilidades (considerando como infactibilidad el hecho de exceder los límites), y si encuentra una buena solución en estas áreas infactibles, pueden guiar a toda la población en ése sentido, perdiendo la oportunidad de explorar otras áreas de búsqueda en las cuales puedan existir soluciones mejores, como se puede observar en la Imagen 105, donde se encuentran mejores soluciones en el campo factible, es decir, dentro de los límites del plazo de construcción del proyecto.

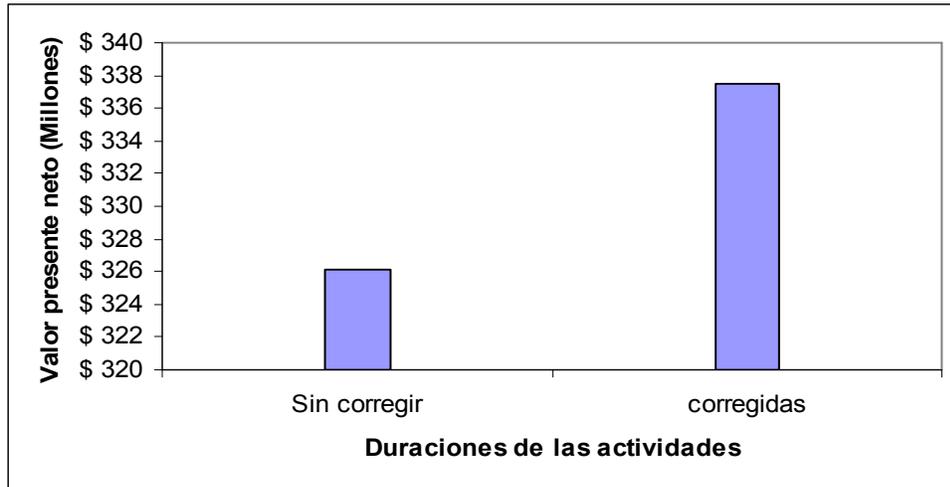
3.3.3 Corrección de duraciones de las actividades por esperanza probabilística

Para este caso se realizó la corrección teniendo una esperanza de ocurrencia del 90%, es decir, limitar las duraciones del proyecto en cada extremo un 5%. El valor K asociado a un área del 5% bajo la curva normal es de 1.65. La corrección de las duraciones fue hallada con ayuda de las ecuaciones 1 y 2. Los resultados se pueden observar en el ANEXO 4.

Imagen 107: Resultados del proyecto para duraciones normales y duraciones corregidas para esperanza de ocurrencia

	Duraciones		Desviación Estándar
	Sin corregir	corregidas	
Duración del proyecto (días)	156	156	
Valor mínimo encontrado	\$ 326,168,490	\$ 337,457,750	\$ 7,982,713
Promedio generación inicial	\$ 422,683,627	\$ 437,628,565	\$ 10,567,667
Promedio última generación	\$ 326,438,069	\$ 339,239,776	\$ 9,052,174
Delta generación 30-1	\$ 96,245,557	\$ 98,388,789	\$ 1,515,494

Imagen 108: Valor presente neto del proyecto para Tipos de duraciones del proyecto



Al igual que para el proyecto del parque Lisboa, los resultados son mejores para el rango de duraciones sin corrección, pero es preferible trabajar con las duraciones corregidas porque las soluciones encontradas por este método tienen una probabilidad más alta de ocurrencia, como fue justificado en la sección 3.2.3.

4. Conclusiones y recomendaciones

- En el caso de no tener conocimiento en el manejo de algoritmos genéticos, se recomienda realizar un estudio práctico sobre el comportamiento de las diferentes opciones de los operadores, para entender mejor su funcionamiento. En el caso de la cantidad de generaciones necesarias, es bueno analizar la evolución de las poblaciones para diferentes números de generaciones, ya que el uso de una gran cantidad de estas no garantiza el encontrar la mejor solución de todas tomando además una gran cantidad de tiempo para la ejecución. Debido al comportamiento asintótico de la evolución de los algoritmos genéticos, se pueden hallar buenas soluciones sin necesidad de ejecutar una gran cantidad de generaciones.
- Una representación adecuada de la información que contiene el cromosoma evita el uso de mecanismos de reparación, es decir, revisión y corrección de infactibilidades en las soluciones a medida que se usen los operadores y pasen las generaciones.
- El valor de adaptación de los individuos de la población final de algoritmo genético, está estrechamente relacionada con el valor de adaptación de los de la primera generación, por esto, si se está trabajando con generaciones iniciales aleatorias, en el momento de evaluar la evolución de las poblaciones a través de las generaciones no es recomendable tomar decisiones basados totalmente en el valor mínimo encontrado, sino en la diferencia de los valores de adaptación de la primera y la última generación. Por ejemplo, si la población inicial de una ejecución es muy mala, y el valor de adaptación del mejor individuo encontrado a través de las generaciones no es tan bueno como el de otra ejecución, hay que revisar la población inicial del individuo de la segunda generación, ya que ésta puede ser buena, y finalmente la evolución de la primera ejecución puede ser mejor que el de la segunda.

- Para realizar comparaciones entre evoluciones y resultados de los algoritmos genéticos, es mejor trabajar con poblaciones iniciales que sean generadas por medio de resultados históricos, de esta manera se garantiza que el punto de partida del análisis para las diferentes poblaciones será homogéneo.
- Para el uso de mutación variable, es necesario tener mutaciones iniciales que no sean cero ni muy pequeñas, ya que al existir una variación baja en las primeras generaciones, la búsqueda se puede estancar en una solución local.
- Tampoco es recomendable el uso de mutaciones muy altas ya que la búsqueda se realizará de una manera desordenada pudiendo perder genes importantes de los cromosomas o buenos esquemas.
- Es recomendable el uso de un hijo por cada grupo de padres escogidos así tome más tiempo la ejecución del algoritmo genético, ya que con varios hijos por grupo de padres escogidos habrá menor variedad en la población generada en la recombinación, perdiendo espacio en el campo de búsqueda.
- Para el uso del elitismo no es recomendable usar porcentajes bajos, ya que el hecho de que halla un cruce entre padres buenos no quiere decir que el hijo vaya a ser similar o mejor, entonces la escogencia de los individuos que serán padres en la siguiente generación tendrá en su mayoría hijos, y muchos de estos pueden ser malos, dañando la evolución de las poblaciones y generando una búsqueda desordenada.
- En lugar de ejecutar algoritmos genéticos con muchas generaciones, es mejor compilar los programas muchas veces con una cantidad menor de generaciones y creando poblaciones iniciales por medio de resultados históricos, de esta manera se garantiza que cada vez que se ejecute el programa se encontraran soluciones finales mejores o por lo menos iguales a la compilación anterior.

- Para el uso de elitismo, en el momento en el que la curva de evolución de las poblaciones empezaba a comportarse asintóticamente, es decir, el momento en el que empezaba a enfocarse en una solución, disminuía la posibilidad de encontrar hijos mejores a los padres, esto se observó debido a que en generaciones finales, el valor promedio de adaptación solía desmejorar con respecto poblaciones anteriores.
- Es necesaria una penalización fuerte a los hijos que sean iguales a los padres, para que estos no sean deseables en la selección de la siguiente generación. En caso de no evitar este problema, puede suceder que uno o algunos individuos se apoderen de las poblaciones y el algoritmo genético converja muy rápidamente a soluciones óptimas locales
- La magnitud de la penalización por exceder el plazo de realización del proyecto define la duración de este, es decir, cuando las penalizaciones son altas es preferible tener duraciones de proyectos menores al límite establecido, preferiblemente en el límite, así esto implique mayores costos directos de la actividades por tener duraciones cortas. En cambio, si la penalización es baja, es preferible alargar un poco las duraciones de las actividades, que implica menores costos directos, aunque se generen penalizaciones. Aunque esta situación puede ser atractiva por generar menores costos, no es deseable por el incumplimiento del compromiso generalmente adquirido en la firma de los contratos. Para evitar este problema, es necesario ajustar las penalizaciones para que los individuos del algoritmo genético a través de las generaciones se adapten al plazo establecido.
- Para evitar problemas con la recomendación anterior, es mejor, ejecutar varias veces los algoritmos genéticos para el proyecto en estudio. Con el fin de tener almacenados varios individuos que tengan un buen valor de adaptación. Luego generar poblaciones iniciales con los individuos históricos para de esta manera tener

poblaciones iniciales en las ejecuciones con valores de adaptación similares y poder analizar los resultados finales bajo unas mismas condiciones.

- En caso de no disponer de resultados históricos para la generación de las poblaciones iniciales, las penalizaciones son una herramienta muy útil para disminuir el espacio de búsqueda, haciendo menos atractivas las soluciones infactibles y reduciendo la búsqueda solo a individuos factibles.
- Para el caso del estudio de minimización del valor presente neto de proyectos, es recomendable trabajar con relaciones de las actividades concatenadas sin holgura, ya que de esta manera hay mayor posibilidad de extender las duraciones de las actividades para generar costos directos menores, teniendo en cuenta el control de los costos de administración generados, es decir, si se tienen periodos de 30 días y una configuración de un proyecto de 22 días, la mejor solución sería alargar duraciones de actividades hasta llegar a los 30 días, teniendo costos directos menores y sabiendo que los costos indirectos son iguales para 22 que para 30 días, pero controlando el no pasarse a los 31 días, ya que se generaría un costo de administración adicional, que aumentaría el valor total del proyecto. Para el caso del uso de los algoritmos genéticos en este trabajo de grado, el común denominador de todas las soluciones encontradas fue éste.
- El costo administrativo tiene una gran influencia en la duración de los proyectos, definiendo y acotando más importantemente sus duraciones que por medio de las penalizaciones. Acá se puede ver la aplicación directa de la teoría de intercambio costo tiempo, ya que todas las soluciones arrojadas por los algoritmos genéticos en este trabajo de grado tuvieron duraciones que siempre llegaban hasta el límite final de un periodo. Dependiendo de la duración mínima posible de la ruta crítica estos coincidían con el plazo máximo del periodo o con días finales de periodos anteriores al último permitido.

- Aunque los resultados con las duraciones sin corregir por esperanza de ocurrencia son mejores que los corregidos, es recomendable el uso de la corrección ya que en la ejecución de una obra en la vida real, las cosas muy pocas veces salen como se esperan, por esto al tener duraciones acotadas a la mayor probabilidad de ocurrencia, las soluciones se acercarán más a lo que pueda suceder durante la construcción

5. Investigaciones Futuras

Debido a que esta es la primera investigación de este tipo realizada en la universidad y tal vez en Colombia, la información y recomendaciones se basó en proyectos realizados en otros países. Acá radica la importancia de este trabajo, el cuál no se encuentra totalmente perfeccionado, por eso se realizan las siguientes recomendaciones para personas interesadas en continuar con este tema:

- La suposición de que los proyectos se realizan de una manera lineal, es decir, esperando la finalización de la actividad predecesora para poder continuar, limita de cierta modo el estudio de combinaciones y su aplicación directa a los proyectos reales, ya que son muy pocos los casos de construcción de obras civiles que sean realizados linealmente, por esto se recomienda la implementación de actividades desfasadas en el algoritmo genético.
- Para el caso de minimización del valor presente neto, y de actividades las cuales su única manera de desarrollo sea lineal, se recomienda realizar controles de retraso 0, es decir, generar poblaciones con retraso 0 solo para las de este tipo. Para el resto de las actividades no hay problema con los periodos de holgura siempre y cuando no sobrepasen la ruta crítica.
- Sería interesante realizar una agrupación de esta investigación con disponibilidad de insumos y su reporte correspondiente en *Microsoft Project*, ya que la suposición de que los insumos están disponibles para el instante en el que comienza una actividad, no es muy real.
- La inclusión de ingresos al estudio del problema, daría un enfoque totalmente distinto al estudiado en este trabajo de grado. Como por ejemplo introduciendo la distribución y proporciones de ingresos que generalmente se especifican en los pliegos de las licitaciones.

6. Sugerencias realizadas en la sustentación

A continuación se presenta respuesta a las sugerencias y recomendaciones realizadas en la sustentación.

- Se adicionó un hito al final del proyecto, en la herramienta que exporta la solución seleccionada a Microsoft Project, con el fin de identificar la terminación de éste y su duración total.
- Se estudió el uso de retrasos negativos para permitir traslajos o desfases en los comienzos de las actividades con respecto a sus predecesoras, de esta manera no es necesario esperar a que finalice en su totalidad la actividad predecesora para continuar con la sucesora.

Esta aplicación puede ser realizada, pero es necesario definir el porcentaje de actividad predecesora que debe encontrarse realizada para poder comenzar con la siguiente actividad, es decir, además del retraso máximo permitido que fue definido en este trabajo de grado, se debe definir el retraso negativo permitido, que se encontrará directamente relacionado con la duración de la actividad predecesora (alelo de duración para una actividad) y con el porcentaje de predecesora que debe encontrarse realizado.

- Se realizaron pruebas con tamaños de población y cantidad de hijos con capacidad máxima (255 individuos para cada uno) y diferentes tamaños de poblaciones, con el fin de revisar si la herramienta programada en Excel fallaba en algún momento. Las compilaciones estudiadas oscilaron entre 4 y 8 horas dependiendo del tamaño de la población y durante toda su ejecución no se reportó ningún problema, pudiendo afirmar que el ambiente Windows y el uso de Microsoft Excel son herramientas que responden adecuadamente al estudio del problema, ya que el análisis para los tamaños estudiados son más que suficiente, porque como se ha explicado a lo largo

de este trabajo de grado, con el uso de los algoritmos genéticos se encuentra un punto en el cual la evolución de las soluciones no es muy significativa y el aumento de los tamaños y poblaciones no harán gran diferencia en los resultados.

7. Bibliografía

- * CENGIZ, Y. Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constrains. Canadian journal of civil engineering. Vol 29 Número 3 Junio de 2002.
- * CHAN, CHUA Y KANNAN. Construction resource scheduling with genetic algorithms. Journal of construction engineering and management Vol 122 Número 2.
- * COELLO, Carlos. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. Editorial Kluwer academic, 2002.
- * DEB, Kalyanmoy. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Editorial John Wiley & Sons ltd, 2001
- * DOERSCH y PATTERSON. Scheduling a Project to maximize its present value: a zero-one programming approach. Management science Vol 23 Número 8.
- * DODIN, B y ELIMAM, A. Integrated Project scheduling and material planning with variable activity duration and rewards. IIE Transactions. Volumen 33 Número 11; Marzo de 2001.
- * DREXL. Scheduling of Project networks by job assignment. Management science Vol 37 Número 12.
- * EL-BIBANY. Parametric constraint management in planning and scheduling computational basis. Journal of construction engineering and management Vol 123 Número 4.
- * ELDIN. Concurrent engineering: A schedule reduction tool. Journal of construction engineering and management Vol 123 Número 3.
- * Estimación del valor presente neto [on line]. http://www.nafin.com/portalfn/files/pdf/finanzas3_6.pdf. consultado el 23 de Mayo de 2005.

- * GOLDBERG, David. Genetic algorithms in search optimization, and machine learning. Edición No 16. Editorial ADDISON-WESLEY, 1989.
- * Guía básica para la programación en Visual Basic. [on line] <http://www.telecable.es/personales/jrubi/index.htm?curso.htm>. consultado el 15 de Abril de 2005.
- * HARMELINK y ROWINGS. Linear scheduling model: development of controlling activity path. Journal of construction engineering and management Vol 124 Número 4.
- * HEGAZY, Tarek. Computer based construction Project Management. Editorial Prentice Hall, 2002.
- * HEGAZY, SHABEEB, ELBELTAGI, CHEEMA. Algorithm for scheduling with multiskilled constrained resources. Journal of construction engineering and management Vol 126 Número 4.
- * HEGAZY Y PETZOLD. Genetic optimization for dynamic project control. Journal of construction engineering and management. Vol. 129 Número. 4 Julio 2003.
- * HILLIER, Frederick y LIEBERMAN. Introducción a la investigación de operaciones. Editorial McGraw-Hill, Sexta edición 1997.
- * INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Colombianas para la presentación de trabajos de investigación. ICONTEC, 2002.
- * KANG y PAULSON. Information management to integrate cost and schedule for civil engineer projects. Journal of construction engineering and management Vol 124 Número 5.
- * KARIM y ADELI. Information model for construction project management. Journal of construction engineering and management Vol 125 Número 5.
- * LI. New approach to optimization of overall construction schedule. Journal of construction engineering and management Vol 122 Número 1.
- * LEU, Sou y YANG, Chung. GA-Based multicriteria optimal model for construction scheduling. Journal of construction engineering and management. Volumen 125 Número 6; Diciembre de 1999.

- * Martin Skutella, Problema del intercambio costo-tiempo [on line] <http://www.math.tu-berlin.de/coga/research/scheduling/tctp/> . consultado el 1 Marzo de 2005
- * MERELO, Juan. Información evolutiva: Algoritmos genéticos. en <http://geneura.ugr.es/~jmerelo/ie/ags.htm>. consultado el 23 de Febrero de 2005
- * Programación de la construcción y control de obra [on line] www.katodos.com/doctos/e22e4d511d5e40892af541dbf29b3ca2. consultado el 1 de Marzo de 2005.
- * REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, Diccionario de la lengua española vigésima segunda edición 2001
- * SON y SKIBNIEWSKI. Multiheuristic approach for resource leveling problem in construction engineering: Hybrid approach. Journal of construction engineering and management Vol 125 Número 1.
- * SUAREZ Carlos, Costo y tiempo en edificación. 2da edición. editorial Limusa Wiley S.A 1971.

ANEXOS

ANEXO 1

**Proyecto Adecuación y pavimentación lotes de automotriz interamericana
(Experimento Controlado)**

Plazo de construcción: 52 días.

Índice de oportunidad: 1%

Insumos

Código	Descripción	Unidad	Precio unitario	Tipo
3	Tubería novafort D=8"	ml	29928	Material
4	Malla electrosoldada M-084	Kg	2200	Material
5	Marco y tapa para caja de 0.8 x 0.8	Und	160000	Material
30	Concreto MR 36 Kgf/cm2	m3	275152	Material
35	Arena lavada de pozo	m3	30000	Material
37	Sikaflex 15lm	Can	697798	Material
38	Cortadora con disco diamantado	día	30000	Equipo
39	Sika road de 1/4"	ml	450	Material
40	Regla vibradora	día	40000	Equipo
44	Polietileno No 6	m2	800	Material
45	puerta en malla y tubo de 16.5 m	Und	4856032	Material
46	Cerramiento perimetral en malla	ml	140000	Material
133	Cuadrilla general	Hra	10000	M. obra
295	Formaleta	m2	4000	Material
306	Ladrillo recocido	Und	220	Material
342	Acero de refuerzo Fy 2600 Kgf/cm2	Kg	1800	Material
375	Herramienta menor	Glb	300	Herramienta
455	Mortero 1:3	m3	190000	Material
1031	Concreto de 3000psi	m3	268192	Material

Análisis de precios unitarios

Actividad	Cod_insumo	Cantidad de insumo	Rendimiento	Costo herramienta usada por mano de obra	Costo ordinario mano de obra por actividad	Costo ordinario maquinaria por actividad
1	44	1.10	1.10			
1	375		2.00	760.00		
1	133		4.82		7147.00	
1	295	0.25	0.25			
1	39	0.85	0.85			
1	37	0.00	0.00			
1	30	0.16	0.16			
1	38		4.82			1200
1	40		4.82			1000
1	342	0.61	0.61			
1	4	4.38	4.38			
2	295	1.00	1.00			
2	1031	0.07	0.07			
2	375		0.50	600.00		
2	133		2.59		5000.00	
3	1031	0.06	0.06			
3	306	148.00	148.00			
3	455	0.11	0.11			
3	5	1.00	1.00			
3	375		1.00	300.00		
3	133		0.13		60024.01	
4	3	1.03	1.03			
4	35	0.08	0.08			
4	1031	0.04	0.04			
4	375		1.00	300.00		
4	133		0.65		6002.40	
5	1031	0.02	0.02			
5	342	3.00	3.00			
5	46	1.02	1.02			
5	375		0.50	600.00		
5	133		3.46		2000.00	
6	45	1.00	1.00			
6	1031	0.46	0.46			
6	375		0.50	600.00		
6	133		0.13		20000.00	

Relación de precedencias

Actividad	Predecesoras
1	3
2	1
3	4
4	0
5	2
6	5

Características de las actividades

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	DURACIÓN MÁXIMA	DURACIÓN MÍNIMA	RETRASO PERMITIDO
1	Pavimento en concreto reforzado, con manto de polietileno No6	m2	540	20	8	10
2	Cuneta prefabricada en concreto de 0.4m de ancho	ml	415	30	10	10
3	Cajas de inspección de 0.8 x 0.8m	Und	4	5	3	10
4	Tubería novafort de 8"	ml	60	15	8	10
5	Cerramiento en malla y tubo	ml	415	20	10	10
6	Puerta en malla y tubo de 16,5m	Und	1	1	1	10

Proyecto construcción del parque Lisboa

Plazo de construcción: 104 días

Índice de oportunidad: 1%

Insumos

Código	Descripción	Unidad	Precio unitario	Tipo
23	Pasos en acero D=3/4" para pozo	Und	3500	Material
25	Base B600	M3	19500	Material
35	Arena lavada de pozo	M3	30000	Material
52	Benitin	Día	160000	Equipo
81	Cerramiento en malla eslabonada	MI	400000	Material
82	Baranda tipo M-80 H=1.00	MI	97500	Material
83	Juegos infantiles modulo tipo 3	Jg	5153000	Material
84	Juegos infantiles modulo 5 columpio 3p	Jg	1478000	Material
85	Estructura Baloncesto con tablero antib	Jg	2842000	Material
86	Ruta de vida de seis eventos en tubo gal	Und	1342000	Material
87	Marco y tapa para caja de 60 X 60	Und	80000	Material
90	Rodadura asfáltica ext y comp 1350	M3	421400	Material
91	Imprimación	M2	1000	Material
92	Tela polipropileno	MI	2583	Material
106	Bordillo prefabricado tipo A80	Und	15500	Material
115	Vara corredor de 3 metros	Und	2500	Material
123	Banca tipo M-31	Un	230000	Material
124	Canecas M120	Und	275000	Material
133	Cuadrilla general	Hra	10000	M. obra
200	Concreto en 1500 psi	M3	226800	Material
213	Geotextil NT 1800	M2	2450	Material
281	Pintura demarcación	Glb	35000	Material
295	Formaleta	M2	4000	Material
306	Ladrillo recocido	Und	195	Material
316	Geotextil T 2100	M2	2830	Material
317	Grama	M2	1800	Material
321	Gravilla de río	M3	48000	Material
342	Acero de refuerzo 60000 psi	kg	1970	Material
375	Herramienta menor	Glb	300	Herramienta
455	Mortero 1:3	M3	190000	Material
517	Puntilla	Lb	1200	Material
566	Retroexcavadora	Hra	90000	Equipo
763	Vibrocompactadora CA15	Hra	40000	Equipo
772	Volqueta	Hra	25000	Equipo

1031	Concreto 3000 psi	M3	266400	Material
1106	Subbase B400	M3	18300	Material
1110	Concreto 210 Kg/cm2	M3	266400	Material
1175	Tubería novafort 100 mm	MI	11300	Material
1188	Adoquín en ladrillo tipo tolete e=6cm	M2	15000	Material

Análisis de precios unitarios

Actividad	Cod_insumo	Cantidad de insumo	Rendimiento	Costo herramienta usada por mano de obra	Costo ordinario mano de obra por actividad	Costo ordinario maquinaria por actividad
1.01	375		2.00	150		
1.01	566		3.03			1600
1.01	772		3.03			1250.00
1.02	375		4.05	74.1		
1.02	772		15.67			925.93
1.02	133		15.67		2500.00	
1.03	375		5.00	60		
1.03	772		16.75			500.00
1.03	133		16.75		440.00	
1.04	375		2.00	150		
1.04	772		0.38			5000.00
1.04	133		0.38		10000.00	
1.05	375		1.00	300		
1.05	772		0.13			5000.00
1.05	133		0.13		10000.00	
1.06	375		1.00	300		
1.06	772		0.50			20000.00
1.06	133		0.50		33333.33	
1.07	375		1.00	300		
1.07	772		0.02			20000.00
1.07	133		0.02		50000.00	
2.01	375		1.00	300		
2.01	763		5.10			1000
2.01	25	0.325	0.33			
2.01	90	0.05	0.05			
2.01	281	0.08	0.08			
2.01	91	1	1.00			
2.01	133		5.10		2500.00	
2.02	375		1.00	300		
2.02	772		2.32			3846.15
2.02	52		2.32			2580.65
2.02	1106	0.26	0.26			

2.02	25	0.26	0.26			
2.02	321	0.165	0.17			
2.02	316	1.1	1.10			
2.02	133		2.32		5000.00	
2.03	375		1.00	300		
2.03	52		1.76			2500.00
2.03	772		1.76			3846.15
2.03	1106	0.265	0.27			
2.03	25	0.265	0.27			
2.03	321	0.165	0.17			
2.03	316	1.1	1.10			
2.03	133		1.76		5000.00	
2.04	375		1.00	300		
2.04	52		4.85			2500.00
2.04	772		4.85			4166.67
2.04	1106	0.265	0.27			
2.04	25	0.195	0.20			
2.04	35	0.1	0.10			
2.04	316	1.1	1.10			
2.04	1188	1.04	1.04			
2.04	133		4.85		8000.00	
2.05	375		1.00	300		
2.05	772		5.96			1666.67
2.05	1106	0.05	0.05			
2.05	200	0.005	0.01			
2.05	455	0.008	0.01			
2.05	106	1.25	1.25			
2.05	133		5.96		3333.33	
2.06	375		1.00	300		
2.06	1188	0.5	0.50			
2.06	1106	0.15	0.15			
2.06	133		1.22		8000.00	
2.07	375		0.50	600		
2.07	52		0.56			2500.00
2.07	772		0.56			7575.76
2.07	1106	0.37	0.37			
2.07	35	0.1	0.10			
2.07	1188	1.04	1.04			
2.07	106	2.5	2.50			
2.07	455	0.017	0.02			
2.07	25	0.21	0.21			
2.07	200	0.012	0.01			
2.07	133		0.56		16666.67	
3.01	375		1.00	300		
3.01	306	100	100.00			
3.01	455	0.06	0.06			

3.01	1110	0.15	0.15			
3.01	87	1	1.00			
3.01	133		0.08		50000.00	
3.02	375		1.00	300		
3.02	772		0.78			1250.00
3.02	1175	1.02	1.02			
3.02	133		0.78		5000.00	
3.03	375		1.00	300		
3.03	52		0.75			2500.00
3.03	772		0.75			1000.00
3.03	1110	0.105	0.11			
3.03	200	0.05	0.05			
3.03	1106	0.325	0.33			
3.03	295	0.25	0.25			
3.03	133		0.75		9523.81	
3.04	375		1.00	300		
3.04	306	400	400.00			
3.04	213	6.5	6.50			
3.04	455	0.15	0.15			
3.04	23	2	2.00			
3.04	1110	0.12	0.12			
3.04	342	45	45.00			
3.04	133		0.13		50000.00	
3.05	375		1.00	300		
3.05	306	300	300.00			
3.05	455	0.13	0.13			
3.05	1031	0.13	0.13			
3.05	133		0.17		50000.00	
4.01	375		1.00	300		
4.01	1110	0.05	0.05			
4.01	124	1	1.00			
4.01	133		0.25		10000.00	
4.02	375		1.00	300		
4.02	123	1	1.00			
4.02	1110	0.05	0.05			
4.02	133		0.58		10000.00	
4.03	83	1	1.00			
4.03	133		0.03		100000.00	
4.04	84	1	1.00			
4.04	133		0.03		100000.00	
4.05	85	1	1.00			
4.05	133		0.03		50000.00	
4.06	86	1	1.00			
5.01	375		0.50	600		
5.01	1110	0.13	0.13			
5.01	295	1	1.00			

5.01	342	8.5	8.50			
5.01	81	1	1.00			
5.01	133		0.80		12195.12	
5.02	375		1.00	300		
5.02	1110	0.065	0.07			
5.02	342	6.5	6.50			
5.02	295	0.5	0.50			
5.02	82	1	1.00			
5.02	133		0.77		8000.00	
6.01	375		1.00	300		
6.01	317	1.1	1.10			
6.01	133		3.33		1000.00	
6.02	375		1.00	300		
6.02	772		0.14			91675.83
6.02	566		0.14			257142.86
6.02	133		0.14		83333.33	
6.04	375		1.00	300		
6.04	92	1.02	1.02			
6.04	115	0.33	0.33			
6.04	517	0.2	0.20			
6.04	133		0.03		2000.00	

Relaciones de precedencia

Actividad	Predecesoras				
	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06
1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06
1.02	6.04				
1.03	6.04				
1.04	6.04				
1.05	6.04				
1.06	6.04				
1.07	6.04				
2.01	1.07				
2.02	2.05				
2.03	2.05				
2.04	2.05	3.02			
2.05	1.01				
2.06	2.04				
2.07	2.04				
3.01	3.02				
3.02	1.01				
3.03	2.04				
3.04	3.03				
3.05	2.04				
4.01	6.01				

4.02	6.01				
4.03	5.02				
4.04	5.02				
4.05	2.01				
4.06	5.02				
5.01	4.03	4.04	4.05	4.06	
5.02	2.02	2.03			
6.01	4.03	4.04	4.05	4.06	
6.02	1.01				
6.04	0				

Características de las actividades

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	UND	CANTIDAD	DURACIÓN MÁXIMA	DURACIÓN MÍNIMA	RETRASO MÁXIMO
1.01	Conformación y nivelación de terreno con retiro de sobrantes	m2	242	14	6	10
1.02	Demolición de andén en concreto, incluye cargue y retiro de escombros	m2	564	6	3	10
1.03	Demolición de bordillo en ladrillo, incluye cargue y retiro de escombros	ml	335	3	2	10
1.04	Retiro de bancas, incluye cargue y retiro	Und	3	1	1	10
1.05	Desmante de canecas, incluye cargue y retiro	Und	1	1	1	10
1.06	Desmante de juego infantil, incluye cargue y retiro	Und	4	1	1	10
1.07	Adecuación estructura cancha múltiple (incluye retiro de tablero exterior)	Jg	1	10	4	10
2.01	Recuperación con realce (en pavimento flexible sin recubrimiento con demarcación) estructura en B600 e=0.25m	m2	510	17	8	5
2.02	Piso en juegos infantiles con estructura subbase IDU gradación A-B	m2	158	12	5	5

	(B=400 de SOP incluye gravilla y geotextil)					
2.03	Piso ruta de la vida con estructura B=200 e=0.2, B=400 e=0.2, Gravilla e=0.15, Geotextil T-2100	m2	120	12	5	5
2.04	Adoquín tipo tolete para pendientes menores al 5% incluye estructura B=400 e=0.2, B=600 e=0.2, arena e=.09	m2	1008	32	20	5
2.05	Bordillo prefabricado A-80 en concreto H=0.35, incluye excavación, B=400, concreto pobre, mortero, atraque y retiro	ml	620	16	10	10
2.06	Peldaños escaleras en adoquín tolete e=0.5	ml	225	31	15	10
2.07	Rampa para discapacitados en adoquín tipo tolete, confinada con bordillos en concreto	m2	18	5	3	5
3.01	Caja de inspección 60 X 60 (incluye excavación)	Und	2	4	2	10
3.02	Tubería en PVC, 110mm alcantarillado tipo Fort (incluye accesorios, excavación y relleno)	ml	25	5	3	10
3.03	Cuneta trapezoidal, andén en concreto reforzado de 3000psi, fundido en sitio e=0.1 A=1.0 (inc. exc. Conc. Pob)	ml	30	7	3	10
3.04	Realce pozo de inspección Diam. 1.2m	Und	1	1	1	10
3.05	Realce caja doble de energía de 1.2 X 0.6 m	Und	2	2	1	10
4.01	Suministro e instalación de canecas M-12	Und	3	2	1	10
4.02	Suministro e instalación de bancas prefabricadas en concreto M-31, sin	Und	7	2	1	10

	espaldar					
4.03	Suministro e instalación de juegos infantiles modulo tipo 3	Jg	1	6	3	10
4.04	Suministro e instalación de juegos infantiles modulo tipo 5, columpio 3 puestos	Jg	1	6	3	10
4.05	Suministro e instalación estructura baloncesto con tablero antibandalico	Jg	1	6	3	10
4.06	Suministro e instalación ruta de la vida de seis eventos en tubo galvanizado, según especificación técnica, incluye señalización	Und	1	6	3	10
5.01	Cerramiento H=5.00 m, malla eslabonada, estructura en tubo galvanizado de 3, e=3.81 viga de 40 X 30	ml	32	7	3	10
5.02	Baranda para área de juegos infantiles tipo M-80, H=1.00 con viga perimetral en concreto de 3000 psi	ml	77	15	10	10
6.01	Empradización zona a recuperar	m2	200	10	5	10
6.02	Transplante y bloqueo de árboles de 5.00m a 10.00 m	Und	4	5	2	10
6.04	Cerramiento en polipropileno H=2.00m	ml	1	5	3	5

Proyecto de construcción de la escombrera “Guadalcanal”

Plazo de construcción: 156 días

Índice de oportunidad 1%

Insumos

Código	Descripción	Unidad	Precio unitario	Tipo
289	Acarreo horizontal	Glb	5000	Equipo
342	Acero de refuerzo 60000 psi	Kg	1970	Material
298	Afirmado	m3	15000	Material
42	Afirmado de Combia	m3	10000	Material
293	Agua	Lt	4	Material
22	Alambre negro No 18	Kg	2401	Material
18	Amarra para teja A.C	Und	150	Material
172	Aro tapa en hierro gris	Und	110000	Material
53	Canguro	Dia	30000	Equipo
182	Cemento gris	Kg	400	Material
198	Comisión topográfica	Dia	80000	Equipo
202	Concreto 2500 psi	m3	263088	Material
203	Concreto 3000 psi	m3	274340	Material
264	Concreto simple de 27.6 Mpa	m3	194750	Material
376	Cuadrilla general	Hra	10000	M. obra
303	Entibados en madera H=4m	m2	20000	Material
141	Equipo topográfico	día	40000	Equipo
140	Estacas	Glb	250	Material
6	Esterilla de 3 x 0.25 m	Und	1800	Material
295	Formaleta	m2	3000	Material
288	Gafas protectoras sencillas	Und	7500	Material
302	Geotextil NT 2100	m2	3400	Material
323	Gravilla	m3	22000	Material
299	Gravilla 3/4" a 2"	m3	30000	Material
5	Guadua sobrepasa x 3m	Und	2000	Material
375	Herramienta menor	Glb	500	Herramienta
306	Ladrillo recocido	Und	200	Material
292	Lechada de cemento	Lt	300	Material
290	Mezcladora de un saco	Dia	30000	Equipo
455	Mortero 1:3	m3	190000	Material
148	Motoniveladora	hr	40000	Equipo
287	Paso escalera de gato 3/4 x 1m	Und	4500	Material
67	Piedra media zonga	m3	25000	Material
990	Pintura esmalte	Glb	38500	Material
7	Puntilla	Lb	1705	Material

566	Retroexcavadora	Hra	80000	Equipo
237	Tapa cámara alcantarilla A&A + Aro Manhole	Und	147215	Material
135	Teja de zinc No 10	Und	14000	Material
291	Transporte de material	m3	10000	Material
300	Tubería de concreto reforzado de 40"	ml	400000	Material
301	Tubería de concreto reforzado de 48"	ml	580000	Material
256	Tubo concreto reforzado de 27"	ml	175000	Material
39	Valla informativa	m2	51400	Material
1328	Vibrador	Día	18000	Equipo
763	Vibrocompactador	Día	30000	Equipo

Análisis de precios unitarios

Actividad	Cod insumo	Cantidad de insumo	Rendimiento	Costo herramienta usada por obra	Costo ordinario de mano obra por actividad	Costo ordinario de maquinaria por actividad
1.01	202	0.08	0.08			
1.01	135	0.60	0.60			
1.01	5	0.80	0.80			
1.01	7	0.20	0.20			
1.01	22	0.19	0.19			
1.01	6	3.50	3.50			
1.01	18	2.00	2.00			
1.01	375		1.00	499.0		
1.01	376		0.83		12500.00	
1.02	288	0.02	0.02			
1.02	375		0.21	2379.8		
1.02	376		0.28		83682.01	
1.02	289		0.28			2742.13
1.03	990	0.00199	0.00199			
1.03	7	0.02	0.02			
1.03	140	0.20	0.20			
1.03	375		7.00	71.4		
1.03	141		11.67			400.00
1.03	376		11.67		100.00	
1.03	198		11.67			800.00
1.04	39	1.00	1.00			
1.04	375		1.00	500.0		
1.04	376		0.25		8000.00	
1.05	375		9.52	52.5		
1.05	376		80.33		312.50	
1.05	289		80.33			100.00
1.06	375		1.00	500.0		

1.06	376		0.32		8000.00	
1.06	289		0.32			3292.94
2.01	375		5.74	87.1		
2.01	566		33.93			1454.55
2.01	376		33.93		333.33	
2.02	375		1.00	500.0		
2.02	376		12.86		10000.00	
2.02	289		12.86			1100.01
2.03	375		0.33	1533.3		
2.03	376		6.79		12500.00	
2.03	289		6.79			1666.67
2.04	53		4.98			1999.80
2.04	375		1.00	500.0		
2.04	376		4.98		8000.00	
2.05	375		5.00	100.0		
2.05	566		3.75			3200.00
2.05	376		3.75		468.00	
2.06	42	1.25	1.25			
2.06	182	100.00	100.00			
2.06	293	100.00	100.00			
2.06	292	23.00	23.00			
2.06	291	1.00	1.00			
2.06	375		1.11	450.0		
2.06	763		0.58			3000.00
2.06	290		0.58			500.00
2.06	376		0.58		12000.48	
2.06	289		0.58			250.00
2.07	67	1.05	1.05			
2.07	375		0.10	5000.0		
2.07	376		0.71		25969.30	
3.01	203	0.27	0.27			
3.01	342	35.20	35.20			
3.01	22	1.50	1.50			
3.01	375		1.00	500.0		
3.01	376		0.01		25000.00	
3.02	287	1.00	1.00			
3.02	375		1.51	331.1		
3.02	376		0.13		2000.00	
3.03	203	1.05	1.05			
3.03	342	50.00	50.00			
3.03	22	2.00	2.00			
3.03	295	6.67	6.67			
3.03	375		0.95	529.1		
3.03	376		0.06		65997.89	
3.04	237	1.00	1.00			
3.04	375		1.00	500.0		

3.04	376		0.04		10000.00	
3.05	256	1.01	1.01			
3.05	375		0.86	583.3		
3.05	566		0.81			10490.70
3.05	376		0.81		12500.00	
4.01	264	1.00	1.00			
4.01	375		2.00	250.0		
4.01	376		0.81		20000.00	
4.02	203	1.02	1.02			
4.02	295	8.00	8.00			
4.02	375		0.98	510.4		
4.02	1328		0.08			1200.00
4.02	376		0.08		65573.77	

Relación de precedencias

Actividad	Predecesoras				
1.01					
1.02					
1.03	1.05				
1.04					
1.05					
1.06	1.03				
2.01	1.03				
2.02	1.03				
2.03	1.03				
2.04	4.01				
2.05	4.01				
2.06	1.06	2.01	2.02	2.03	
2.07	2.06				
3.01	3.05				
3.02	3.03				
3.03	3.01				
3.04	4.02				
3.05	2.07				
4.01	3.05				
4.02	3.02				

Características de las actividades

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	DURACIÓN MÁXIMA	DURACIÓN MÍNIMA
-----------	-------------	--------	----------	-----------------	-----------------

1.01	Campamento esterilla + teja zinc+ piso	m2	30	6	3
1.02	Demolición concreto simple man	m3	10	6	3
1.03	Localización y replanteo obra	m2	280	4	2
1.04	Valla informativa instalada	m2	2	1	1
1.05	Limpieza y rocería de superficies	m2	4820	8	4
1.06	Manejo temporal aguas negras brecha	ml	90	30	20
2.01	Excavación material común abierto Mec.	m3	9500	30	20
2.02	Excavacion material común seco H=2m man	m3	3600	30	20
2.03	Excavacion material común seco H=2-4m man	m3	1900	30	20
2.04	Lleno compactado material sitio man	m3	1394	30	20
2.05	Lleno material común mecánico	m3	1200	40	20
2.06	Afirmado + cemento 5% peso	m3	115	25	15
2.07	Enrocado	m3	170	30	20
3.01	Base y canuela cámara de inspección	Und	1	15	6
3.02	Escalera gato 3/4 L=1m	Und	20	25	10

3.03	Caja inspección D=1.5m + refuerzo	Und	10	25	10
3.04	Tapa cámara alcantarilla + aro manhole	Und	1	4	2
3.05	Tubería en concreto reforzado 27"	ml	195	30	20
4.01	Concreto simple 27.6 Mpa para anclajes	m3	195	30	20
4.02	Muro concreto reforzado para caja	m3	20	30	20

ANEXO 2

Gastos administrativos para adecuación y construcción de lotes de Automotriz Interamericana

Ocupación/Razón	Gasto mensual	Dedicación/Cantidad	Total
Director de obra	\$ 4,000,000	50%	\$ 2,000,000
Residente	\$ 3,000,000	100%	\$ 3,000,000
Almacenista	\$ 1,000,000	100%	\$ 1,000,000
Secretaria	\$ 800,000	20%	\$ 160,000
Mensajero	\$ 800,000	20%	\$ 160,000
Celador	\$ 1,000,000	2	\$ 2,000,000
Campamento	\$ 2,000,000	1	\$ 2,000,000
Baño móvil	\$ 300,000	2	\$ 600,000
Teléfono	\$ 300,000	1	\$ 300,000
Agua y luz	\$ 300,000	1	\$ 300,000
Papelería	\$ 300,000	1	\$ 300,000
Legalización y Pólizas	\$ 1,000,000	1	\$ 1,000,000
Transportes	\$ 500,000	1	\$ 500,000
Total			\$ 13,320,000

Gastos administrativos para construcción del parque urbano. “Parque Lisboa”

Ocupación/Razón	Gasto mensual	Dedicación/Cantidad	Total
Director de obra	\$ 4,000,000	50%	\$ 2,000,000
Residente	\$ 3,000,000	100%	\$ 3,000,000
Almacenista	\$ 1,000,000	100%	\$ 1,000,000
Secretaria	\$ 800,000	40%	\$ 320,000
Mensajero	\$ 800,000	20%	\$ 160,000
Celador	\$ 1,000,000	2	\$ 2,000,000
Campamento	\$ 1,000,000	1	\$ 1,000,000
Baño móvil	\$ 300,000	2	\$ 600,000
Teléfono	\$ 300,000	1	\$ 300,000
Agua y luz	\$ 300,000	1	\$ 300,000
Papelería	\$ 300,000	1	\$ 300,000
Legalización y Pólizas	\$ 1,000,000	1	\$ 1,000,000
Transportes	\$ 500,000	1	\$ 500,000
Total			\$ 12,480,000

Gastos administrativos para construcción de escombrera “Guadalcanal”

Ocupación/Razón	Gasto mensual	Dedicación/Cantidad	Total
Director de obra	\$ 4,000,000	50%	\$ 2,000,000
Residente	\$ 3,000,000	100%	\$ 3,000,000
Almacenista	\$ 1,000,000	100%	\$ 1,000,000
Secretaria	\$ 800,000	20%	\$ 160,000
Mensajero	\$ 800,000	20%	\$ 160,000
Celador	\$ 1,000,000	2	\$ 2,000,000
Campamento	\$ 2,000,000	1	\$ 2,000,000
Baño móvil	\$ 300,000	2	\$ 600,000
Teléfono	\$ 300,000	1	\$ 300,000
Agua y luz	\$ 300,000	1	\$ 300,000
Papelería	\$ 300,000	1	\$ 300,000
Legalización y Pólizas	\$ 1,000,000	1	\$ 1,000,000
Transportes	\$ 500,000	1	\$ 500,000
Total			\$ 13,320,000

ANEXO 3

Detalle de los costos directos del experimento controlado.

Actividad 1:

Cantidad: $Q_a = 540 \text{ m}^2$

Duración: $d_a = 11 \text{ días}$

Mano de obra:

- Código insumo: 133

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{540}{11} * \frac{1/8}{4.82} = 1.27$$

Ecuación 31

$$V_k = \$7147$$

$$\text{Costo} = m_{a,k} * V_k * Q_a = 1.27 * 7147 * 540 = \$4'901.412$$

Ecuación 32

Costo Material:

- Código insumo: 44

$$D_{j,a} = 1.1 \text{ m}^2$$

$$U_j = \$800$$

$$\text{Costo} = D_{j,a} * U_j * Q_a = 1.1 * 800 * 540 = \$475.200$$

Ecuación 33

- Código insumo: 295

$$D_{j,a} = 0.25m^2$$

$$U_j = \$4000$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.25 * 4000 * 540 = \$540.000$$

Ecuación 34

- Código insumo: 39

$$D_{j,a} = 0.85ml$$

$$U_j = \$450$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.85 * 450 * 540 = \$206.550$$

Ecuación 28

- Código insumo: 37

$$D_{j,a} = 0.0033can$$

$$U_j = \$697.798$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.0033 * 697798 * 540 = \$1'243476$$

Ecuación 35

- Código insumo: 30

$$D_{j,a} = 0.16m^3$$

$$U_j = \$275152$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.16 * 275152 * 540 = \$23'773132$$

Ecuación 36

- Código insumo: 342

$$D_{j,a} = 0.61Kg$$

$$U_j = \$1800$$

$$\text{Costo} = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.61 * 1800 * 540 = \$592.520$$

Ecuación 37

- Código insumo: 4

$$D_{j,a} = 4.38\text{Kg}$$

$$U_j = \$2200$$

$$\text{Costo} = D_{j,a} * U_j * Q_a = 4.38 * 2200 * 540 = \$5'203.440$$

Ecuación 38

- Costo total insumos

$$\sum D_{j,a} * U_j * Q_a = \$32'034.318$$

Ecuación 39

Equipo:

- Código insumo: 38

$$l_{a,e} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{Y_{e,a}} = \frac{540}{11} * \frac{1/8}{4.82} = 1.27$$

Ecuación 40

$$L_e = \$1200$$

$$\text{Costo} = l_{a,e} * L_e * Q_a = 1.27 * 1200 * 540 = \$822.960$$

Ecuación 41

- Código insumo: 40

$$l_{a,e} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{Y_{e,a}} = \frac{540}{11} * \frac{1/8}{4.82} = 1.27$$

Ecuación 42

$$L_e = \$1000$$

$$\text{Costo} = l_{a,e} * L_e * Q_a = 1.27 * 1000 * 540 = \$685.800 \quad \text{Ecuación 43}$$

- Costo total equipo

$$\sum l_{a,e} * L_e * Q_a = \$1'508.760 \quad \text{Ecuación 44}$$

Herramienta:

- Código insumo: 375

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{540}{11} * \frac{1/8}{4.82} = 1.27 \quad \text{Ecuación 45}$$

$$X_{h,k,a} = \$760$$

$$\text{Costo} = m_{a,k} * X_{h,k,a} * Q_a = 1.27 * 760 * 540 = \$521.208 \quad \text{Ecuación 46}$$

Total actividad 1:

$$\text{Mano de obra} + \text{Materiales} + \text{Equipo} + \text{Herramienta} = \$38'965.698$$

Periodo en el que se ejecuta

Según los días de inicio y finalización, la actividad genera costos en el primer y el segundo mes de la siguiente manera:

Día de inicio: 25

Día finalización: 35

Día final del primer periodo: 26

$$\text{Proporción al primer periodo: } \frac{26 - 25 + 1}{11} = 0.18 \quad \text{Ecuación 47}$$

$$\text{Proporción al segundo periodo: } \frac{35 - 26}{11} = 0.82 \quad \text{Ecuación 48}$$

$$\text{Costo asociado al primer mes: } 0.18 * 38965698 = \$7'013.825,64 \quad \text{Ecuación 49}$$

$$\text{Costo asociado al segundo mes: } 0.82 * 38965698 = \$31'951.872,36 \quad \text{Ecuación 50}$$

Actividad 2:

Cantidad: $Q_a = 415$ ml

Duración: $d_a = 22$ días

Mano de obra:

- Código insumo: 133

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{415}{22} * \frac{1/8}{2.59} = 0.9 \quad \text{Ecuación 51}$$

$$V_k = \$5000$$

$$\text{Costo} = m_{a,k} * V_k * Q_a = 0.91 * 5000 * 415 = \$1'867.500 \quad \text{Ecuación 52}$$

Costo Material:

- Código insumo: 295

$$D_{j,a} = 1m2$$

$$U_j = \$4000$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 1 * 4000 * 415 = \$1'660.000$$

Ecuación 53

- Código insumo: 1031

$$D_{j,a} = 0.07m3$$

$$U_j = \$268.192$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.07 * 268192 * 415 = \$7'790.977$$

Ecuación 54

- Costo total insumos

$$\sum D_{j,a} * U_j * Q_a = \$9'450977$$

Ecuación 55

Herramienta:

- Código insumo: 375

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{415}{22} * \frac{1/8}{2.59} = 0.9$$

Ecuación 56

$$X_{h,k,a} = \$600$$

$$Costo = m_{a,k} * X_{h,k,a} * Q_a = 0.9 * 600 * 415 = \$224100$$

Ecuación 57

Total actividad 2:

Mano de obra + Materiales + Equipo + Herramienta = \$11'542.577

Periodo en el que se ejecuta

Según los días de inicio y finalización, la actividad genera costos en el segundo y el tercer mes de la siguiente manera:

Día de inicio: 37

Día finalización: 58

Día final del segundo periodo: 52

$$\text{Proporción al primer periodo: } \frac{52 - 37 + 1}{22} = 0.72 \quad \text{Ecuación 58}$$

$$\text{Proporción al segundo periodo: } \frac{58 - 52}{22} = 0.28 \quad \text{Ecuación 59}$$

$$\text{Costo asociado al segundo mes: } 0.72 * \$11542.577 = \$8'310.655,44 \quad \text{Ecuación 60}$$

$$\text{Costo asociado al tercer mes: } 0.28 * \$11542.577 = \$3'231.921,56 \quad \text{Ecuación 61}$$

Actividad 3:

Cantidad: $Q_a = 4$ Und

Duración: $d_a = 4$ días

Mano de obra:

- Código insumo: 133

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{4}{4} * \frac{1/8}{.13} = 0.96$$

Ecuación 62

$$V_k = \$60.024$$

$$\text{Costo} = m_{a,k} * V_k * Q_a = 0.96 * 60024 * 4 = \$230.492$$

Ecuación 63

Costo Material:

- Código insumo: 1031

$$D_{j,a} = 0.06m^3$$

$$U_j = \$268192$$

$$\text{Costo} = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.06 * 268192 * 4 = \$64.366$$

Ecuación 64

- Código insumo: 306

$$D_{j,a} = 148Und$$

$$U_j = \$220$$

$$\text{Costo} = D_{j,a} * U_j * Q_a = 148 * 220 * 4 = \$130240$$

Ecuación 65

- Código insumo: 455

$$D_{j,a} = 0.11m^3$$

$$U_j = \$190000$$

$$\text{Costo} = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.11 * 190000 * 4 = \$83600$$

Ecuación 66

- Código insumo: 5

$$D_{j,a} = 1Und$$

$$U_j = \$160.000$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 1 * 160000 * 4 = \$640000 \quad \text{Ecuación 67}$$

- Costo total insumos

$$\sum D_{j,a} * U_j * Q_a = \$918.206 \quad \text{Ecuación 68}$$

Herramienta:

- Código insumo: 375

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{4}{4} * \frac{1/8}{.13} = 0.96 \quad \text{Ecuación 69}$$

$$X_{h,k,a} = \$300$$

$$Costo = m_{a,k} * X_{h,k,a} * Q_a = 0.96 * 300 * 4 = \$1152 \quad \text{Ecuación 70}$$

Total actividad 3:

$$Mano de obra + Materiales + Equipo + Herramienta = \$1'149850$$

Periodo en el que se ejecuta

Según los días de inicio y finalización, la actividad genera costos en el primer mes

Día de inicio: 16

Día finalización: 19

Costo asociado al primer mes: \$1'149850

Ecuación 71

Actividad 4:

Cantidad: $Q_a = 60$ ml

Duración: $d_a = 10$ días

Mano de obra:

- Código insumo: 133

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{60}{10} * \frac{1/8}{0.65} = 1.15$$

Ecuación 72

$$V_k = \$6002.5$$

$$\text{Costo} = m_{a,k} * V_k * Q_a = 1.15 * 6002.4 * 60 = \$414.165$$

Ecuación 73

Costo Material:

- Código insumo: 3

$$D_{j,a} = 1.03 \text{ml}$$

$$U_j = \$29928$$

$$\text{Costo} = D_{j,a} * U_j * Q_a = 1.03 * 29928 * 60 = \$1'849550$$

Ecuación 74

- Código insumo: 35

$$D_{j,a} = 0.08m^3$$

$$U_j = \$30000$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.08 * 30000 * 60 = \$144000$$

Ecuación 75

- Código insumo: 1031

$$D_{j,a} = 0.04m^3$$

$$U_j = \$268192$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.04 * 268192 * 60 = \$643660$$

Ecuación 76

- Costo total insumos

$$\sum D_{j,a} * U_j * Q_a = \$2'637210$$

Ecuación 77

Herramienta:

- Código insumo: 375

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{60}{10} * \frac{1/8}{0.65} = 1.15$$

Ecuación 78

$$X_{h,k,a} = \$300$$

$$Costo = m_{a,k} * X_{h,k,a} * Q_a = 1.15 * 300 * 60 = \$20700$$

Ecuación 79

Total actividad 4:

Mano de obra + Materiales + Equipo + Herramienta = \$3'072075

Periodo en el que se ejecuta

Según los días de inicio y finalización, la actividad genera costos en el primer mes

Día de inicio: 6

Día finalización: 15

Costo asociado al primer mes: \$3'072075

Ecuación 80

Actividad 5:

Cantidad: $Q_a = 415$ ml

Duración: $d_a = 16$ días

Mano de obra:

- Código insumo: 133

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{415}{16} * \frac{1/8}{3.46} = 0.94$$

Ecuación 81

$$V_k = \$2000$$

$$\text{Costo} = m_{a,k} * V_k * Q_a = 0.94 * 2000 * 415 = \$780200$$

Ecuación 82

Costo Material:

- Código insumo: 1031

$$D_{j,a} = 0.02m^3$$

$$U_j = \$268192$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.02 * 268192 * 415 = \$2225993$$

Ecuación 83

- Código insumo: 342

$$D_{j,a} = 3Kg$$

$$U_j = \$1800$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 3 * 1800 * 415 = \$2'241.000$$

Ecuación 84

- Código insumo: 46

$$D_{j,a} = 1.02ml$$

$$U_j = \$140000$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 1.02 * 140000 * 415 = \$59'262000$$

Ecuación 85

- Costo total insumos

$$\sum D_{j,a} * U_j * Q_a = \$63'728.993$$

Ecuación 86

Herramienta:

- Código insumo: 375

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{415}{16} * \frac{1/8}{3.46} = 0.94$$

Ecuación 87

$$X_{h,k,a} = \$600$$

$$\text{Costo} = m_{a,k} * X_{h,k,a} * Q_a = 0.94 * 600 * 415 = \$234060$$

Ecuación 88

Total actividad 5:

$$\text{Mano de obra} + \text{Materiales} + \text{Equipo} + \text{Herramienta} = \$64'743253$$

Periodo en el que se ejecuta

Según los días de inicio y finalización, la actividad genera costos en el tercer mes

Día de inicio: 63

Día finalización: 78

Costo asociado al tercer mes: \$64'743253

Ecuación 89

Actividad 6:

Cantidad: $Q_a = 1$ Und

Duración: $d_a = 1$ día

Mano de obra:

- Código insumo: 133

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{1}{1} * \frac{1/8}{0.125} = 1$$

Ecuación 90

$$V_k = \$20000$$

$$\text{Costo} = m_{a,k} * V_k * Q_a = 1 * 20000 * 1 = \$20000$$

Ecuación 91

Costo Material:

- Código insumo: 1031

$$D_{j,a} = 0.46m^3$$

$$U_j = \$268192$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = 0.46 * 268192 * 1 = \$123368$$

Ecuación 92

- Código insumo: 45

$$D_{j,a} = 1Und$$

$$U_j = \$4856032$$

$$Costo = D_{j,a} * U_j * Q_a = \$4'856.032$$

Ecuación 93

- Costo total insumos

$$\sum D_{j,a} * U_j * Q_a = \$4'979400$$

Ecuación 94

Herramienta:

- Código insumo: 375

$$m_{a,k} = \frac{Q_a}{d_a} * \frac{1/8}{R_{k,a}} = \frac{1}{1} * \frac{1/8}{0.125} = 1$$

Ecuación 95

$$X_{h,k,a} = \$600$$

$$\text{Costo} = m_{a,k} * X_{h,k,a} * Q_a = \$600$$

Ecuación 96

Total actividad 5:

$$\text{Mano de obra} + \text{Materiales} + \text{Equipo} + \text{Herramienta} = \$ 5'000.000$$

Periodo en el que se ejecuta

Según los días de inicio y finalización, la actividad genera costos en el cuarto mes

Día de inicio: 87

Día finalización: 87

Costo asociado al tercer mes: \$ 5'000.000

Ecuación 97

ANEXO 4

Parque Lisboa

Corrección de duraciones con una probabilidad del 90%

Actividad	Duración máxima	Duración mínima	Duración más probable	Valor esperado	Variancia	Desviación estándar	Tiempo a cortar	Nuevo máximo	Nuevo mínimo
1.01	14	6	12	12.00	1.78	1.33	2	12	8
1.02	6	3	5	5.00	0.25	0.50	0	6	3
1.03	3	2	3	3.00	0.03	0.17	0	3	2
1.04	1	1	1	1.00	0.00	0.00	0	1	1
1.05	1	1	1	1.00	0.00	0.00	0	1	1
1.06	1	1	1	1.00	0.00	0.00	0	1	1
1.07	10	4	7	7.00	1.00	1.00	1	9	5
2.01	17	8	14	14.00	2.25	1.50	2	15	10
2.02	12	5	10	10.00	1.36	1.17	1	11	6
2.03	12	5	10	10.00	1.36	1.17	1	11	6
2.04	32	20	25	26.00	4.00	2.00	3	29	23
2.05	16	10	13	13.00	1.00	1.00	1	15	11
2.06	31	15	25	25.00	7.11	2.67	4	27	19
2.07	5	3	4	4.00	0.11	0.33	0	5	3
3.01	4	2	3	3.00	0.11	0.33	0	4	2
3.02	5	3	4	4.00	0.11	0.33	0	5	3
3.03	7	3	5	5.00	0.44	0.67	1	6	4
3.04	1	1	1	1.00	0.00	0.00	0	1	1
3.05	2	1	2	2.00	0.03	0.17	0	2	1
4.01	2	1	2	2.00	0.03	0.17	0	2	1
4.02	2	1	2	2.00	0.03	0.17	0	2	1
4.03	6	3	5	5.00	0.25	0.50	0	6	3
4.04	6	3	5	5.00	0.25	0.50	0	6	3
4.05	6	3	5	5.00	0.25	0.50	0	6	3
4.06	6	3	5	5.00	0.25	0.50	0	6	3
5.01	7	3	5	5.00	0.44	0.67	1	6	4
5.02	15	10	14	14.00	0.69	0.83	1	14	11
6.01	10	5	8	8.00	0.69	0.83	1	9	6
6.02	5	2	4	4.00	0.25	0.50	0	5	2
6.04	5	3	4	4.00	0.11	0.33	0	5	3

Construcción escombrera “Guadalcanal”

Corrección de duraciones con una probabilidad del 90%

Actividad	Duración máxima	Duración mínima	Duración más probable	Valor esperado	Variancia	Desviación estándar	Tiempo a cortar	Nuevo máximo	Nuevo mínimo
1.01	6	3	5	6	0.25	0.50	0	6	3
1.02	6	3	5	6	0.25	0.50	0	6	3
1.03	4	2	4	4	0.11	0.33	0	4	2
1.04	1	1	1	1	0.00	0.00	0	1	1
1.05	8	4	7	7	0.44	0.67	1	7	5
1.06	30	20	28	27	2.78	1.67	2	28	22
2.01	30	20	28	27	2.78	1.67	2	28	22
2.02	30	20	28	27	2.78	1.67	2	28	22
2.03	30	20	28	27	2.78	1.67	2	28	22
2.04	30	20	28	27	2.78	1.67	2	28	22
2.05	40	20	36	34	11.11	3.33	5	35	25
2.06	25	15	23	22	2.78	1.67	2	23	17
2.07	30	20	28	27	2.78	1.67	2	28	22
3.01	15	6	13	13	2.25	1.50	2	13	8
3.02	25	10	22	21	6.25	2.50	4	21	14
3.03	25	10	22	21	6.25	2.50	4	21	14
3.04	4	2	4	4	0.11	0.33	0	4	2
3.05	30	20	28	27	2.78	1.67	2	28	22
4.01	30	20	28	27	2.78	1.67	2	28	22
4.02	30	20	28	27	2.78	1.67	2	28	22

ANEXO 5

A continuación se presenta el código del algoritmo genético en lenguaje Microsoft Excel Visual Basic

```
.....  
'Genera una Poblacion inicial:  
'Selecciona los Nind mejores cromosomas de la Hoja Resultados_Previos  
'y los copia en la Hoja Poblacion  
.....  
Public Sub PobIni_ResHistoric1()  
  
    Dim Tpob, Nact, fila, Nind, aux, j, Ngenes, Tpobv  
    Dim Xp As Single  
    Dim i  
    Dim Elite() As Integer 'Vector en el que se guardan las posiciones  
        'de los Nind individuos seleccionados  
    Tpob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamaño Poblacion  
    Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Número Actividades  
    Ngenes = Nact * 2 'Número de genes  
    Nind = Tpob 'Número de Individuos a copiar  
  
    'Cuenta cuantos individuos hay en la hoja Resultados_Previos  
    j = 1  
    While (Not (IsEmpty(Worksheets("Resultados_Previos").Cells(1, j))))  
        Tpobv = j  
        j = j + 1  
    Wend
```

```

ReDim Elite(Tpobv) 'Cambio de tamaño según Tamaño Población

'Inicialización vector Elite
For i = 1 To Tpobv
    Elite(i) = i
Next i

'Ordenar para escoger los mejores Nind individuos de la población
For i = 1 To Nind
    For j = i + 1 To Tpobv
        If (Worksheets("Resultados_Previos").Cells(1, Elite(i)) <
Worksheets("Resultados_Previos").Cells(1, Elite(j))) Then
            aux = Elite(i): Elite(i) = Elite(j): Elite(j) = aux
        End If
    Next j
Next i

Worksheets("Población").Range("A1:AZ10000").ClearContents

'Copiar los Nind individuos a la hoja Pob_Intermedia
For i = 1 To Nind 'Recorre el vector Elite

    For fila = 1 To (Ngenes + 2) Step 2 'Recorre la hoja Pob_Intermedia
        'Copia el individuo en la posición Elite (i)
        'de la Hoja Poblacion a la Hoja Pob_Intermedia
        Worksheets("Población").Cells(fila, i).Value =
Worksheets("Resultados_Previos").Cells(fila, Elite(i)).Value
        Worksheets("Población").Cells(fila + 1, i).Value =
Worksheets("Resultados_Previos").Cells(fila + 1, Elite(i)).Value
    Next fila

```

```
Next i
End Sub
```

```
.....
'Genera una Poblacion Inicial con Numeros Aleatorios en la Hoja Población
.....
Public Sub PobIni_Aleatorio()
```

```
Dim Tprob, Nact, fila, col, act, Li, Ls, D, R, RM As Integer
```

```
Tprob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamaño Poblacion
Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Número Actividades
Ngenes = Nact * 2 'Número de genes
```

```
Randomize
```

```
Worksheets("Población").Range("A1:AZ10000").ClearContents
```

```
'Crea la Poblacion Inicial en la Hoja Población
For col = 1 To Tprob 'Recorre la Hoja Actividades
```

```
act = 2
```

```
For fila = 3 To (Ngenes + 2) Step 2 'Recorre la Hoja Población
```

```
'Obtiene la Dur max y min de las actividades y retraso maximo
Li = Worksheets("Actividades").Cells(act, 6).Value 'duracion minima
Ls = Worksheets("Actividades").Cells(act, 5).Value 'duracion maxima
RM = Worksheets("Actividades").Cells(act, 7).Value 'retraso maximo
act = act + 1
```

'Asigna la duración y retraso para cada actividad

$D = \text{Int}((L_s - L_i + 1) * \text{Rnd} + L_i)$

Worksheets("Población").Cells(fila, col).Value = D

$R = \text{Int}(\text{Rnd} * \text{RM})$ 'ojo: aqui se modifica el rango de las holguras

Worksheets("Población").Cells(fila + 1, col).Value = R

Next fila

Next col

End Sub

.....

'Genera una Población Inicial con Dur aleatoria y retraso = 0 en la Hoja Población

.....

Public Sub PobIni_Retraso0()

Dim Tpob, Nact, fila, col, act, Li, Ngenes, Ls, D As Integer

Tpob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamaño Poblacion

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Número Actividades

Ngenes = Nact * 2 'Número de genes

Randomize

Worksheets("Población").Range("A1:AZ10000").ClearContents

'Crea la Poblacion Inicial en la Hoja Población

For col = 1 To Tpob 'Recorre la Hoja Actividades

act = 2

For fila = 3 To (Ngenes + 2) Step 2 'Recorre la Hoja Población

```
'Obtiene la Dur max y min de las actividades
Li = Worksheets("Actividades").Cells(act, 6).Value
Ls = Worksheets("Actividades").Cells(act, 5).Value
act = act + 1
'Asigna la duración y retraso para cada actividad
D = Int((Ls - Li + 1) * Rnd + Li)
Worksheets("Población").Cells(fila, col).Value = D
Worksheets("Población").Cells(fila + 1, col).Value = 0
```

Next fila

Next col

End Sub

.....

```
'Selecciona individuos aleatoriamente de la hoja Población y copia la posición
'de los seleccionados en la hoja Pob_Intermedia
```

.....

Public Sub Selección_Aleatoria()

Dim Tpob, Pos, CS, Nhijos, Nhr, Ppr As Integer

```
Tpob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamaño Población
Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'cantidad de hijos por generación
Nhr = Worksheets("Control").Cells(8, 2).Value 'cantidad de hijos por recombinación
Ppr = Worksheets("Control").Cells(16, 2).Value 'cantidad de padres por recombinación
```

```

CS = (Nhijos / Nhr + 1) * Ppr 'cantidad de padres a seleccionar
Worksheets("Pob_intermedia").Range("A1:A1000").ClearContents
Randomize
For i = 1 To CS
  If i = 1 Then 'cuando selecciona el primero
    Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(i, 1).Value = Int((Tpob - 1) * Rnd + 1)
  End If
  If i = 2 Then 'cuando selecciona el segundo
    Pos = Int((Tpob - 1) * Rnd + 1)
    If Pos <> Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(i, 1).Value Then
      Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(i, 1).Value = Pos
    Else
      i = i - 1
    End If
  End If
  If i > 2 Then 'cuando selecciona del tercero en adelante
    Pos = Int((Tpob - 1) * Rnd + 1)
    If Pos <> Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(i - 1, 1).Value And Pos <>
Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(i - 2, 1).Value Then
      Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(i, 1).Value = Pos
    Else
      i = i - 1
    End If
  End If
Next i

End Sub

```

.....

'Selección Escalonada:

'Organiza los individuos, traza una recta entre el ind con menor aptitud y el ind
'con mayor aptitud; luego prolonga la aptitud de cada individuo hasta la recta

Public Sub Selección_Escalonada()

Dim Tpob, Nact, fila, Nind, i, poss, Ngenes, Nhijos, Nhr, Ppr, CS As Integer

Dim Vect() As Single 'Vector en el que se guardan los rangos

'de aptitud de los individuos

Dim Pos() As Integer 'Guarda las posiciones de los individuos seleccionados

Dim Sapt, Rand As Single

Dim Elite() As Integer 'Vector en el que se guardan las posiciones

'de los Nind individuos seleccionados

Tpob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamaño Poblacion

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Número Actividades

Ngenes = Nact * 2 'Número de genes

Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'cantidad de hijos por generación

Nhr = Worksheets("Control").Cells(8, 2).Value 'cantidad de hijos por recombinacion

Ppr = Worksheets("Control").Cells(16, 2).Value 'cantidad de padres por recombinación

CS = (Nhijos / Nhr + 1) * Ppr 'cantidad de padres a seleccionar

Worksheets("Pob_intermedia").Range("A1:A1000").ClearContents

ReDim Vect(Tpob) 'Cambio de tamaño según Tamaño Población

ReDim Pos(CS) 'Cambio de tamaño según cantidad de padres a seleccionar

ReDim Elite(Tpob) 'Cambio de tamaño según Tamaño Población

'Inicialización vector Elite

For i = 1 To Tpob

Elite(i) = i

Next i

```

'Ordena los individuos de la población de mejor a peor en el vector Elite
'OJO: ordena las posiciones, no los individuos físicamente
For i = 1 To Tprob
    For j = i + 1 To Tprob
        If (Worksheets("Población").Cells(1, Elite(i)) < Worksheets("Población").Cells(1,
Elite(j))) Then
            aux = Elite(i): Elite(i) = Elite(j): Elite(j) = aux
        End If
    Next j
Next i

'guarda las aptitudes de todos los cromosomas en Vect
For i = 1 To Tprob
    Vect(i) = Worksheets("Población").Cells(1, Elite(i))
Next i

amen = Vect(Tprob) 'Menor aptitud
amay = Vect(1) 'Mayor aptitud

'Prolonga la aptitud de cada individuo hasta la recta
'y guarda dichos valores en Vect
'Suma las nuevas aptitudes en Sapt
Sapt = 0
For i = 0 To (Tprob - 1)
    Vect(i + 1) = (((amay - amen) / Tprob) * (Tprob - i))
    Sapt = Sapt + Vect(i + 1) 'Guarda la sumatoria de las aptitudes de todos los
cromosomas
Next i

```

'Asigna el limite superior del rango de cada individuo y lo guarda en Vect

Vect(1) = Vect(1) / Sapt

For i = 2 To Tprob

Vect(i) = Vect(i) / Sapt

Vect(i) = Vect(i - 1) + Vect(i)

Next i

Randomize

'Selecciona el primer padre

Rand = Rnd 'Genera un # aleatorio

j = 0

While (j < Tprob)

If Vect(j + 1) >= Rand And Vect(j) < Rand Then 'Pregunta si el aleatorio esta en el
'intervalo del individuo en la posicion (j+1)

Pos(1) = Elite(j + 1)

j = Tprob

Else

j = j + 1

End If

Wend

'Selecciona los individuos y guarda la posicion de los seleccionados en Pos

For i = 2 To CS

Rand = Rnd 'Genera un # aleatorio

j = 0

While (j < Tprob)

If Vect(j + 1) >= Rand And Vect(j) < Rand Then 'Pregunta si el aleatorio esta en el
'intervalo del individuo en la posicion (j+1)

poss = Elite(j + 1)

```
    If Pos(i - 1) <> poss And Pos(i - 2) <> poss Then 'si el individuo seleccionado es
diferente a los dos seleccionados anteriormente, entonces lo selecciona
```

```
        Pos(i) = Elite(j + 1) 'Asigna a Pos la posicion del individuo seleccionado
```

```
        j = Tpob
```

```
    Else
```

```
        i = i - 1
```

```
        j = Tpob
```

```
    End If
```

```
Else
```

```
    j = j + 1
```

```
End If
```

```
Wend
```

```
Next i
```

```
Worksheets("Pob_Intermedia").Range("A1:AZ10000").ClearContents
```

```
'Copia la posicion de los individuos seleccionados a Pob_Intermedia
```

```
For i = 1 To CS 'Recorre el vector Pos
```

```
    Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(i, 1).Value = Pos(i)
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
.....
```

```
'Selecciona los mejores cromosomas proporcionalmente a su valor de aptitud
```

```
'y copia la posicion de los seleccionados en Pob_Intermedia
```

```
""Ruleta""
```

```
.....
```

```
Public Sub Selección_Proporcional()
```

Dim Tprob, Nact, fila, Nind, i, poss, Ngenes, Nhijos, Nhr, Ppr, CS As Integer

Dim Vect() As Single 'Vector en el que se guardan los rangos

'de aptitud de los individuos

Dim Pos() As Integer 'Guarda las posiciones de los individuos seleccionados

Dim Sapt, Rand As Single

Tprob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamaño Poblacion

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Número Actividades

Ngenes = Nact * 2 'Número de genes

Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'cantidad de hijos por generación

Nhr = Worksheets("Control").Cells(8, 2).Value 'cantidad de hijos por recombinacion

Ppr = Worksheets("Control").Cells(16, 2).Value 'cantidad de padres por recombinación

CS = (Nhijos / Nhr + 1) * Ppr 'cantidad de padres a seleccionar

Worksheets("Pob_intermedia").Range("A1:A1000").ClearContents

ReDim Vect(Tprob) 'Cambio de tamaño según Tamaño Población

ReDim Pos(CS) 'Cambio de tamaño según la cantidad de padres a seleccionar

'Suma las aptitudes de todos los cromosomas en Sapt y

'guarda las aptitudes de todos los cromosomas en Vect

Sapt = 0

For i = 1 To Tprob

Sapt = Sapt + Worksheets("Población").Cells(1, i).Value 'Guarda la sumatoria de las aptitudes de todos los cromosomas

Vect(i) = Worksheets("Población").Cells(1, i)

Next i

'Asigna el limite superior del rango de cada individuo y lo guarda en Vect

Vect(1) = Vect(1) / Sapt

For i = 2 To Tprob

```
Vect(i) = Vect(i) / Sapt  
Vect(i) = Vect(i - 1) + Vect(i)
```

```
Next i
```

```
Randomize
```

```
'selecciona el primer padre
```

```
Rand = Rnd 'Genera un # aleatorio
```

```
j = 0
```

```
While (j < Tprob)
```

```
  If Vect(j + 1) >= Rand And Vect(j) < Rand Then 'Pregunta si el aleatorio esta en el  
    'intervalo del individuo en la posicion (j+1)
```

```
    Pos(1) = (j + 1) 'Asigna a Pos la posicion del individuo seleccionado
```

```
    j = Tprob
```

```
  Else
```

```
    j = j + 1
```

```
  End If
```

```
Wend
```

```
'Selecciona los individuos y guarda la posicion de los seleccionados en Pos
```

```
For i = 2 To CS
```

```
  Rand = Rnd 'Genera un # aleatorio
```

```
  j = 0
```

```
  While (j < Tprob)
```

```
    If Vect(j + 1) >= Rand And Vect(j) < Rand Then 'Pregunta si el aleatorio esta en el  
      'intervalo del individuo en la posicion (j+1)
```

```
      poss = (j + 1)
```

```
      If poss <> Pos(i - 1) And poss <> Pos(i - 2) Then 'si el individuo seleccionado es  
diferente al seleccionado anteriormente, entonces lo selecciona
```

```
      Pos(i) = (j + 1) 'Asigna a Pos la posicion del individuo seleccionado
```

```

        j = Tpob
    Else
        i = i - 1
        j = Tpob
    End If
Else
    j = j + 1
End If
Wend
Next i

```

```
Worksheets("Pob_Intermedia").Range("A1:AZ10000").ClearContents
```

```
'Copia la posicion de los individuos seleccionados en Pob_Intermedia
```

```
For i = 1 To CS 'Recorre el vector Pos
```

```
    Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(i, 1).Value = Pos(i)
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

```
.....
```

```
'Selecciona por torneos aleatorios los cromosomas de la Hoja Población y
```

```
'copia en la Hoja Pob_Intermedia la posicion de los seleccionados
```

```
.....
```

```
Public Sub Selección_Torneo()
```

```
    Dim Tpob, Nact, fila, i, Ia, Ib, Ngenes, Nhijos, Nhr, Ppr, CS, Pos() As Integer
```

```
    Dim Aa, Ab As Single
```

```

Tpob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamaño Poblacion
Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Número Actividades
Ngenes = Nact * 2 'Número de genes
Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'cantidad de hijos por generación
Nhr = Worksheets("Control").Cells(8, 2).Value 'cantidad de hijos por recombinacion
Ppr = Worksheets("Control").Cells(16, 2).Value 'cantidad de padres por recombinación
CS = (Nhijos / Nhr + 1) * Ppr 'cantidad de padres a seleccionar
ReDim Pos(CS)
Worksheets("Pob_intermedia").Range("A1:A1000").ClearContents
Randomize

```

'hace el primer torneo para seleccionar el primer individuo

'Produce posociones aleatorias entre las cuales se hace el torneo

```
Ia = Int(Tpob * Rnd + 1)
```

```
Ib = Int(Tpob * Rnd + 1)
```

```
If Ia = Ib Then
```

```
    Ia = Int((Tpob / 2) + (Tpob / 2) * Rnd)
```

```
    Ib = Int((Tpob / 2) * Rnd + 1)
```

```
End If
```

'Obtiene los valores de aptitud de los cromosomas en las posiciones Ia Ib

```
Aa = Worksheets("Población").Cells(1, Ia).Value
```

```
Ab = Worksheets("Población").Cells(1, Ib).Value
```

'Copia en la Hoja Pob_Intermedia al ganador del torneo

```
If Aa > Ab Then
```

```
    Pos(1) = Ia
```

```
End If
```

```
If Ab > Aa Then
```

```
    Pos(1) = Ib
```

End If

If Aa = Ab Then

Pos(1) = Ib

End If

'hace torneos entre dos padres, y guarda la posicion del ganador en pos

For i = 2 To CS

'Produce posociones aleatorias entre las cuales se hace el torneo

Ia = Int(Tpob * Rnd + 1)

Ib = Int(Tpob * Rnd + 1)

If Ia = Ib Then

Ia = Int((Tpob / 2) + (Tpob / 2) * Rnd)

Ib = Int((Tpob / 2) * Rnd + 1)

End If

'Obtiene los valores de aptitud de los cromosomas en las posiciones Ia Ib

Aa = Worksheets("Población").Cells(1, Ia).Value

Ab = Worksheets("Población").Cells(1, Ib).Value

'Copia en la Hoja Pob_Intermedia al ganador del torneo

If Aa > Ab Then

If Ia <> Pos(i - 1) And Ia <> Pos(i - 2) Then

Pos(i) = Ia

Else

i = i - 1

End If

End If

```
If Ab > Aa Then
  If Ib <> Pos(i - 1) And Ib <> Pos(i - 2) Then
    Pos(i) = Ib
  Else
    i = i - 1
  End If
End If
```

```
If Aa = Ab Then
  If Ib <> Pos(i - 1) And Ib <> Pos(i - 2) Then
    Pos(i) = Ib
  Else
    i = i - 1
  End If
End If
```

```
Next i
```

```
Worksheets("Pob_Intermedia").Range("A1:AZ10000").ClearContents
```

```
For i = 1 To CS
```

```
  Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(i, 1).Value = Pos(i)
```

```
Next i
```

```
End Sub
```

.....

'Selecciona los mejores cromosomas correspondientes al Xp% de la Hoja
'Población y los copia en la Hoja Pob_Mejores
'Luego Selecciona los Nhij mejores cromosomas correspondientes

'de Pob_Intermedia y los copia en la hoja Pob_Mejores

""Elitismo"

.....

Public Sub Elitismo()

Dim Tprob, Nact, fila, Nind, aux, Nhij, Ngenes As Integer

Dim Xp As Single

Dim Elite() As Integer 'Vector en el que se guardan ordenadamente

'las posiciones de los padres

Dim Eliteh(256) As Integer 'Vector en el que se guardan ordenadamente

'las posiciones de los hijos

Tprob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamaño Poblacion

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Número Actividades

Xp = Worksheets("Control").Cells(4, 2).Value 'Porcentaje de Elitismo

Ngenes = Nact * 2 'Número de genes

Nind = Int(Tprob * Xp) 'Número de padres a copiar desde Población a Pob_Mejores

Nhij = Tprob - Nind 'Número de hijos a copiar desde Pob_Intermedia a Pob_Mejores

ReDim Elite(Tprob) 'Cambio de tamaño según Tamaño Población

'Inicialización vector Elite

For i = 1 To Tprob

Elite(i) = i

Next i

'Ordenar para escoger los mejores Nind padres de Población

For i = 1 To Nind

```

For j = i + 1 To Tprob
    If (Worksheets("Población").Cells(1, Elite(i)) < Worksheets("Población").Cells(1,
Elite(j))) Then
        aux = Elite(i): Elite(i) = Elite(j): Elite(j) = aux
    End If
Next j
Next i

```

```
Worksheets("Pob_Mejores").Range("A1:AZ10000").ClearContents
```

```
'Copiar los mejores padres a la hoja Pob_Mejores
```

```
For i = 1 To Nind 'Recorre el vector Elite
```

```
    For fila = 1 To (Ngenes + 2) Step 2 'Recorre la hoja Pob_Mejores
```

```
        'Copia el individuo en la posición Elite (i)
```

```
        'de la Hoja Poblacion a la Hoja Pob_Intermedia
```

```
        Worksheets("Pob_Mejores").Cells(fila, i).Value =
```

```
Worksheets("Población").Cells(fila, Elite(i)).Value
```

```
        Worksheets("Pob_Mejores").Cells(fila + 1, i).Value =
```

```
Worksheets("Población").Cells(fila + 1, Elite(i)).Value
```

```
    Next fila
```

```
Next i
```

```
'Inicialización vector Eliteh
```

```
For i = 1 To 256
```

```
    Eliteh(i) = i
```

```
Next i
```

```
'Ordenar para escoger los mejores Nhij hijos de Pob_Intermedia
```

```
For i = 2 To (Nhij + 1)
```

```

For j = i + 1 To 256
    If (Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(1, Eliteh(i)) <
Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(1, Eliteh(j))) Then
        aux = Eliteh(i): Eliteh(i) = Eliteh(j): Eliteh(j) = aux
    End If
Next j
Next i

```

'Copiar los mejores hijos a la hoja Pob_Mejores

For i = 1 To Nhij 'Recorre el vector Eliteh

```

    For fila = 1 To (Ngenes + 2) Step 2 'Recorre la hoja Pob_Mejores
        'Copia el individuo en la posicion Eliteh(i)
        'de la Hoja Pob_Intermedia a la Hoja Pob_Mejores
        Worksheets("Pob_Mejores").Cells(fila, i + Nind).Value =
Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, Eliteh(i + 1)).Value
        Worksheets("Pob_Mejores").Cells(fila + 1, i + Nind).Value =
Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila + 1, Eliteh(i + 1)).Value
    Next fila
Next i
End Sub

```

.....

'Ordena los mejores padres e hijos, presentes en Población y Pob_Intermedia y los copia en
'Pob_Mejores

.....

Public Sub Mejores_PadresHijos()

Dim Tpob, Tvorg, Nact, Ngenes, i, j As Integer

Dim Vorg(), aux As Single 'Vector en el que se guardan las posiciones de los individuos

```

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Número Actividades
Tpob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamaño Poblacion
Ngenes = Nact * 2
Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'Número Hijos
Tvorg = Tpob + Nhijos + 1

```

```

ReDim Vorg(2, Tvorg)

```

```

'Inicializa Vorg con la posicion de cada individuo y el valor de aptitud asociado

```

```

For i = 1 To Tpob 'llena el vector con los padres en poblacion

```

```

    Vorg(1, i) = i

```

```

    Vorg(2, i) = Worksheets("Población").Cells(1, i).Value

```

```

Next i

```

```

For i = 2 To Nhijos + 1 'llena el vector con los hijos en Pob_Intermedia

```

```

    Vorg(1, i + Tpob) = i + Tpob

```

```

    Vorg(2, i + Tpob) = Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(1, i).Value

```

```

Next i

```

```

'Ordena los mejores Tpob individuos en Vorg

```

```

For i = 1 To Tvorg

```

```

    If i <> Tpob + 1 Then

```

```

        For j = i + 1 To Tvorg

```

```

            If j <> Tpob + 1 Then

```

```

                If Vorg(2, i) < Vorg(2, j) Then

```

```

                    aux = Vorg(2, i): Vorg(2, i) = Vorg(2, j): Vorg(2, j) = aux

```

```

                    aux = Vorg(1, i): Vorg(1, i) = Vorg(1, j): Vorg(1, j) = aux

```

```

                End If

```

```

            End If

```

```

        Next j

```

```

    End If
Next i

Worksheets("Pob_Mejores").Range("A1:AZ10000").ClearContents

'Escribe en Pob_Mejores los mejores padres e hijos
For i = 1 To Tpob
    If Vorg(1, i) < Tpob + 1 Then 'Pregunta si esta en la hoja Población
        For j = 1 To Ngenes + 2
            Worksheets("Pob_Mejores").Cells(j, i).Value = Worksheets("Población").Cells(j,
Vorg(1, i)).Value
        Next j
    End If
    If Vorg(1, i) > Tpob + 1 Then 'Pregunta si esta en la hoja Pob_Intermedia
        For j = 1 To Ngenes + 2
            Worksheets("Pob_Mejores").Cells(j, i).Value =
Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(j, Vorg(1, i) - Tpob).Value
        Next j
    End If

Next i
End Sub

```

```

.....

'Realiza la recombinacion entre 2 padres y 1 punto
.....

Public Sub Recombinacion_1pto()

```

Dim Tprob, Nact, Nhijos, hijosxpadre, Ngenes, Npadres, cont, cont2, fila, corte, P1, P2,
escape As Integer

```
Tprob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamano de la poblacion  
Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Numero de actividades  
Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'Numero de hijos  
Ngenes = Nact * 2  
hijosxpadre = Worksheets("control").Cells(8, 2).Value 'numero de hijos por padre  
Randomize  
escape = 1  
Worksheets("Pob_Intermedia").Range("B1:IV10000").ClearContents
```

While escape < Nhijos + 1 'llenar toda la hoja de calculos de hijos

```
For cont = 1 To 2 * Nhijos Step 2 'genera hijos
```

```
    If (escape > Nhijos) Then
```

```
        Exit For
```

```
    End If
```

```
    P1 = Worksheets("Pob_intermedia").Cells(cont, 1).Value 'elige padre1
```

```
    P2 = Worksheets("Pob_intermedia").Cells(cont + 1, 1).Value 'elige padre2
```

```
For cont2 = 1 To hijosxpadre
```

```
    If escape > Nhijos Then
```

```
        Exit For
```

```
    End If
```

```
        corte = Int(((Nact - 1) * Rnd) + 1) * 2 'elige un punto de corte que no sera ni el  
primero ni el ultimo
```

```

If cont2 = 1 Then
  For fila = 3 To (Ngenes + 2)

    If (fila <= (corte + 2)) Then
      Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P1).Value
      'Arriba se pasa la informacion del padre 1 al hijo

    Else
      Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P2).Value
      'Arriba se pasa la info del padre 2 al hijo
    End If
  Next fila

ElseIf cont2 = 2 Then

  For fila = 3 To (Ngenes + 2)

    If (fila <= (corte + 2)) Then
      Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P2).Value
      'Arriba se pasa la informacion del padre 1 al hijo

    Else
      Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P1).Value
      'Arriba se pasa la info del padre 2 al hijo
    End If
  Next fila

```

End If

escape = escape + 1

Next cont2

Next cont

Wend

End Sub

.....

'Realiza la recombinacion entre 2 padres con 2 puntos

.....

Public Sub Recombinacion_2pts_2padres()

Dim Tpob, Nact, Nhijos, hijosxpadre, Ngenes, escape, cont, cont2, fila, punto1, corte1,
punto2, corte2, P1, P2, modo As Integer

Tpob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamano de la poblacion

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Numero de actividades

Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'Numero de hijos

Ngenes = Nact * 2

escape = 1

Randomize

hijosxpadre = Worksheets("control").Cells(8, 2).Value

Worksheets("Pob_Intermedia").Range("B1:IV10000").ClearContents

While escape < Nhijos + 1

```
For cont = 1 To 2 * Nhijos Step 2 'genera hijos
```

```
  If escape > Nhijos Then
```

```
    Exit For
```

```
  End If
```

```
  P1 = Worksheets("Pob_intermedia").Cells(cont, 1).Value
```

```
  P2 = Worksheets("Pob_intermedia").Cells(cont + 1, 1).Value
```

```
  For cont2 = 1 To hijosxpadre
```

```
    If escape > Nhijos Then
```

```
      Exit For
```

```
    End If
```

```
      punto1 = Int(((Nact - 1) * Rnd) + 1) * 2 'elige un punto de corte que no sera ni el  
primero ni el ultimo
```

```
      punto2 = Int(((Nact - 1) * Rnd) + 1) * 2 'elige un punto de corte que no sera ni el  
primero ni el ultimo
```

```
    While (punto1 = punto2) 'revisa el caso si los pts de corte son iguales
```

```
      punto1 = Int(((Nact - 1) * Rnd) + 1) * 2 'elige un nuevo punto de corte
```

```
    Wend
```

```
  If (punto1 > punto2) Then ' ordena los puntos de corte
```

```
    corte2 = punto1
```

```
    corte1 = punto2
```

```
  Else
```

```
    corte2 = punto2
```

```
    corte1 = punto1
```

End If

If (cont2 = 1) Then

For fila = 3 To (Ngenes + 2)

If (fila <= (corte1 + 2)) Then

Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P1).Value

'Arriba se pasa la informacion del padre 1 al hijo por el modo 1

ElseIf (fila <= (corte2 + 2)) Then

Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P2).Value

'Arriba se pasa la info del padre 2 al hijo por el modo 1

Else

Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P1).Value

'Arriba se pasa la informacion del padre 1 al hijo por el modo 1

End If

Next fila

ElseIf cont2 = 2 Then

For fila = 3 To (Ngenes + 2)

If (fila <= (corte1 + 2)) Then

Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P2).Value

'Arriba se pasa la informacion del padre 1 al hijo por el modo 2

```

ElseIf (fila <= (corte2 + 2)) Then
    Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P1).Value
    'Arriba se pasa la info del padre 2 al hijo por el modo 2
Else
    Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P2).Value
    'Arriba se pasa la informacion del padre 1 al hijo por el modo 2
End If

Next fila

End If
escape = escape + 1
Next cont2
Next cont

Wend
End Sub

```

```

.....

```

```

'Realiza la recombinacion entre 3 padres con 2 puntos
.....

```

```

Public Sub Recombinacion_2pts_3padres()

```

```

Dim Tpop, Nact, cont, hijosxpadre, escape, Nhijos, Ngenes, cont2, fila, punto1, corte1,
punto2, corte2, P1, P2, P3, modo As Integer

```

```

Tpop = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value 'Tamano de la poblacion

```

```

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Numero de actividades
Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'Numero de hijos
hijosxpadre = Worksheets("control").Cells(8, 2).Value 'Numero de hijos de cada grupo
de padres escojidos
Ngenes = Nact * 2
cont = 0
cont2 = 1
Randomize
escape = 1
Worksheets("Pob_Intermedia").Range("B1:IV10000").ClearContents

While (escape < Nhijos + 1) 'genera hijos
  For cont = 1 To 3 * Nhijos Step 3

    If escape > Nhijos Then
      Exit For
    End If

    P1 = Worksheets("pob_intermedia").Cells(cont, 1).Value 'elige padres
    P2 = Worksheets("pob_intermedia").Cells(cont + 1, 1).Value 'elige padres
    P3 = Worksheets("pob_intermedia").Cells(cont + 2, 1).Value 'elige padres

    For cont2 = 1 To hijosxpadre 'genera # de hijos por cada grupo de padres
    especificados

      If (escape > Nhijos) Then ' revisa que hijosxpadre divisor de # total hijos
      Exit For
    End If
  
```

punto1 = Int(((Nact - 1) * Rnd) + 1) * 2 'elige un punto de corte que no sera ni el primero ni el ultimo

punto2 = Int(((Nact - 1) * Rnd) + 1) * 2 'elige un punto de corte que no sera ni el primero ni el ultimo

While (punto1 = punto2) 'revisa el caso si los pts de corte son iguales

punto1 = Int(((Nact - 1) * Rnd) + 1) * 2 'elige un nuevo punto de corte

Wend

If (punto1 > punto2) Then 'ordena los puntos de corte

corte2 = punto1

corte1 = punto2

Else

corte2 = punto2

corte1 = punto1

End If

If (cont2 = 1) Then

For fila = 3 To (Ngenes + 2)

If (fila <= (corte1 + 2)) Then

Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P1).Value

'Arriba se pasa la informacion del padre 1 al hijo por el modo 1

ElseIf (fila <= (corte2 + 2)) Then

Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P2).Value

'Arriba se pasa la info del padre 2 al hijo por el modo 1

```

Else
    Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P3).Value
    'Arriba se pasa la informacion del padre 3 al hijo por el modo 1
End If

Next fila

ElseIf (cont2 = 2) Then

    For fila = 3 To (Ngenes + 2)

        If (fila <= (corte1 + 2)) Then
            Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P3).Value
            'Arriba se pasa la informacion del padre 1 al hijo por el modo 2

            ElseIf (fila <= (corte2 + 2)) Then
                Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P1).Value
                'Arriba se pasa la info del padre 3 al hijo por el modo 2
            Else
                Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P2).Value
                'Arriba se pasa la informacion del padre 2 al hijo por el modo 2
            End If

        Next fila

    ElseIf (cont2 = 3) Then

```

```

For fila = 3 To (Ngenes + 2)

    If (fila <= (corte1 + 2)) Then
        Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P2).Value
        'Arriba se pasa la informacion del padre 2 al hijo por el modo 3

    ElseIf (fila <= (corte2 + 2)) Then
        Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P3).Value
        'Arriba se pasa la info del padre 3 al hijo por el modo 3
    Else
        Worksheets("Pob_Intermedia").Cells(fila, escape + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(fila, P1).Value
        'Arriba se pasa la informacion del padre 1 al hijo por el modo 3
    End If

    Next fila

End If

    escape = escape + 1
Next cont2
Next cont
Wend

End Sub

```

.....

'Realiza mutacion sumando o restando 1 a la posicion inicial

.....

Public Sub mutacion_incremento_decremento()

Dim Mutacion, Tprob, Nhijos, Nact, cambio, Ngenes, original, nuevo, Generacion,
Actividad, Cont_mutacion, i, columna, fila, Posicion, Rango, Minimo, maximo As Integer

Mutacion = Worksheets("Control").Cells(5, 2).Value 'Procentaje de mutacion

Tprob = Worksheets("control").Cells(2, 2).Value ' Tamano de poblacion

Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'Numero de hijos

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Numero de actividades

Ngenes = Nact * 2 ' Numero de genes

Generacion = Nhijos * Ngenes 'total de casillas en la poblacion de una generacion

Cont_mutacion = Int(Generacion * Mutacion) 'Numero de veces que hay mutacion

Randomize

For i = 1 To Cont_mutacion

Posicion = Int(Generacion * Rnd) + 1 'elige una posicion para mutar

columna = Int((Posicion - 1) / Ngenes) + 1 + 1 'encuentra la columna tiene en cuenta
columna de padres

fila = Posicion Mod Ngenes 'encuentra la fila

If (fila = 0) Then

fila = fila + Ngenes 'corrige las veces que quede en la ultima fila

End If

cambio = Int((Rnd - 0.5))

If (cambio = 0) Then

 cambio = 1

End If

If ((Posicion Mod 2) = 1) Then 'revisa si hay restriccion por duraciones

 Actividad = Int(fila / 2) + 1 ' encuentra cual es la actividad que va a ser mutada

 Minimo = Worksheets("Actividades").Cells((Actividad + 1), 6).Value

 maximo = Worksheets("Actividades").Cells((Actividad + 1), 5).Value

 Rango = maximo - Minimo

 'arriba se encontro el rango en el que se puede hacer mutacion

 original = Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value

 'encuentra el valor que estaba originalmente en la casilla

 nuevo = original + cambio 'muta

If (Rango >= 1) Then 'revisa que no salga del rango

 If (nuevo >= Minimo And nuevo <= maximo) Then

 Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = nuevo 'muta

 ElseIf (nuevo > maximo) Then

 Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = maximo - 1

```

ElseIf (nuevo < Minimo) Then

    Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = Minimo + 1

End If
End If

Else
    Actividad = Int(fila / 2)
    original = Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value
'encuentra el valor que estaba originalmente en la casilla
    nuevo = original + cambio
    Rango = Worksheets("Actividades").Cells((Actividad + 1), 7).Value

    If (nuevo >= 0 And nuevo <= Rango) Then
        Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = nuevo 'muta
    ElseIf (nuevo > Rango) Then
        Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = Rango 'muta
    Else
        Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = 0 'muta
    End If

End If

Next i
End Sub

```

```

.....
'Realiza mutacion cuyo porcentaje varia dependiendo del numero de generacion actual
.....

```

Public Sub Mutacion_variable()

Dim Mutacion, minmutacion, generacion_actual, Tpob, Nhijos, Nact, Ngenes, original, nuevo, Generacion, Actividad, Cont_mutacion, i, columna, fila, Posicion, Rango, Minimo, maximo As Integer

Mutacion = Worksheets("Control").Cells(5, 2).Value 'Procentaje de mutacion

Tpob = Worksheets("control").Cells(2, 2).Value ' Tamano de poblacion

Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'Numero de hijos

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Numero de actividades

minmutacion = Worksheets("Control").Cells(10, 2).Value 'mutacion minima

Ngenes = Nact * 2 ' Numero de genes

Generacion = Nhijos * Ngenes 'total de casillas en la poblacion de una generacion

generacion_actual = Worksheets("control").Cells(9, 2).Value 'numero de generacion actual

Cont_mutacion = Int((minmutacion * 100) + (Mutacion * generacion_actual)) 'Numero de veces que hay mutacion en la generacion actual

Randomize

For i = 1 To Cont_mutacion

Posicion = Int(Generacion * Rnd) + 1 'elige una posicion para mutar

columna = Int((Posicion - 1) / Ngenes) + 1 + 1 'encuentra la columna tiene en cuenta columna de padres

fila = Posicion Mod Ngenes 'encuentra la fila

```

If (fila = 0) Then
    fila = fila + Ngenes 'corrige las veces que quede en la ultima fila
End If

If ((Posicion Mod 2) = 1) Then 'revisa si hay restriccion por duraciones

    Actividad = Int(fila / 2) + 1 ' encuentra cual es la actividad que va a ser mutada
    Minimo = Worksheets("Actividades").Cells((Actividad + 1), 6).Value
    maximo = Worksheets("Actividades").Cells((Actividad + 1), 5).Value
    Rango = maximo - Minimo
    'arriba se encontro el rango en el que se puede hacer mutacion
    If (Rango >= 1) Then
        original = Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value
'encuentra el valor que estaba originalmente en la casilla
        nuevo = Minimo + Int(Rango * Rnd) 'muta
        If (original = nuevo) Then
            nuevo = Minimo + Int(Rango * Rnd) ' revisa que no quede el mismo valor
        End If

        Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = nuevo 'muta

    End If
Else
    Actividad = Int(fila / 2)
    Rango = Worksheets("Actividades").Cells(Actividad + 1, 7).Value 'define rango
para mutar
    Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = Int(Rango * Rnd)
'muta

```

End If

Next i

End Sub

.....

'Realiza mutacion aleatoria

.....

Public Sub Mutacion_aleatoria()

Dim Mutacion, Tpob, Nhijos, Nact, Ngenes, original, nuevo, Generacion, Actividad,
Cont_mutacion, i, columna, fila, Posicion, Rango, Minimo, maximo As Integer

Mutacion = Worksheets("Control").Cells(5, 2).Value 'Procentaje de mutacion

Tpob = Worksheets("control").Cells(2, 2).Value ' Tamano de poblacion

Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'Numero de hijos

Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Numero de actividades

Ngenes = Nact * 2 ' Numero de genes

Generacion = Nhijos * Ngenes 'total de casillas en la poblacion de una generacion

Cont_mutacion = Int(Generacion * Mutacion) 'Numero de veces que hay mutacion

Randomize

```

For i = 1 To Cont_mutacion

    Posicion = Int(Generacion * Rnd) + 1 'elige una posicion para mutar
    columna = Int((Posicion - 1) / Ngenes) + 1 + 1 'encuentra la columna, tiene en cuenta
desplazamiento por columna de padres
    fila = Posicion Mod Ngenes 'encuentra la fila

    If (fila = 0) Then
        fila = fila + Ngenes 'corrige las veces que quede en la ultima fila
    End If

    If ((Posicion Mod 2) = 1) Then 'revisa si hay restriccion por duraciones

        Actividad = Int(fila / 2) + 1 ' encuentra cual es la actividad que va a ser mutada
        Minimo = Worksheets("Actividades").Cells((Actividad + 1), 6).Value
        maximo = Worksheets("Actividades").Cells((Actividad + 1), 5).Value
        Rango = maximo - Minimo
        'arriba se encontro el rango en el que se puede hacer mutacion
        If (Rango >= 1) Then
            original = Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value
'encuentra el valor que estaba originalmente en la casilla
            nuevo = Minimo + Int(Rango * Rnd) 'muta
            If (original = nuevo) Then
                nuevo = Minimo + Int(Rango * Rnd) ' revisa que no quede el mismo valor
            End If

            Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = nuevo 'muta

        End If

    End If

```

```

Else
    Actividad = Int(fila / 2)
    Rango = Worksheets("Actividades").Cells((Actividad + 1), 7).Value 'define rango
para mutar
    Worksheets("Pob_intermedia").Cells((fila + 2), columna).Value = Int(Rango * Rnd)
'muta

End If

Next i
End Sub

```

```

.....
'Organiza matrices de actividades realizadas, por realizar y de fin y comienzo de cada
actividad
'ademas calcula la adaptacion. todo esto solo para la poblacion inicial
.....

```

```

Public Sub adaptacion_pob_inicial()

```

```

    Dim original(), listasfs(), Nact, Ngenes, Predecesora, Nhijos, sumatoria, escape, cont,
cont2, fingrande, fintemp, codigo, todas_predecesoras, predecesoras_actividad

```

```

    Dim Tpob, k, i, j, s, o, l, t, m, R, h, a, generacion_actual, maximo, act_actual,
costo_material, costo_herramienta, costo_equipo, costo_mano_obra

```

```

    Dim insumo, Cant_insumos, codigo_m_o, insumos(), mano_obra, duracion_actividad,
Cantidad_actividad

```

```

    Dim mak, w, lae, dias_periodo, administracion_periodo, costo_oportunidad, N_periodos,
periodos()

```

```

    Dim comienzo, final, periodo_comienzo, periodo_final, costo_total_actividad, x,
proporcion_periodo

```

```

Dim Funcion_objetivo, plazo_maximo

Tpob = Worksheets("control").Cells(2, 2).Value 'encuentra el tamaño de la población
Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'Numero de hijos
Nact = Worksheets("control").Cells(1, 2).Value 'encuentra el número de actividades del
proyecto
Ngenes = Nact * 2
generacion_actual = Worksheets("Control").Cells(9, 2).Value ' revisa cual es la
generacion actual
dias_periodo = Worksheets("Control").Cells(11, 2).Value 'encuentra el número de días
de un periodo
administracion_periodo = Worksheets("Control").Cells(12, 2).Value 'encuentra el costo
de administracion de un periodo
costo_oportunidad = Worksheets("Control").Cells(13, 2).Value 'encuentra el costo de
oportunidad
plazo_maximo = Worksheets("Control").Cells(15, 2).Value 'encuentra el plazo máximo
de la obra

For t = 1 To 9999 'encuentra el código de mano de obra para revisión posterior

If (Worksheets("insumos").Cells(t + 1, 5).Value = "M. obra") Then

codigo_m_o = Worksheets("insumos").Cells(t + 1, 1).Value

End If

Next t

```

For k = 1 To Tprob

cont = 0

Predecesora = 0

escape = 0

For i = 1 To Nact

If (cont > Predecesora) Then

Predecesora = cont

End If

cont = 0

For j = 1 To 50

If (Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, j + 1).Value > 0) Then

cont = cont + 1

End If

Next j

Next i

' Arriba se encontro cual es el maximo numero de predecesoras que tiene una actividad para armar matriz

ReDim original(Nact, Predecesora + 1) 'se dimensiona matriz donde se encontrara la info original

ReDim listasfs(Nact, 3) 'se dimensiona vector de actividades terminadas con su comienzo y fin

```

For i = 1 To Nact
    For j = 1 To Predecesora + 1
        original(i, j) = Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, j).Value 'llena la matriz
con la informacion original
    Next j
Next i

```

```

For i = 1 To Nact
    If (original(i, 2) = 0) Then ' comienza con las actividades sin predecesoras

        original(i, 1) = 0 'borra actividad lista de la original
        listasfs(i, 1) = Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, 1).Value ' pasa el codigo a
la tabla listasfs
        listasfs(i, 2) = Worksheets("Población").Cells((i * 2) + 2, k) + 1 'halla dia inicial
        listasfs(i, 3) = Worksheets("Población").Cells((i * 2) - 1 + 2, k) + listasfs(i, 2) - 1
'halla dia final

    End If
Next i

```

```

While escape = 0 'ahora revisa las actividades con predecesoras

    For s = 1 To Nact 'comienza el ciclo para revisar hasta que se borren todas las act de
original()

        fingrande = 0
        predecesoras_actividad = 0
        todas_predecesoras = 0
    
```

```

For o = 1 To Predecesora

    If (Worksheets("Precedencias").Cells(s + 1, o + 1).Value > 0) Then
        predecesoras_actividad = predecesoras_actividad + 1 'cuenta la cantidad de
predecesoras
                                                'que tiene la actividad
    End If
Next o

```

```

For j = 1 To predecesoras_actividad
    If (original(s, j) = 0) Then 'revisa que la actividad no este en la matriz listasfs
        Exit For 'sale para buscar la siguiente actividad
    End If

```

```

codigo = original(s, j + 1) 'encuentra el codigo de la predecesora

```

```

For l = 1 To Nact

    If ((codigo - listasfs(l, 1)) = 0) Then 'si la actividad ya esta en listasfs

        fintemp = listasfs(l, 3) ' asigna una fecha de fin temporal
        todas_predecesoras = todas_predecesoras + 1 'suma cada vez que
encuentra una predecesora
                                                'y solo continuara hasta que todas sumen
        If (fingrande < fintemp) Then
            fingrande = fintemp
        End If
    End If

```

```

Next l

If (fingrande = 0) Then
    Exit For
End If

Next j

If (fingrande <> 0 And todas_predecesoras = predecesoras_actividad) Then 'revisa
que todas las opredecesoras cumplan

    original(s, 1) = 0 'borra actividad lista de la original
    listasfs(s, 1) = Worksheets("Precedencias").Cells(s + 1, 1).Value ' pasa el codigo
a la tabla listasfs
    listasfs(s, 2) = Worksheets("Población").Cells((s * 2) + 2, k) + 1 + fingrande
'halla dia inicial
    listasfs(s, 3) = Worksheets("Población").Cells((s * 2) - 1 + 2, k) + listasfs(s, 2) - 1
'halla dia final
End If

Next s

sumatoria = 0

For i = 1 To Nact
    sumatoria = sumatoria + original(i, 1) 'sumatoria de los codigos
Next i

If (sumatoria = 0) Then

```

```
        escape = 1 ' revisa cuando la lista original() esta vacia para salir del ciclo
    End If
Wend
```

```
maximo = 0
For i = 1 To Nact
    If (listasfs(i, 3) > maximo) Then
        maximo = listasfs(i, 3) 'revisa cuanto se demora la obra en terminarse
    End If
Next i
```

'hasta aca se han evaluado los comienzos y finales de cada actividad en el cromosoma

'a continuacion se evalua el numero de periodos del proyecto y se crea vector de gastos

```
N_periodos = Int((maximo - 1) / dias_periodo) + 1
ReDim periodos(1, N_periodos)
```

'a continuacion se evaluan los costos directos

```
cont = 0
cont2 = 0
Funcion_objetivo = 0
```

For j = 1 To 9999 ' encuentra la dimension de la matriz unitarios que es la cantidad total de insumos

```
    If (Worksheets("unitarios").Cells(j + 1, 1).Value <> 0) Then
        cont = cont + 1
```

End If

Next j

For j = 1 To 9999 ' encuentra la cantidad total de insumos que se usara en la obra

If (Worksheets("insumos").Cells(j + 1, 1).Value <> 0) Then

cont2 = cont2 + 1

End If

Next j

For i = 1 To Nact 'comienza la evaluacion de costos para cada actividad

act_actual = Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, 1).Value ' encuentra cada actividad que va a analizar

duracion_actividad = Worksheets("Población").Cells((i * 2) - 1 + 2, k).Value
'CAMBIA PARA POB_INTERMEDIA. encuentra la duracion de la actividad

Cantidad_actividad = Worksheets("Actividades").Cells(i + 1, 4) 'encuentra la cantidad de actividad a desarrollar

comienzo = listasfs(i, 2) 'encuentra el dia en el que comienza la actividad

final = listasfs(i, 3) 'encuentra el dia en el que termina la actividad

periodo_comienzo = Int((comienzo - 1) / dias_periodo) + 1 'encuentra el periodo en el que comienza la actividad

periodo_final = Int((final - 1) / dias_periodo) + 1 'encuentra el periodo en el que termina la actividad

costo_total_actividad = 0

costo_material = 0

costo_herramienta = 0

costo_equipo = 0

```
costo_mano_obra = 0
Cant_insumos = 0
mano_obra = 0
mak = 0
escape = 0 'para revisar insumos
```

```
For R = 1 To cont
```

```
    If (act_actual = Worksheets("unitarios").Cells(R + 1, 1).Value) Then 'revisa la
cantidad de insumos de la actividad estudiada
```

```
        Cant_insumos = Cant_insumos + 1
```

```
    End If
```

```
Next R
```

```
ReDim insumos(Cant_insumos, 8) 'vector de insumos
```

```
For t = 1 To cont
```

```
    If (act_actual = Worksheets("unitarios").Cells(t + 1, 1).Value) Then 'revisa que
evalue insumo de la actividad estudiada
```

```
        For m = 1 To Cant_insumos
```

```
            insumos(m, 1) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 2).Value 'encuentra el
codigo insumo de la actividad
```

```
            insumos(m, 2) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 3).Value 'encuentra la
cantidad de insumo de la actividad
```

```
            insumos(m, 3) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 4).Value 'encuentra el
rendimiento del insumo de la actividad
```

```
            insumos(m, 4) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 5).Value 'encuentra el
costo de la cantidad de herramienta de la actividad
```

```
            insumos(m, 7) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 6).Value 'encuentra el
precio ordinario de la mano de obra
```

```
insumos(m, 8) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 7).Value 'encuentra el
precio ordinario de la maquinaria
```

```
For h = 1 To cont2
    If (insumos(m, 1) = Worksheets("insumos").Cells(h + 1, 1).Value) Then
        insumos(m, 5) = Worksheets("insumos").Cells(h + 1, 4).Value
'encuentra el precio unitario del insumo
        insumos(m, 6) = Worksheets("insumos").Cells(h + 1, 5).Value
'encuentra el tipo de insumo
    End If
Next h
```

```
If (insumos(m, 1) = codigo_m_o) Then 'tan pronto encuentre mano de obra
evalua la cantidad de M O porque es necesario para evaluar herramientas
```

```
mano_obra = 1
mak = (Cantidad_actividad / duracion_actividad) * ((1 / 8) / insumos(m,
3))
```

```
End If
```

```
Next m
Exit For
End If
Next t
```

```
For w = 1 To Cant_insumos ' evalua materiales, herramienta, equipo y mano de
obra
```

```

    If (insumos(w, 6) = "M. obra") Then 'evalua costos por mano de obra
        costo_mano_obra = costo_mano_obra + (mak * insumos(w, 7) *
Cantidad_actividad)
    End If

    If (insumos(w, 6) = "Material") Then 'evalua costos por material
        costo_material = costo_material + (insumos(w, 2) * insumos(w, 5) *
Cantidad_actividad)
    End If

    If (insumos(w, 6) = "Equipo") Then 'evalua costos por equipo
        lae = (Cantidad_actividad / duracion_actividad) * ((1 / 8) / insumos(w, 3))
        costo_equipo = costo_equipo + (insumos(w, 8) * Cantidad_actividad * lae)
    End If

    If (insumos(w, 6) = "Herramienta") Then 'evalua costos por herramienta
        If (mano_obra = 1) Then
            costo_herramienta = costo_herramienta + (mak * insumos(w, 4) *
Cantidad_actividad)
        Else
            mak = 1
            costo_herramienta = costo_herramienta + (mak * insumos(w, 4) *
Cantidad_actividad)
        End If
    End If

Next w

costo_total_actividad = costo_mano_obra + costo_material + costo_equipo +
costo_herramienta 'Halla el costo total de la actividad

```

If (periodo_final - periodo_comienzo = 0) Then 'asigna costos directos al periodo en curso

periodos(1, periodo_comienzo) = periodos(1, periodo_comienzo) + costo_total_actividad

ElseIf (periodo_final - periodo_comienzo > 0) Then

For x = 1 To ((periodo_final - periodo_comienzo) + 1) 'asigna costos directos a los periodos en los que se desarrolla la actividad

If ((periodo_comienzo - 1 + x) = periodo_comienzo) Then 'revisa que se este evaluando el periodo comienzo

proporcion_periodo = (((periodo_comienzo * dias_periodo) - comienzo + 1) / duracion_actividad)

periodos(1, periodo_comienzo) = periodos(1, periodo_comienzo) + (costo_total_actividad * proporcion_periodo)

ElseIf ((periodo_comienzo - 1 + x) > periodo_comienzo And (periodo_comienzo - 1 + x) < periodo_final) Then 'revisa que evalúe periodos intermedios

proporcion_periodo = dias_periodo / duracion_actividad

periodos(1, periodo_comienzo - 1 + x) = periodos(1, periodo_comienzo - 1 + x) + (costo_total_actividad * proporcion_periodo)

Else 'revisa que evalúe el periodo final

```
proporcion_periodo = (final - ((periodo_final * dias_periodo) - dias_periodo)) /  
duracion_actividad  
periodos(1, periodo_final) = periodos(1, periodo_final) +  
(costo_total_actividad * proporcion_periodo)
```

```
End If
```

```
Next x
```

```
End If
```

```
Next i
```

'ahora se traen los costos generados periodo a periodo a valor presente neto

```
For a = 1 To N_periodos ' Trae a VPN los costos de cada periodo
```

```
Funcion_objetivo = Funcion_objetivo + ((periodos(1, a) + administracion_periodo)  
/ ((1 + costo_oportunidad) ^ a)) 'acumula valor de funcion objetivo periodo a periodo
```

```
Next a
```

```
If maximo > plazo_maximo Then 'penalizacion si la duracion es mayor al plazo  
maximo
```

```
Funcion_objetivo = Funcion_objetivo * (1 + (0.01 * (maximo - plazo_maximo)))  
'costo aumenta 1% por cada dia que se exceda del limite
```

End If

Worksheets("población").Cells(1, k) = 1 / Funcion_objetivo 'CAMBIA SEGUN
POBLACION

Worksheets("población").Cells(2, k) = Funcion_objetivo 'CAMBIA SEGUN
POBLACION

Next k

End Sub

Public Sub adaptacion_pob_intermedia()

.....

.....

'a partir de aca se evalua Pob_intermedia

.....

.....

.....

Dim original(), listasfs(), Nact, Ngenes, Predecesora, Nhijos, sumatoria, escape, cont,
cont2, fnggrande, fintemp, codigo, todas_predecesoras, predecesoras_actividad

Dim Tpob, k, i, j, s, o, l, t, m, R, h, a, b, c, generacion_actual, maximo, act_actual,
costo_material, costo_herramienta, costo_equipo, costo_manoobra

Dim insumo, Cant_insumos, codigo_m_o, insumos(), manoobra, duracion_actividad,
Cantidad_actividad

Dim mak, w, lae, dias_periodo, administracion_periodo, costo_oportunidad, N_periodos,
periodos()

Dim comienzo, final, periodo_comienzo, periodo_final, costo_total_actividad, x,
proporcion_periodo

Dim Funcion_objetivo, plazo_maximo, prueba_igual

Tpob = Worksheets("control").Cells(2, 2).Value 'encuentra el tamaño de la población

Nhijos = Worksheets("Control").Cells(7, 2).Value 'Numero de hijos

Nact = Worksheets("control").Cells(1, 2).Value 'encuentra el número de actividades del
proyecto

Ngenes = Nact * 2

generacion_actual = Worksheets("Control").Cells(9, 2).Value ' revisa cual es la
generacion actual

dias_periodo = Worksheets("Control").Cells(11, 2).Value 'encuentra el número de días
de un periodo

administracion_periodo = Worksheets("Control").Cells(12, 2).Value 'encuentra el costo
de administracion de un periodo

costo_oportunidad = Worksheets("Control").Cells(13, 2).Value 'encuentra el costo de
oportunidad

plazo_maximo = Worksheets("Control").Cells(15, 2).Value 'encuentra el plazo máximo
de la obra

For t = 1 To 9999 'encuentra el código de mano de obra para revision posterior

If (Worksheets("insumos").Cells(t + 1, 5).Value = "M. obra") Then

codigo_m_o = Worksheets("insumos").Cells(t + 1, 1).Value

End If

Next t

For k = 1 To Nhijos

cont = 0

Predecesora = 0

escape = 0

For i = 1 To Nact

 If (cont > Predecesora) Then

 Predecesora = cont

 End If

 cont = 0

 For j = 1 To 50

 If (Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, j + 1).Value > 0) Then

 cont = cont + 1

 End If

 Next j

Next i

' Arriba se encontro cual es el maximo numero de predecesoras que tiene una actividad para armar matriz

ReDim original(Nact, Predecesora + 1) 'se dimensiona matriz donde se encontrara la info original

ReDim listasfs(Nact, 3) 'se dimensiona vector de actividades terminadas con su comienzo y fin

```

For i = 1 To Nact
    For j = 1 To Predecesora + 1
        original(i, j) = Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, j).Value 'llena la matriz
con la informacion original
    Next j
Next i

```

```

For i = 1 To Nact
    If (original(i, 2) = 0) Then ' comienza con las actividades sin predecesoras

        original(i, 1) = 0 'borra actividad lista de la original
        listasfs(i, 1) = Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, 1).Value ' pasa el codigo a
la tabla listasfs
        listasfs(i, 2) = Worksheets("Pob_intermedia").Cells((i * 2) + 2, k + 1) + 1 'halla
dia inicial
        listasfs(i, 3) = Worksheets("Pob_intermedia").Cells((i * 2) - 1 + 2, k + 1) +
listasfs(i, 2) - 1 'halla dia final

    End If
Next i

```

```

While escape = 0 'ahora revisa las actividades con predecesoras

    For s = 1 To Nact 'comienza el ciclo para revisar hasta que se borren todas las act de
original()

        fingrande = 0
        predecesoras_actividad = 0
        todas_predecesoras = 0
    
```

```

For o = 1 To Predecesora

    If (Worksheets("Precedencias").Cells(s + 1, o + 1).Value > 0) Then
        predecesoras_actividad = predecesoras_actividad + 1 'cuenta la cantidad de
predecesoras
                                                'que tiene la actividad
    End If
Next o

```

```

For j = 1 To predecesoras_actividad
    If (original(s, j) = 0) Then 'revisa que la actividad no este en la matriz listasfs
        Exit For 'sale para buscar la siguiente actividad
    End If

```

```

codigo = original(s, j + 1) 'encuentra el codigo de la predecesora

```

```

For l = 1 To Nact

    If ((codigo - listasfs(l, 1)) = 0) Then 'si la actividad ya esta en listasfs

        fintemp = listasfs(l, 3) ' asigna una fecha de fin temporal
        todas_predecesoras = todas_predecesoras + 1 'suma cada vez que
encuentra una predecesora
                                                'y solo continuara hasta que todas sumen
        If (fingrande < fintemp) Then
            fingrande = fintemp
        End If
    End If

```

Next l

If (fingrande = 0) Then

Exit For

End If

Next j

If (fingrande <> 0 And todas_predecesoras = predecesoras_actividad) Then 'revisa
que todas las opredecesoras cumplan

original(s, 1) = 0 'borra actividad lista de la original

listasfs(s, 1) = Worksheets("Precedencias").Cells(s + 1, 1).Value ' pasa el codigo
a la tabla listasfs

listasfs(s, 2) = Worksheets("Pob_intermedia").Cells((s * 2) + 2, k + 1) + 1 +
fingrande 'halla dia inicial

listasfs(s, 3) = Worksheets("Pob_intermedia").Cells((s * 2) - 1 + 2, k + 1) +
listasfs(s, 2) - 1 'halla dia final

End If

Next s

sumatoria = 0

For i = 1 To Nact

sumatoria = sumatoria + original(i, 1) 'sumatoria de los codigos

Next i

If (sumatoria = 0) Then

```
        escape = 1 ' revisa cuando la lista original() esta vacia para salir del ciclo
    End If
Wend
```

```
maximo = 0
For i = 1 To Nact
    If (listasfs(i, 3) > maximo) Then
        maximo = listasfs(i, 3)
    End If
Next i
```

'hasta aca se encontro el comienzo y fin de cada actividad

'a continuacion se evalua el numero de periodos del proyecto y se crea vector de gastos

```
N_periodos = Int((maximo - 1) / dias_periodo) + 1
ReDim periodos(1, N_periodos)
```

'a continuacion se evaluan los costos directos

```
cont = 0
cont2 = 0
Funcion_objetivo = 0
```

For j = 1 To 9999 ' encuentra la dimension de la matriz unitarios que es la cantidad total de insumos

```
    If (Worksheets("unitarios").Cells(j + 1, 1).Value <> 0) Then
        cont = cont + 1
    End If
Next j
```

```

For j = 1 To 9999 ' encuentra la cantidad total de insumos que se usara en la obra
  If (Worksheets("insumos").Cells(j + 1, 1).Value <> 0) Then
    cont2 = cont2 + 1
  End If
Next j

```

```

For i = 1 To Nact 'comienza la evaluacion de costos para cada actividad
  act_actual = Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, 1).Value ' encuentra cada
actividad que va a analizar
  duracion_actividad = Worksheets("Pob_Intermedia").Cells((i * 2) - 1 + 2, k +
1).Value 'encuentra la duracion de la actividad
  Cantidad_actividad = Worksheets("Actividades").Cells(i + 1, 4) 'encuentra la
cantidad de actividad a desarrollar

```

```

  comienzo = listasfs(i, 2) 'encuentra el dia en el que comienza la actividad
  final = listasfs(i, 3) 'encuentra el dia en el que termina la actividad
  periodo_comienzo = Int((comienzo - 1) / dias_periodo) + 1 'encuentra el periodo en
el que comienza la actividad
  periodo_final = Int((final - 1) / dias_periodo) + 1 'encuentra el periodo en el que
termina la actividad

```

```

costo_total_actividad = 0
costo_material = 0
costo_herramienta = 0
costo_equipo = 0
costo_mano_obra = 0
Cant_insumos = 0
mano_obra = 0

```

```

mak = 0
escape = 0 'para revisar insumos

For R = 1 To cont
    If (act_actual = Worksheets("unitarios").Cells(R + 1, 1).Value) Then 'revisa la
cantidad de insumos de la actividad estudiada
        Cant_insumos = Cant_insumos + 1
    End If
Next R

ReDim insumos(Cant_insumos, 8) 'vector de insumos

For t = 1 To cont
    If (act_actual = Worksheets("unitarios").Cells(t + 1, 1).Value) Then 'revisa que
evalue insumo de la actividad estudiada

        For m = 1 To Cant_insumos
            insumos(m, 1) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 2).Value 'encuentra el
codigo insumo de la actividad
            insumos(m, 2) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 3).Value 'encuentra la
cantidad de insumo de la actividad
            insumos(m, 3) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 4).Value 'encuentra el
rendimiento del insumo de la actividad
            insumos(m, 4) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 5).Value 'encuentra el
costo de la cantidad de herramienta de la actividad
            insumos(m, 7) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 6).Value 'encuentra el
precio ordinario de la mano de obra
            insumos(m, 8) = Worksheets("unitarios").Cells(t + m, 7).Value 'encuentra el
precio ordinario de la maquinaria

```

```

For h = 1 To cont2
    If (insumos(m, 1) = Worksheets("insumos").Cells(h + 1, 1).Value) Then
        insumos(m, 5) = Worksheets("insumos").Cells(h + 1, 4).Value
'encuentra el precio unitario del insumo
        insumos(m, 6) = Worksheets("insumos").Cells(h + 1, 5).Value
'encuentra el tipo de insumo
    End If
Next h

    If (insumos(m, 1) = codigo_m_o) Then 'tan pronto encuentre mano de obra
evalua la cantidad de M O porque es necesario para evaluar herramientas

        mano_obra = 1
        mak = (Cantidad_actividad / duracion_actividad) * ((1 / 8) / insumos(m,
3))

    End If

Next m
Exit For
End If
Next t

For w = 1 To Cant_insumos 'evalua materiales, herramienta, equipo y mano de
obra

    If (insumos(w, 6) = "M. obra") Then 'evalua costos por mano de obra
        costo_mano_obra = costo_mano_obra + (mak * insumos(w, 7) *
Cantidad_actividad)

```

End If

If (insumos(w, 6) = "Material") Then 'evalua costos por material

costo_material = costo_material + (insumos(w, 2) * insumos(w, 5) *

Cantidad_actividad)

End If

If (insumos(w, 6) = "Equipo") Then 'evalua costos por equipo

lae = (Cantidad_actividad / duracion_actividad) * ((1 / 8) / insumos(w, 3))

costo_equipo = costo_equipo + (insumos(w, 8) * Cantidad_actividad * lae)

End If

If (insumos(w, 6) = "Herramienta") Then 'evalua costos por herramienta

If (mano_obra = 1) Then

costo_herramienta = costo_herramienta + (mak * insumos(w, 4) *

Cantidad_actividad)

Else

mak = 1

costo_herramienta = costo_herramienta + (mak * insumos(w, 4) *

Cantidad_actividad)

End If

End If

Next w

costo_total_actividad = costo_mano_obra + costo_material + costo_equipo +

costo_herramienta 'Halla el costo total de la actividad

If (periodo_final - periodo_comienzo = 0) Then 'asigna costos directos al periodo en
curso

periodos(1, periodo_comienzo) = periodos(1, periodo_comienzo) +
costo_total_actividad

ElseIf (periodo_final - periodo_comienzo > 0) Then

For x = 1 To ((periodo_final - periodo_comienzo) + 1) 'asigna costos directos a
los periodos en los que se desarrolla la actividad

If ((periodo_comienzo - 1 + x) = periodo_comienzo) Then 'revisa que se este
evaluando el periodo comienzo

proporcion_periodo = (((periodo_comienzo * dias_periodo) - comienzo + 1) /
duracion_actividad)

periodos(1, periodo_comienzo) = periodos(1, periodo_comienzo) +
(costo_total_actividad * proporcion_periodo)

ElseIf ((periodo_comienzo - 1 + x) > periodo_comienzo And
(periodo_comienzo - 1 + x) < periodo_final) Then 'revisa que evalúe periodos intermedios

proporcion_periodo = dias_periodo / duracion_actividad
periodos(1, periodo_comienzo - 1 + x) = periodos(1, periodo_comienzo - 1 +
x) + (costo_total_actividad * proporcion_periodo)

Else 'revisa que evalúe el periodo final

proporcion_periodo = (final - ((periodo_final * dias_periodo) - dias_periodo)) /
duracion_actividad

periodos(1, periodo_final) = periodos(1, periodo_final) +
(costo_total_actividad * proporcion_periodo)

End If

Next x

End If

Next i

'ahora se traen los costos generados periodo a periodo a valor presente neto

For a = 1 To N_periodos ' Trae a VPN los costos de cada periodo

Funcion_objetivo = Funcion_objetivo + ((periodos(1, a) + administracion_periodo) / ((1 + costo_oportunidad) ^ a)) 'acumula valor de funcion objetivo periodo a periodo

Next a

If maximo > plazo_maximo Then 'penalizacion si la duracion es mayor al plazo maximo

Funcion_objetivo = Funcion_objetivo * (1 + (0.01 * (maximo - plazo_maximo)))
'costo aumenta 1% por cada dia que se exceda del limite

End If

For b = 1 To Tprob 'se penaliza en el caso de que un hijo sea igual a algun padre

```

If Funcion_objetivo = Worksheets("Población").Cells(2, b).Value Then
    prueba_igual = 0
    For c = 1 To Ngenes 'revisa si todos los genes son iguales
        If Worksheets("Pob_intermedia").Cells(c + 2, k + 1).Value =
Worksheets("Población").Cells(c + 2, b).Value Then
            prueba_igual = prueba_igual + 1
        End If
    Next c

    If prueba_igual = Ngenes Then 'en caso de ser iguales penaliza
        Funcion_objetivo = Funcion_objetivo * 1000
    Exit For
    End If
End If
Next b

    Worksheets("pob_intermedia").Cells(1, k + 1) = 1 / Funcion_objetivo 'CAMBIA
SEGUN POBLACION
    Worksheets("pob_intermedia").Cells(2, k + 1) = Funcion_objetivo 'CAMBIA SEGUN
POBLACION

Next k

End Sub

.....
'programa al boton que genera la población inicial
.....

Public Sub CommandButton1_Click()

```

```

If ComboBox1 = "Aleatorio" Then
    PobIni_Aleatorio
    Worksheets("reporte").Cells(16, 2).Value = "Aleatorio"
End If
If ComboBox1 = "Retraso 0" Then
    PobIni_Retraso0
    Worksheets("reporte").Cells(16, 2).Value = "Retraso 0"
End If
If ComboBox1 = "Mejores Anteriores" Then
    PobIni_ResHistoric1
    Worksheets("reporte").Cells(16, 2).Value = "Resultados historicos"
End If

```

End Sub

```

.....
'programa al boton que evalua la población inicial
.....

```

```

Public Sub CommandButton2_Click()

```

```

    adaptacion_pob_inicial

```

End Sub

```

.....
'programa al boton que hace la seleccion
.....

```

```

Public Sub CommandButton3_Click()

```

```

If ComboBox2 = "Aleatorio" Then
    Selección_Aleatoria
    Worksheets("reporte").Cells(17, 2).Value = "Aleatorio"
End If
If ComboBox2 = "Torneo" Then
    Selección_Torneo
    Worksheets("reporte").Cells(17, 2).Value = "Torneo"
End If
If ComboBox2 = "Proporcional" Then
    Selección_Proporcional
    Worksheets("reporte").Cells(17, 2).Value = "Proporcional"
End If
If ComboBox2 = "Escalonado" Then
    Selección_Escalonada
    Worksheets("reporte").Cells(17, 2).Value = "Escalonada"
End If

```

End Sub

```

.....
'programa al boton que hace la recombinación
.....

```

```

Public Sub CommandButton4_Click()

```

```

    If ComboBox3 = "2 Padres 1 Punto" Then
        Recombinacion_1pto
        Worksheets("reporte").Cells(18, 2).Value = "2 Padres 1 Punto"
    End If
    If ComboBox3 = "2 Padres 2 Puntos" Then
        Recombinacion_2pts_2padres

```

```

        Worksheets("reporte").Cells(18, 2).Value = "2 Padres 2 Puntos"
    End If
    If ComboBox3 = "3 Padres 2 Puntos" Then
        Recombinacion_2pts_3padres
        Worksheets("reporte").Cells(18, 2).Value = "3 Padres 2 Puntos"
    End If

End Sub

.....

'programa al boton que hace la mutación
.....

Public Sub CommandButton5_Click()

    If ComboBox4 = "Aleatoria" Then
        Mutacion_aleatoria
        Worksheets("reporte").Cells(19, 2).Value = "Aleatoria"
    End If
    If ComboBox4 = "Incremento - Decremento" Then
        mutacion_incremento_decremento
        Worksheets("reporte").Cells(19, 2).Value = "Incremento-decremento"
    End If
    If ComboBox4 = "Mutación variable" Then
        Mutacion_variable
        Worksheets("reporte").Cells(19, 2).Value = "Variable"
    End If

End Sub

```

.....

'programa al boton que hace la evaluación de la pob intermedia

.....

```
Public Sub CommandButton6_Click()
```

```
    adaptacion_pob_intermedia
```

```
End Sub
```

.....

'programa al boton que genera la nueva generacion

.....

```
Public Sub CommandButton7_Click()
```

```
    If ComboBox5 = "Elitismo" Then
```

```
        Elitismo
```

```
        Worksheets("reporte").Cells(20, 2).Value = "Elistismo"
```

```
    End If
```

```
    If ComboBox5 = "Mejores padres e hijos" Then
```

```
        Mejores_PadresHijos
```

```
        Worksheets("reporte").Cells(20, 2).Value = "Mejores padres e hijos"
```

```
    End If
```

```
    If Worksheets("Control").Cells(20, 8).Value <> Worksheets("Control").Cells(10,  
5).Value Then
```

```
        Worksheets("Pob_Mejores").Range("A1:AZ5000").Copy
```

```
        Worksheets("Población").Paste
```

```
        Destination:=Worksheets("Población").Range("A1:AZ5000")
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
.....  
'programa al boton que ejecuta la totalidad del algoritmo  
.....
```

```
Public Sub CommandButton8_Click()
```

```
Dim NG, KI, KJ, GAC, RP As Integer
```

```
Dim Prom As Single
```

```
Dim HI, HF As Date
```

```
Dim Tprob
```

```
'Obtiene y escribe la hora de inicio
```

```
HI = Time
```

```
Worksheets("Reporte").Cells(2, 2).Value = HI
```

```
Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value
```

```
NG = Worksheets("Control").Cells(10, 5).Value
```

```
Worksheets("Control").Cells(24, 8).Value = 1
```

```
Tprob = Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value
```

```
Worksheets("Reporte").Range("D5:E5000").ClearContents
```

```
CommandButton1_Click 'Generación de la Población Inicial
```

```
CommandButton2_Click 'Evaluación de la Población Inicial
```

```
For KI = 1 To NG
```

```
    Worksheets("Control").Cells(24, 8).Value = KI
```

```
    CommandButton3_Click 'Selección
```

```
    CommandButton4_Click 'Recombinación
```

```
    CommandButton5_Click 'Mutación
```

```
    CommandButton6_Click 'Evaluación
```

```
    CommandButton7_Click 'Generación de la Nueva Generación
```

```

'Calcula el promedio del valor de aptitud de todos los individuos en la generación KI
Prom = 0
For KJ = 1 To Worksheets("Control").Cells(2, 2).Value
    Prom = Prom + Worksheets("Pob_Mejores").Cells(2, KJ).Value

Next KJ

Prom = Prom / Worksheets("Control").Cells(2, 2)
Worksheets("Reporte").Cells(KI + 4, 4).Value = KI
Worksheets("Reporte").Cells(KI + 4, 5).Value = Prom
Next KI

'Copia a Reporte el mejor cromosoma de todas las generaciones
Worksheets("Reporte").Range("H1:H5000").ClearContents
Worksheets("Pob_Mejores").Range("A1:A5000").Copy
Worksheets("Reporte").Paste Destination:=Worksheets("Reporte").Range("H1:H5000")

'Encuentra un campo vacio en Resultados_Previos
RP = 1
While Worksheets("Resultados_Previos").Cells(1, RP) <> 0
    RP = RP + 1
Wend

'Copia a Resultados_Previos el mejor cromosoma de todas las generaciones
For KI = 1 To (Nact * 2) + 2
    Worksheets("Resultados_Previos").Cells(KI, RP).Value =
Worksheets("Pob_Mejores").Cells(KI, 1).Value
Next KI
Duracion_proyecto
'Obtiene y escribe la hora de finalizacion

```

```
HF = Time
Worksheets("Reporte").Cells(3, 2).Value = HF
'Obtiene y escribe la hora de finalizacion
```

```
End Sub
```

```
'cantidad de padres necesarios segun el tipo de recombinacion
```

```
Public Sub ComboBox3_Change()
    If ComboBox3 = "3 Padres 2 Puntos" Then
        Worksheets("control").Cells(16, 2).Value = 3
    Else
        Worksheets("control").Cells(16, 2).Value = 2
    End If
End Sub
```

```
Public Sub commandbutton9_click()
```

```
exportar
```

```
End Sub
```

```
'halla la duración del proyecto para el cromosoma escogido como el mejor de la corrida
```

```
Public Sub Duracion_proyecto()
```

```
Dim original(), listasfs(), Nact, Ngenes, Predecesora, Nhijos, sumatoria, escape, cont,
cont2, fingrande, fintemp, codigo, todas_predecesoras, predecesoras_actividad
```

```
Dim Tpob, maximo, act_actual
Dim insumo, Cant_insumos, insumos()
```

```
Tpob = Worksheets("control").Cells(2, 2).Value 'encuentra el tamaño de la población
Nact = Worksheets("control").Cells(1, 2).Value 'encuentra el número de actividades del
proyecto
```

```
Ngenes = Nact * 2
```

```
cont = 0
```

```
Predecesora = 0
```

```
escape = 0
```

```
For i = 1 To Nact
```

```
    If (cont > Predecesora) Then
```

```
        Predecesora = cont
```

```
    End If
```

```
cont = 0
```

```
For j = 1 To 50
```

```
    If (Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, j + 1).Value > 0) Then
```

```
        cont = cont + 1
```

```
    End If
```

```
Next j
```

```
Next i
```

```
' Arriba se encontro cual es el maximo numero de predecesoras que tiene una actividad
para armar matriz
```

ReDim original(Nact, Predecesora + 1) 'se dimensiona matriz donde se encontrara la info original

ReDim listasfs(Nact, 3) 'se dimensiona vector de actividades terminadas con su comienzo y fin

For i = 1 To Nact

For j = 1 To Predecesora + 1

original(i, j) = Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, j).Value 'llena la matriz con la informacion original

Next j

Next i

For i = 1 To Nact

If (original(i, 2) = 0) Then ' comienza con las actividades sin predecesoras

original(i, 1) = 0 'borra actividad lista de la original

listasfs(i, 1) = Worksheets("Precedencias").Cells(i + 1, 1).Value ' pasa el codigo a la tabla listasfs

listasfs(i, 2) = Worksheets("reporte").Cells((i * 2) + 2, 8) + 1 'halla dia inicial

listasfs(i, 3) = Worksheets("Reporte").Cells((i * 2) - 1 + 2, 8) + listasfs(i, 2) - 1 'halla dia final

End If

Next i

While escape = 0 'ahora revisa las actividades con predecesoras


```

        todas_predecesoras = todas_predecesoras + 1 'suma cada vez que
encuentra una predecesora

                                'y solo continuara hasta que todas sumen
        If (fingrande < fintemp) Then
            fingrande = fintemp
        End If
    End If

Next l

If (fingrande = 0) Then
    Exit For
End If

Next j

    If (fingrande <> 0 And todas_predecesoras = predecesoras_actividad) Then 'revisa
que todas las opredecesoras cumplan

        original(s, 1) = 0 'borra actividad lista de la original
        listasfs(s, 1) = Worksheets("Precedencias").Cells(s + 1, 1).Value ' pasa el codigo
a la tabla listasfs
        listasfs(s, 2) = Worksheets("Reporte").Cells((s * 2) + 2, 8) + 1 + fingrande 'halla
dia inicial
        listasfs(s, 3) = Worksheets("Reporte").Cells((s * 2) - 1 + 2, 8) + listasfs(s, 2) - 1
'halla dia final
    End If

Next s

```

```
sumatoria = 0
```

```
For i = 1 To Nact
```

```
    sumatoria = sumatoria + original(i, 1) 'sumatoria de los codigos
```

```
Next i
```

```
If (sumatoria = 0) Then
```

```
    escape = 1 ' revisa cuando la lista original() esta vacia para salir del ciclo
```

```
End If
```

```
Wend
```

```
maximo = 0
```

```
For i = 1 To Nact
```

```
    If (listasfs(i, 3) > maximo) Then
```

```
        maximo = listasfs(i, 3)
```

```
    End If
```

```
Next i
```

```
Worksheets("Reporte").Cells(24, 2).Value = maximo
```

```
End Sub
```

```
Public Sub exportar()
```

```
'abre el archivo "C:\Solucion" de project
```

```
Dim pj As MSProject.Project
```

```
Set pj = CreateObject("MSProject.Project")
```

```
pj.Application.Visible = True
```

```
pj.Application.FileOpen ("C:\Solucion.mpp")
```

```
Dim i, j As Integer
```

```
Nact = Worksheets("Control").Cells(1, 2).Value 'Cantidad de Actividades
```

```
'crea una variable dummy de inicio
```

```
ActiveProject.Tasks.Add ("Inicio")
```

```
ActiveProject.Tasks("Inicio").Duration = 0 & "d"
```

```
'Crear las actividades en Project
```

```
For i = 2 To Nact + 1
```

```
    nombre = Worksheets("Actividades").Cells(i, 2)
```

```
    ActiveProject.Tasks.Add (nombre)
```

```
Next i
```

```
For i = 2 To Nact + 1
```

```
    nombre = Worksheets("Actividades").Cells(i, 2)
```

```
    retr = Worksheets("Reporte").Cells((i - 1) * 2 + 2, 8) 'obtiene el retraso de la actividad
```

```
    dur = Worksheets("Reporte").Cells((i - 1) * 2 + 1, 8) 'obtiene la duracion de la actividad
```

```
    ActiveProject.Tasks(nombre).Duration = dur & "d" 'asigna en project la duracion
```

```
    j = 2
```

```
    While IsEmpty(Worksheets("Precedencias").Cells(i, j)) <> True
```

```
        pred = Worksheets("Precedencias").Cells(i, j) 'codigo de la predecesora
```

```
    For k = 2 To Nact + 1
```

```
        If (pred = Worksheets("Actividades").Cells(k, 1).Value) Then
```

```
            pospred = k
```

```
            Exit For
```

```
        End If
```

```
    Next k
```

```
    nompred = Worksheets("Actividades").Cells(pospred, 2) 'nombre de la predecesora
```

```

    ActiveProject.Tasks(nombre).TaskDependencies.Add ActiveProject.Tasks(nompred),
    pjFinishToStart 'asigna cada predecesora
    ActiveProject.Tasks(nombre).TaskDependencies(j - 1).Lag = retr & "d" 'asigna el
    retraso a cada predecesora
    j = j + 1
Wend
'asigna la dummy como predecesora de las que no tienen predecesora para poder
asignarles el retraso
If j = 2 Then
    ActiveProject.Tasks(nombre).TaskDependencies.Add ActiveProject.Tasks("Inicio"),
    pjFinishToStart 'asigna la predecesora
    ActiveProject.Tasks(nombre).TaskDependencies(1).Lag = retr & "d" 'asigna el retraso
End If
Next i
End Sub

```

