



Metodología para la programación de la recolección manual de café en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %

Vanesa Ramírez Valencia

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial
Manizales, Colombia
2019

Metodología para la programación de la recolección manual de café en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %

Vanesa Ramírez Valencia

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctora en Ingeniería

Directora:
Ph.D Diana María Cárdenas Aguirre

Co-Director:
Ph.D Santiago Ruiz Herrera

Programa:
Doctorado en Ingeniería – Industria y Organizaciones

Línea de investigación:
Dirección de Producción y Operaciones

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial
Manizales, Colombia
2019

*Nada en la vida debe ser temido, solamente comprendido.
Ahora, es hora de comprender más, para temer menos.*

Marie Curie.

Agradecimientos

Agradezco a mi tutora Ph.D Diana María Cárdenas y codirector Ph.D Santiago Ruiz porque guiaron esta aventura hasta su último capítulo, con un gran apoyo y paciencia.

A la Universidad Nacional de Colombia, por ser mi segundo hogar, en donde llevo más de 10 años cumpliendo sueños. A Colciencias por el apoyo financiero que hizo posible esta ilusión.

A la Politécnica de Cataluña, España, por permitir realizar mi pasantía y conocer nuevas culturas.

A la Universidad Nacional de Costa Rica, por abrirme las puertas de su institución, y darme la oportunidad de conocer gente costarricense de un gran corazón que hicieron de mi estadía algo maravilloso.

Al Profesor Néstor Darío Duque Méndez por sus aportes técnicos en el desarrollo de la herramienta de programación usada en la investigación.

A mis amigos y compañeros Juan Camilo López, Verónica Duque y Alex Mauricio Ovalle por el apoyo y todos los momentos que vivimos en este largo viaje.

A Andrés Cardona por el apoyo incondicional, por impulsarme a seguir cada día y no permitir que este gran sueño se frustrara.

Por último a mi familia, especialmente a mi papá, mamá, hermano y abuela, los cuales estuvieron en cada momento de este largo camino con todo su apoyo incondicional, luchando día a día por este sueño. A mi tía Norma, Martha y María Elena, por creer siempre en mí y estar ahí con todos sus consejos. Los amo profundamente y son el motor de mi vida.

RESUMEN

Esta tesis doctoral se desarrolló en el sector cafetero de Colombia. El propósito principal de esta investigación es el diseño de una metodología para la programación de la recolección manual de café en pendiente superior a 20 %, dicho propósito da respuesta a la falta de programación en el proceso y a los sobrecostos que ocasionan los errores cometidos, en las actividades. El problema investigativo fue detectado tanto en la revisión sistemática de literatura, por medio de la identificación del vacío de conocimiento, como en el trabajo de campo desarrollado, el proceso contiene la realización de un muestreo por cuotas no proporcional, en fincas cafeteras del Departamento de Caldas (Colombia). La metodología está compuesta por 4 etapas, la última toma gran relevancia, ya que aplicó un algoritmo genético con el propósito de efectuar una adecuada asignación de personal, lo que genera no solo una novedad desde la herramienta utilizada en el sector, sino también resultados apropiados para el problema actual. A partir de la validación, la cual se realizó en campo, la metodología concluye en una propuesta que origina resultados satisfactorios, ya que logra no solo la reducción de los costos de la recolección de café, sino también una programación óptima del personal y de las labores, teniendo como resultados la recolección total del café maduro en los lote y la conservación de la calidad del fruto de café. De esta manera, se consigue probar la hipótesis investigativa planteada y cumple con los objetivos formulados.

Palabras claves: Agricultura, Sector Cafetero, Recolección de Café, Pendiente de Inclinación, Programación, Algoritmo Genético, Recurso Humano, Costos de la Recolección de Café.

Scheduling methodology for manual coffee harvesting in farms with slope gradients above 20 %

ABSTRACT

This doctorate thesis was carried out in the coffee sector of Colombia. Its main purpose was to design a scheduling methodology for manual coffee harvesting in farms with slope gradients above 20 %, in response to a lack of scheduling and extra costs associated with mistakes in the process. The research aim was developed through a combination of systematic literature review and fieldwork; both revealed the knowledge gap. In the developed field work, a non-proportional quota sampling was carried out on the coffee farms in the Department of Caldas, Colombia. The proposed methodology is composed of four stages, the last being of major relevance as a genetic algorithm was applied in order to properly assign personnel. This algorithm represents not only a novelty as a functional tool in the coffee sector, but also offers sound outcomes for the problem. Based on the validation from the field work, it was concluded that the proposed methodology confirmed satisfactory results. Not only was a reduction of harvest costs accomplished, but also an optimal scheduling of workers' labor, resulting in total harvest of ripe coffee from each lot and conservation of the quality of the coffee plant. Because of this, the research hypothesis was proved, and the formulated objectives were accomplished.

Keywords: Agriculture, Coffee Sector, Coffee Harvesting, Slope Gradient, Scheduling, Genetic Algorithm, Human Resource, Coffee Harvesting Costs.

Tabla de contenido

1	MARCO TEÓRICO - REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.1	PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES	22
1.1.1	GENERALIDADES DE LA PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES	22
1.1.2	PRONÓSTICOS COMO INSUMO PARA DECISIONES DE PROGRAMACIÓN	29
1.1.3	PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES EN LA AGRICULTURA	31
1.2	DESCRIPCIÓN DEL SECTOR CAFETERO EN COLOMBIA Y DE LA PROGRAMACIÓN DE LA RECOLECCIÓN MANUAL DE CAFÉ	40
1.2.1	IMPORTANCIA DEL SECTOR CAFETERO EN COLOMBIA	40
1.2.2	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PROGRAMACIÓN DE LA RECOLECCIÓN MANUAL DE CAFÉ	42
1.3	EL RECURSO HUMANO DESDE EL ENFOQUE DE PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES	45
1.3.1	GENERALIDADES Y ENFOQUES	46
1.3.2	ASIGNACIÓN DE PERSONAL	49
1.3.3	CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DE LOS RECOLECTORES DE CAFÉ	49
1.4	MARCO NORMATIVO	51
1.5	TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN	52
1.5.1	RECOCIDO SIMULADO	53
1.5.2	AGENTE INTELIGENTE	54
1.5.3	COLONIA DE HORMIGAS	54
1.5.4	BÚSQUEDA TABÚ	54
1.5.5	ALGORITMOS GENÉTICOS	55
1.5.6	TÉCNICAS DE PROGRAMACIÓN APLICADAS A LA AGRICULTURA	61
1.6	CONCLUSIONES PARCIALES	62
2	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	64
2.1	ETAPA 1: IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE VARIABLES	65
2.1.1	ANÁLISIS DEL PROCESO DE RECOLECCIÓN MANUAL DE CAFÉ	65
2.1.2	ANÁLISIS DE LA LITERATURA ESPECIALIZADA	83
2.1.3	SELECCIÓN DE VARIABLES	84
2.2	ETAPA 2: MODELACIÓN DE LA HERRAMIENTA PARA ASIGNACIÓN DE PERSONAL	87
2.2.1	DEFINICIÓN DEL PROCESO DE ASIGNACIÓN DE PERSONAL	87
2.2.2	SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE PROGRAMACIÓN	88
2.2.3	MODELACIÓN DE LA HERRAMIENTA SELECCIONADA	89
2.2.4	VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA SELECCIONADA	109
2.3	ETAPA 3: DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA PROGRAMACIÓN DE LA RECOLECCIÓN MANUAL DE CAFÉ EN ZONAS CON PENDIENTE DE INCLINACIÓN SUPERIOR A 20 %	117
2.3.1	PRONÓSTICO INICIAL	118
2.3.2	AJUSTE DE PRONÓSTICO	118
2.3.3	PROGRAMA MAESTRO	119
2.3.4	ASIGNACIÓN DE PERSONAL	124
2.3.5	EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	125

3	<u>VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA PROGRAMACIÓN DE LA RECOLECCIÓN MANUAL DE CAFÉ EN ZONAS CON PENDIENTE DE INCLINACIÓN SUPERIOR A 20 %</u>	133
3.1	PRONÓSTICO INICIAL	135
3.2	AJUSTE DE PRONÓSTICO	135
3.3	PROGRAMA MAESTRO	136
3.3.1	CANTIDAD DE PERSONAL NECESARIO POR LOTE	137
3.3.2	PRECIO DEL KILOGRAMO DE CAFÉ RECOLECTADO EN CADA LOTE	138
3.4	ASIGNACIÓN DE PERSONAL	141
3.4.1	ASIGNACIÓN DE PERSONAL, DE LA SEMANA DEL 6 AL 10 DE MAYO DEL 2019	142
3.4.2	ASIGNACIÓN DE PERSONAL, DE LA SEMANA DEL 13 AL 17 DE MAYO DEL 2019	143
3.4.3	ASIGNACIÓN DE PERSONAL, DE LA SEMANA DEL 20 AL 24 DE MAYO DEL 2019	144
3.4.4	ASIGNACIÓN DE PERSONAL, DE LA SEMANA DEL 27 AL 31 DE MAYO DEL 2019	145
3.5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	146
3.6	CONCLUSIONES PARCIALES	149
4	<u>CONCLUSIONES FINALES</u>	150
5	<u>FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y RECOMENDACIONES</u>	152
6	<u>DIVULGACIÓN DE RESULTADOS</u>	156
7	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	158
8	<u>GLOSARIO</u>	171
9	<u>ANEXOS</u>	172
9.1	ANEXO 1. TIPOS DE MUESTREO NO PROBABILÍSTICO.	172
9.2	ANEXO 2. INSTRUMENTO DETALLADO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS EN CAMPO. FINCAS (SE DESCRIBEN LOS ASPECTOS GENERALES DE LAS FINCAS)	173
9.3	ANEXO 3. PROFESORES EXPERTOS EN HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN, CON LA INFORMACIÓN DE SUS ESTUDIOS Y LA RESPUESTA QUE DIO CADA UNO EN LA ENTREVISTA REALIZADA.	175
9.4	ANEXO 4. ASIGNACIÓN DE PERSONAL SUGERIDA PARA EL AGREGADO 1, EN LA SEMANA DEL 6 AL 10 DE MAYO DEL 2019.	182
9.5	ANEXO 5. ASIGNACIÓN DE PERSONAL SUGERIDA PARA EL AGREGADO 2, EN LA SEMANA DEL 6 AL 10 DE MAYO DEL 2019.	182
9.6	ANEXO 6. ASIGNACIÓN DE PERSONAL SUGERIDA PARA EL AGREGADO 1, EN LA SEMANA DEL 13 AL 17 DE MAYO DEL 2019.	184
9.7	ANEXO 7. ASIGNACIÓN DE PERSONAL SUGERIDA PARA EL AGREGADO 1, EN LA SEMANA DEL 20 AL 24 DE MAYO DEL 2019.	185
9.8	ANEXO 8. ASIGNACIÓN DE PERSONAL SUGERIDA PARA EL AGREGADO 2, EN LA SEMANA DEL 20 AL 24 DE MAYO DEL 2019.	185
9.9	ANEXO 9. ASIGNACIÓN DE PERSONAL SUGERIDA PARA EL AGREGADO 1, EN LA SEMANA DEL 27 AL 31 DE MAYO DEL 2019.	186
9.10	ANEXO 10. INFORMACIÓN GENERAL DE LAS FINCAS VISITADAS EN EL TRABAJO DE CAMPO EN COSTA RICA.	186

Lista de figuras

<i>Figura 1. Hilo conductor para la construcción del marco teórico – referencial.</i>	21
<i>Figura 2. Estructura de un sistema jerárquico de planeación y control de la producción.</i>	23
<i>Figura 3. Cosechas de café en Colombia.</i>	41
<i>Figura 4. Surcos de café.</i>	43
<i>Figura 5. Método de recolección del café, por rama.</i>	44
<i>Figura 6. Flujo del algoritmo genético básico.</i>	56
<i>Figura 7. Selección del individuo.</i>	57
<i>Figura 8. Esquematización de la metodología de la investigación.</i>	65
<i>Figura 9. Colorimetría del grano de café.</i>	77
<i>Figura 10. Gráfico de influencias de las variables seleccionadas.</i>	84
<i>Figura 11. Proceso de asignación de personal.</i>	87
<i>Figura 12. Asociación de cada miembro de la población con los puntos de referencia en el hiperplano.</i>	93
<i>Figura 13. Cromosoma propuesto para el presente problema.</i>	95
<i>Figura 14. Cromosoma del ejemplo.</i>	105
<i>Figura 15. Cromosoma para desarrollar la función objetivo del lote 1.</i>	106
<i>Figura 16. Cromosoma para desarrollar la función objetivo del lote 2.</i>	106
<i>Figura 17. Cromosoma para desarrollar la función objetivo del lote 3.</i>	106
<i>Figura 18. Cromosoma 1 o padre 1.</i>	107
<i>Figura 19. Cromosoma 2 o padre 2.</i>	107
<i>Figura 20. Hijo 1 del proceso de cruce.</i>	108
<i>Figura 21. Hijo 2 del proceso de cruce.</i>	108
<i>Figura 22. Cromosoma mutado.</i>	109
<i>Figura 23. Información de los lotes, ingresada en el formulario del aplicativo web.</i>	110
<i>Figura 24. Información de los recolectores de café, ingresada en el formulario del aplicativo web.</i>	111
<i>Figura 25. Cromosoma tomado de la población inicial.</i>	111
<i>Figura 26. Cromosoma elegido como solución.</i>	112
<i>Figura 27. Asignación de personal encontrada por el algoritmo y mostrada en el aplicativo web.</i>	113
<i>Figura 28. Información de los lotes, ingresada en el formulario del aplicativo web.</i>	114
<i>Figura 29. Información de los recolectores de café, ingresada en el formulario del aplicativo web.</i>	115
<i>Figura 30. Asignación de personal encontrada por el algoritmo y mostrada al usuario.</i>	116
<i>Figura 31. Propuesta metodológica para la programación de la recolección manual de café, en pendiente superior al 20 %.</i>	118
<i>Figura 32. Botón para calcular la cantidad de personal necesario en el aplicativo web.</i>	125
<i>Figura 33. Información del ejemplo ingresada en el aplicativo web para calcular la cantidad de personal necesario.</i>	126
<i>Figura 34. Cantidad de personal a contratar sugerido por el aplicativo web.</i>	127
<i>Figura 35. Botón para calcular el precio que se debe pagar por un kilogramo de café maduro recolectado en el aplicativo web.</i>	128
<i>Figura 36. Información del ejemplo ingresada al aplicativo web con el fin de calcular el precio por kilogramo de café recolectado en cada lote.</i>	129
<i>Figura 37. Precio que se debe pagar por kilogramo de café recolectado sugerido por el aplicativo web.</i>	129
<i>Figura 38. Botón para realizar la asignación de personal disponible en el aplicativo web.</i>	130

<i>Figura 39. Información de los lotes del ejemplo ingresada al aplicativo web con el fin de realizar la asignación de personal.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 40. Información del personal del ejemplo ingresada al aplicativo web con el fin de realizar la asignación de personal.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 41. Asignación de personal sugerida por el aplicativo web.</i>	<i>132</i>
<i>Figura 42. Proceso de medir el café recolectado por un trabajador en cajuelas.....</i>	<i>154</i>

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Resultados de la revisión de literatura en las bases de datos WEB OF SCIENCE y SCOPUS.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2. Artículos identificados como muy relevantes, sus autores y principales objetivos.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3. Artículos identificados como medianamente relevantes, sus autores y principales objetivos.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4. Autores identificados como muy relevantes para el trabajo investigativo y el tipo de programación en el que enfocaron sus investigaciones.</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 5. Autores identificados como medianamente relevantes para el trabajo investigativo y el tipo de programación en el que enfocaron sus investigaciones.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 6. Clasificación de la literatura encontrada en Cenicafé.</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 7. Autores que han desarrollado herramientas o métodos para mejorar la recolección del grano de café y sus respectivos estudios.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 8. Autores identificados como muy relevantes para el trabajo investigativo y la herramienta de programación que desarrollaron.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 9. Autores identificados como medianamente relevantes para el trabajo investigativo y la herramienta de programación que desarrollaron.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 10. Datos recabados en las fincas.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 11. Datos recabados sobre los problemas de las fincas.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 12. Datos recabados sobre la planeación en las fincas.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 13. Datos recabados sobre los lotes de las fincas.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 14. Datos recabados sobre los operarios de las fincas.</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 15. Resultados de la influencia de la pendiente de inclinación del terreno en el rendimiento de los recolectores de café.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 16. Profesores expertos en herramientas de programación y la herramienta sugerida para la actual investigación.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 17. Rendimiento de cada recolector del ejemplo.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 18. Café maduro en cada lote del ejemplo.</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 19. Penalidad en el rendimiento por la pendiente de inclinación de los lotes del ejemplo.</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 20. Información de los lotes para la primera ejecución.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 21. Información de los recolectores de café para la primera ejecución.</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 22. Información de los lotes para la segunda ejecución.</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 23. Información de los recolectores de café para la segunda ejecución.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 24. Efecto $E_{\{r\}}$ que tendrá la pendiente de inclinación del terreno, en el rendimiento de los recolectores.</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 25. Cantidad de café maduro promedio en el lote, y el porcentaje de incremento en el precio.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 26. Lotes productivos de café, en la finca “La Popa”, con sus características.</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 27. Ajustes de los pronósticos de producción.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 28. Cantidad de personal necesario por agregado.....</i>	<i>138</i>
<i>Tabla 29. Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 6 al 10 de mayo del 2019.</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 30. Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 13 al 17 de mayo del 2019.</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 31. Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 20 al 24 de mayo del 2019.</i>	<i>140</i>

<i>Tabla 32. Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 27 al 31 de mayo del 2019.</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 33. Comparativo entre el precio que fijó el administrador de la finca y el que arrojó la herramienta de programación por cada kilogramo de café recolectado y la diferencia en pesos colombianos.</i>	<i>147</i>
<i>Tabla 34. Cantidad de café maduro estimado por lote, cantidad de café maduro recolectado por lote y la diferencia.....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 35. Artículos desarrollados en el actual trabajo investigativo.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabla 36. Ponencias realizadas en el actual trabajo investigativo.</i>	<i>157</i>

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país líder en la producción de café (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia [FNC], 2010 - 2014), ubicándose entre los 3 primeros productores a nivel mundial con una cifra de 12,8 millones de sacos (unidad equivalente a 60 Kg), superado únicamente por Brasil y Vietnam, países que produjeron 35,5 y 29,48 millones de sacos respectivamente, durante el 2018 (International Coffee Organization [ICO], 2019).

Es de importancia mencionar que la producción de café en estos tres países mencionados varía considerablemente. Para el caso de Brasil, catalogado como el “*Gigante del café*”, cuenta con fincas pequeñas y medianas en donde realizan la mayoría de actividades manualmente, pero sus grandes volúmenes de producción se deben a que es un país con un clima tropical y terrenos planos, lo que ha facilitado tener una producción mecanizada a un nivel industrial, con fincas de más de 2.000 hectáreas (Essence of Coffee, 2016).

Por otro lado, Vietnam, posee un proceso de recolección del grano de café más parecido al colombiano, ya que es un país situado al sureste de Asia, con un terreno montañoso en donde la mayoría de fincas siguen siendo pequeñas y medianas a cargo de familias y donde la mayoría de labores se realizan manualmente, y solo un 5 % son grandes, con una extensión de más de 500 hectáreas (Fórum Cultural del Café, 2018).

Adicional a esto, Colombia tiene reconocimiento a nivel mundial debido a la calidad del grano de café que produce (FNC, 2019),a, esto se debe en gran medida a el método de recolección que se emplea. La recolección manual de café es una operación crucial en la actividad cafetera de Colombia, ya que determina en gran medida la viabilidad económica del negocio (Duque O. y Cháves C., 2003).

La recolección manual de café es común en diferentes países. En Colombia la totalidad de la recolección de este fruto se realiza por este método, al igual que en países como Costa Rica, Guatemala, Kenia, entre otros. El proceso de recolección manual de este grano es muy similar, en su mayoría, consiste en seleccionar del árbol el fruto de café que se encuentre maduro y dejar el grano que aún le falte maduración.

Si bien es claro, que la forma de recolección del grano de café es similar en estos países, los sistemas productivos no lo son, ya que, varían aspectos como las densidades de siembra, manejo de la fertilización, manejo de plagas, condiciones climáticas, variedad sembrada, podas, etc. Así mismo, en Colombia se tienen diferentes sistemas productivos de acuerdo a la zona del país, en donde se pueden notar diferencias en cuanto a densidades de siembra, manejo de arvenses, fertilización, suelos, condiciones climáticas, entre otros, y aunque la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia ha intentado unificar los sistemas

productivos en el país, y tiene estándares para cada aspecto, aún se pueden observar zonas, inclusive fincas, las cuales manejan estas condiciones de manera diferente, ya sea por gusto del caficultor o por situaciones específicas de la finca.

Después de un análisis de literatura, se logra concluir que a pesar de identificarse investigaciones relacionadas con actividades de recolección del grano (Castañeda B., Montoya R., Oliveros T. y Vélez Z., 2014; Oliveros T., Medina R. y Tibaduiza V., 2015; Ramírez G., Buenaventura A., Oliveros T. y Sanz U., 2014) y la mano de obra (Duque O. y Dussán, 2004; Duque O., 2005), en estos estudios no se han abordado problemáticas relacionadas con la programación de recursos o actividades en la recolección manual de café. La mayoría de investigaciones relacionadas con la recolección del café, están enfocadas a la búsqueda de mecanismos para realizar más eficientemente esta actividad, tratando de incluir en algunos casos recolección semi-mecanizada a este proceso (tabla 7).

Con miras a detectar los tipos de programación aplicados en la agricultura, específicamente en las operaciones de cosecha manual, y teniendo en cuenta las variables de la investigación y las herramientas utilizadas se planteó una ecuación de búsqueda, que generó una revisión de la siguiente manera:

- Desde el título: “labor or staff or work or crew or shift or operatio* or "human resourc*"" y de “scheduling or assignment or modeling or planning”.
- Desde tema se definieron las palabras: “Agri* or farm or land or plantation or coffee or harvest”.

Esta ecuación de búsqueda se aplicó el 19 de octubre del 2019 en la base de datos WEB OF SCIENCE, con un total de 567 artículos encontrados. Adicional a esto, se definió la misma ecuación de búsqueda para aplicarse a SCOPUS, solo que en el segundo conjunto de palabras no se buscó desde tema, sino desde título, resumen y palabras claves; esta ecuación se aplicó en la misma fecha con un total de 520 artículos encontrados.

En total se encontraron 176 artículos repetidos entre una base de datos y otra, por lo que en total fueron 911 artículos, de los cuales no se pudieron encontrar dos. Los otros 909 fueron analizados desde el título, resumen y palabras clave, para realizar una clasificación previa; a partir de la cual se seleccionaron 114 artículos, que fueron leídos en su totalidad con el fin de obtener la clasificación observada en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la revisión de literatura en las bases de datos WEB OF SCIENCE y SCOPUS.

Clasificación de artículos	Total
Muy relevantes	8
Medianamente relevantes	17
No relevantes	884
No encontrados	2
Total	911

Fuente: Elaboración propia.

Con la revisión sistemática de literatura descrita anteriormente, se pudo concluir que se han encontrado algunos estudios en la agricultura en otros países (Abrahão y Hirakawa, 2018; Gautam, leBel y Beaudoin, 2017; Cunha, Silva, Andrade y Carvalho, 2016; Wishon, Villalobos, Mason, Flores y Lujan, 2015), pero no enfocados al tema principal del presente trabajo, ni al tipo de recolección que se realiza en Colombia para el sector cafetero, ya que se centran más en la actividad de recolección mecanizada.

Se ha detectado mediante entrevistas con cafeteros, los altos costos que representa la operación de recolección manual de café y el escaso número de personas, con las que actualmente se cuenta para realizar esta labor (Dinero, 2018), por lo cual genera la necesidad de programar de manera eficiente esta actividad. Con el fin de realizar una descripción detallada del proceso de recolección manual de café, identificar las principales problemáticas del sector y tener un acercamiento de campo, para ajustar lo encontrado en la literatura a la realidad de las fincas cafeteras de Colombia, se llevaron a cabo 18 visitas a fincas cafeteras del Departamento de Caldas, Colombia.

De las 18 entrevistas que se realizaron a los cafeteros del Departamento de Caldas, quienes se eligieron de la manera que se describirá en capítulos posteriores, 16 agricultores manifiestan que la mayor preocupación es la recolección manual del fruto, ya que esta operación representa del 50 % al 70 % de los costos totales de la producción del café, según la estructura de costos asesorada por la Federación Nacional de Cafeteros. Esto se debe a que es la labor que más horas de mano de obra demanda y, al tener constante producción de café a lo largo del año en Colombia, surge la necesidad de realizar esta actividad durante todos los meses del año, siendo las semanas de menos café maduro en los lotes, en las que más costoso sale la recolección de este fruto. En otros cultivos agrícolas como la uva, también se tienen problemas similares en la recolección del fruto (Ferrer et al., 2008; Arnaout y Maatouk, 2010).

Autores como Duque O. y Cháves C. (2003), mencionan que, en gran medida, la viabilidad económica del negocio cafetero la determina la recolección del fruto, por lo cual debe trabajarse más en este tema para generar sostenibilidad al sector; los

autores mencionan que, en el 2003, esta labor representaba entre el 35 % y el 40 % de los costos totales de producción, el 5 % de diferencia se debe a las decisiones administrativas que se toman en las fincas y que en algunas ocasiones son más acertadas. Por lo anterior se concluye que los costos de recolección han ido en incremento, al comparar el estudio realizado por Duque O. y Cháves C. (2003) y la estructura de costos que tienen actualmente los caficultores que se entrevistaron, esto se puede dar, en gran medida, por los costos de mano de obra. Además, el 80 % de los entrevistados coinciden en que cada día es más complicado encontrar personal para realizar esta labor, por lo que han tenido problemas al momento de contratar la mano de obra para recolectar el grano. Adicionalmente, el sector cafetero afronta una crisis debido a la escasez de mano de obra para recolectar el fruto (Dinero, 2018).

La pendiente de inclinación del terreno es una variable fundamental en la operación de recolección de café, ya que, como lo indican Silva y Carvalho (como se cita en Cunha et al., 2016), solo es posible mecanizar hasta una pendiente del 20 %. En Colombia la pendiente de inclinación de los terrenos es superior a 20 %, en la mayoría de los casos, razón por la cual esta operación debe ser manual. El Departamento de Caldas, en Colombia, cuenta con 25 municipios cafeteros (FNC, 2014) y todos estos se encuentran en zonas montañosas. Autores como Villegas B., Montoya R., Vélez Z. y Oliveros T. (2005), Martínez R., Montoya R., Vélez Z. y Oliveros T. (2005) y Castañeda B. et al. (2014) han encontrado que esta condición es de importancia, por lo que la han abordado en sus investigaciones con un enfoque diferente al del presente trabajo, ya que en ninguno de estos estudios tienen en cuenta esta variable para ver como afecta el rendimiento de los recolectores de café o incluirla en la programación de actividades; no obstante, la resaltan como principal en el análisis de las operaciones en torno a la recolección de café en Colombia.

Como se observará en la documentación del proceso, el 100 % de las fincas entrevistadas, realiza la programación de la recolección de café de manera empírica, desde la selección del tipo de personal y cantidad, asignación de actividades y priorización de lotes, hasta el precio del kilo de café recolectado dependiendo del lote; sin tener certeza sobre la eficiencia y pertinencia de sus decisiones para reducir los costos del proceso, manteniendo la mejor calidad del grano, debido a que todo se basa en el conocimiento del encargado de la finca. Así mismo, se pudo observar en las entrevistas con los cafeteros que, por no tener herramientas exactas y realizar las operaciones de programación de manera empírica, se cometen los siguientes errores:

1. Contratar personas sin experiencia (94 % de las fincas).
2. Distribución inadecuada de los surcos (89 % de las fincas).
3. Cálculo erróneo del precio a pagar por kilogramo recolectado (67 % de las fincas).
4. Mucho personal contratado (89 % de las fincas).
5. Poco personal contratado (72 % de las fincas).
6. Demoras para la recolección (83 % de las fincas).

Los errores mencionados impactan en los costos de la recolección de café, por lo que son críticos al momento de realizar la programación de las operaciones, y como se puede concluir de las cifras mencionadas, son muy comunes y se cometen constantemente, con relación a esto, también se evidencian estos errores en las investigaciones de Duque O. y Cháves C. (2003) y Duque O. y Dussán (2004).

Vacíos del conocimiento

Según la revisión de literatura que se desarrolló para la actual tesis doctoral y que se verá detenidamente en capítulos posteriores, se pudo detectar que la programación de actividades u operaciones en el sector cafetero ha sido poco estudiada. Así mismo, tampoco se han detectado estudios en este sector con miras a reducir costos manteniendo una excelente calidad del grano de café, a partir de una buena programación del proceso de recolección. Los principales hallazgos, son los siguientes:

- Como lo mencionan Castañeda B. et al. (2014), la condición de pendiente de inclinación del terreno afecta significativamente la recolección de café. Esta variable no ha sido tratada en los estudios que se han hallado hasta el momento, en el sentido de mejorar el proceso productivo en diferentes cultivos. Los autores consultados la han incluido sólo como restricción para el desarrollo de sus aportes o se han limitado a su referenciación.
- Duque O. (2005) indica que la mano de obra en la recolección de café en Colombia es el recurso más importante de la actividad. Se encontró que en los trabajos que se han realizado con respecto al personal de recolectores de café lo único que se ha estudiado es su caracterización y rendimiento bajo diferentes formas de pago, pero ningún autor se centró en la búsqueda de la eficiencia del recurso, esto contribuye en gran medida, porque los esfuerzos investigativos a nivel mundial en el sector cafetero, están direccionados al desarrollo de nuevas herramientas o mecanismo para recolectar el fruto maduro de los árboles.
- Solo se detectaron dos estudios que tienen en cuenta la calidad del fruto a recolectar (Ferrer et al., 2008; Arnaout y Maatouk, 2010), pero están aplicados a cultivos de uva, los cuales tienen características distintas en cuanto al proceso de recolección y características del cultivo del café.

Después de realizar la revisión de la literatura encontrada, detectar que la programación de actividades en el sector cafetero no ha sido estudiada y que las investigaciones analizadas no dan respuesta al problema de programación de la recolección manual de café (el análisis de toda la literatura especializada se puede observar en el siguiente capítulo), se puede concluir como vacío general, que no existen investigaciones que traten la programación de las operaciones en el sector

cafetero. Adicionalmente, no se encuentran estudios que busquen la reducción de costos, manteniendo la calidad del grano de café, incluyendo las características de la pendiente de inclinación del terreno y del recurso humano, como condición principal.

Para dar solución al problema en la programación de la recolección manual de café, se realizó una selección de herramientas que fueran eficientes de acuerdo con las características del proceso, teniendo en cuenta todas las variables identificadas. Se diseñó una metodología que se describirá al final del capítulo 2, en donde se incluye un algoritmo genético, que se explicará detenidamente en el desarrollo de la tesis doctoral.

Una vez definida la situación problemática, la cual esta basada en la revisión de literatura previa y el trabajo de campo desarrollado; se procede a definir como pregunta general de la investigación:

¿Cómo se debe programar la recolección manual de café, considerando las características de la pendiente de inclinación del terreno superior a 20 % y del recurso humano, con el fin de minimizar costos de operación manteniendo la calidad del grano recolectado?

Así mismo se definen como subpreguntas de la investigación, las siguientes:

- ¿Cuáles son las principales variables, sus características y parámetros en la programación del proceso de recolección manual de café, en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %?
- ¿Cuáles son las etapas de la metodología propuesta y los procedimientos necesarios para la programación de la recolección manual de café, en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %, con el fin de reducir los costos en la operación, manteniendo la calidad del grano de café recolectado?
- ¿Qué impacto tiene la aplicación de la metodología propuesta, en los costos de la operación de recolección manual de café, manteniendo la calidad del grano, en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %?

Posteriormente al planteamiento de la pregunta general y las subpreguntas de investigación, se procede a definir el objetivo general y los objetivos específicos:

Objetivo general

Diseñar una metodología de programación de la recolección manual de café, considerando las características de la pendiente de inclinación del terreno superior a 20 % y del recurso humano, con el fin de minimizar costos de operación, manteniendo la calidad del grano recolectado.

Objetivos específicos

- Identificar, caracterizar y parametrizar las principales variables que impactan la programación de la actividad de recolección manual de café en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %, mediante una revisión de literatura especializada y una investigación en campo con un alcance descriptivo en el sector cafetero.
- Definir cada etapa de la metodología propuesta, así como, los procedimientos y herramientas necesarias para la programación de la recolección manual de café, en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 % con el fin de reducir los costos en la operación, manteniendo la calidad del grano de café recolectado.
- Validar el impacto de la metodología para la programación de la recolección manual de café, en el costo de la actividad, manteniendo la calidad del grano recolectado, a través de la aplicación en una finca cafetera del Departamento de Caldas, Colombia.

Con el objetivo general de la investigación planteado y los objetivos específicos definidos, se procede a formular la hipótesis general de la investigación:

Hipótesis general de la investigación

Una metodología de programación para la recolección manual de café, considerando las características de la pendiente de inclinación del terreno superior a 20 % y del recurso humano, permitirá reducir costos de recolección de café, manteniendo la calidad del grano recolectado.

De esta manera, la actual tesis doctoral propuso una metodología compuesta por tres etapas, las cuales al desarrollarse a lo largo de este documento dan como resultado la metodología para la programación de la recolección manual de café con pendiente superior a 20 %. Se realizó una validación en campo de esta metodología desarrollada, en donde se compararon los costos de la recolección de café si las decisiones las hubiera tomado el encargado de la finca y los costos con las decisiones tomadas con la ayuda de la metodología propuesta, obteniendo buenos resultados en cuanto a reducción de costos de recolección manual de café y en programación de diferentes actividades, disminuyendo los errores cometidos frecuentemente por los administradores de las fincas cafeteras en este proceso. Así mismo, se valida que la metodología proporciona un número adecuado de personas para realizar la labor de recolección semanalmente, logrando la recolección del 100 % del café maduro en cada lote, garantizando la calidad del producto.

El alcance de la presente tesis doctoral, que tiene como objetivo el diseño de una metodología para la programación de la recolección manual de café, estaría limitado principalmente por su validación, ya que, realizar una correcta aplicación, necesita la disponibilidad completa de una finca cafetera, debido a que hay que

implementar cambios en casi todas las actividades del proceso. Una vez se cuente con la finca dispuesta a realizar la programación de la recolección manual de café con la metodología diseñada, se procederá a ejecutar la validación durante un periodo de alta producción, que corresponderá a un mes, es decir, a cuatro aplicaciones de la herramienta o cuatro programaciones independientes. Si bien, con esta muestra no se pueden generalizar resultados, si se tendrá a rasgos generales como funciona la metodología propuesta en la realidad.

En esta tesis doctoral se encontrarán 6 capítulos que forman parte del desarrollo de la investigación. Inicialmente se expone el desarrollo del marco teórico – referencial de la investigación y se presenta la metodología de la investigación. Posterior a esto, en el capítulo 3, se realiza la validación de la metodología para la programación de la recolección manual de café en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %, seguido de las conclusiones finales en el apartado 4. Se encuentran las futuras líneas de investigación en el capítulo 5, y en el capítulo 6 las actividades y productos que permitieron la divulgación de resultados.

1 Marco teórico - referencial de la investigación

En el presente capítulo se aborda el marco teórico – referencial de la investigación, el cual está dividido en 6 temas específicos. El primero, expone la introducción general a la programación de operaciones y su aplicabilidad en la agricultura; el segundo, aborda el recurso humano desde el enfoque de programación de operaciones en la agricultura; el tercero, analiza la normativa que aplica en la actualidad para las labores humanas en Colombia; el cuarto, describe el sector cafetero en Colombia y la programación de la recolección manual de café; el quinto, aborda las técnicas de programación útiles con el fin de resolver el actual problema; por último, en el sexto punto, se exponen las conclusiones parciales del marco teórico – referencial de la investigación. De esta manera, se da desarrollo al marco teórico y contextual de la actual tesis doctoral, cuya estructura se puede ver en la figura 1.

Figura 1. Hilo conductor para la construcción del marco teórico – referencial.



Fuente: Elaboración propia.

1.1 Programación de operaciones

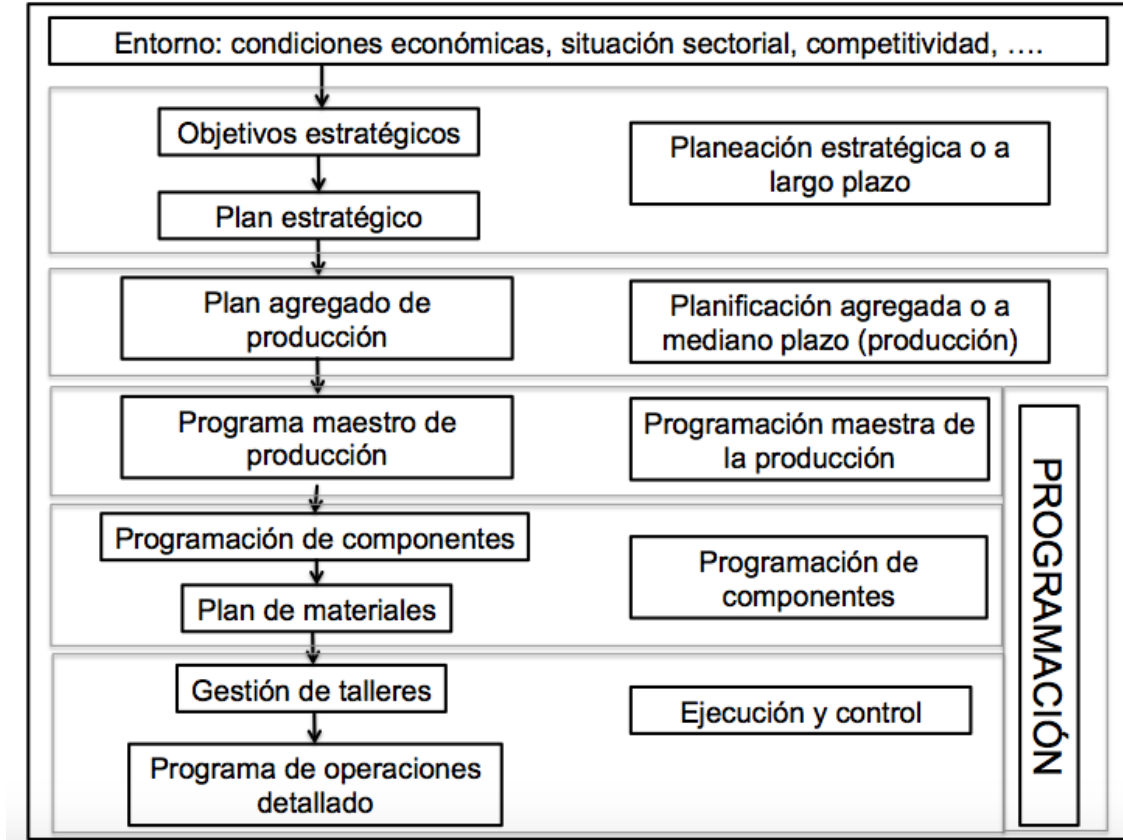
A continuación se describen las generalidades de la programación de operaciones, los pronósticos de producción, ya que se utilizarán como datos de entrada en las decisiones de programación, y la programación de operaciones directamente aplicada al sector agrícola.

1.1.1 Generalidades de la programación de operaciones

Desde los trabajos de Skinner (1969) y Skinner (1974), la gestión de operaciones ha sido una actividad estratégica y ha dado lugar a diversas investigaciones, con enfoques diferentes para su abordaje. Autores como Davis, Aquilano y Chase (2001) y Vollmann et al. (2005), realizan una propuesta de planeación y control de la manufactura, donde dividen las actividades que soportan el sistema, en tres horizontes de tiempo: largo plazo, plazo intermedio y corto plazo. Así mismo, Chase, Jacobs y Aquilano (2006), dividen en estos mismos horizontes de tiempo las operaciones y actividades en la planeación del abastecimiento, con la diferencia que, a partir del mediano plazo, hace una diferenciación entre las actividades de manufactura, logística y servicios, siendo un poco más detallados en cada una de ellas.

El enfoque jerárquico se ha posicionado como una forma completa y sistemática de analizar el proceso de programación y control de las operaciones, como lo proponen múltiples autores (Gaither y Frazier, 2000, Davis, Aquilano y Chase, 2001, Vollmann et al., 2005, Chase, Jacobs y Aquilano, 2006 y Chapman 2006). Ahora bien, Domínguez Machuca et al. (1995)^b, comienzan con esta corriente jerárquica, siendo más específicos en las 5 fases que proponen (figura 2).

Figura 2. Estructura de un sistema jerárquico de planeación y control de la producción.



Fuente: adaptado de Domínguez Machuca et al. (1995)b.

En comparación con otros autores, Domínguez Machuca et al. (1995)b describen el proceso de toma de decisiones en la planeación y control de operaciones más detalladamente; debido a esto, es que para el presente trabajo, se toma la estructura de un sistema jerárquico que dichos autores desarrollaron.

1.1.1.1 Descripción detallada de cada fase de la estructura de un sistema jerárquico de planeación y control de la producción

En el presente apartado, se realiza una descripción de la estructura del sistema jerárquico de planeación y control de la producción, para lograr la identificación correcta de las fases que se utilizarán en la actual investigación.

- **Planificación estratégica**

Esta fase comienza por la planeación estratégica del negocio y, posteriormente, se desarrollan las estrategias funcionales de la empresa (Fernández, Avella y Fernández, 2003). Bueno (1993) menciona que la planeación estratégica es “un modelo de decisión que revela las misiones y objetivos de la empresa, así como las

políticas y planes esenciales para lograrlos, de tal forma que se defina la posición competitiva como respuesta a la clase de negocio en que la firma está o quiere estar y a la clase de organización que quiere ser". Domínguez Machuca et al. (1995) definen la planificación estratégica como "un proceso de desarrollo de la Estrategia Empresarial, conecta la misión actual de la organización y sus condiciones ambientales, estableciendo una guía para la decisión y resultados de mañana". Autores como Miranda González, Rubio Lacoba, Chamorro Mera y Bañegil Palacios (2006) definen la planeación estratégica como "el proceso de análisis, planificación, ejecución y control de las acciones a acometer en el presente para situar a la organización en posición adecuada para competir con ventaja en el futuro".

Miranda González et al. (2006) dividen la planificación estratégica en tres etapas secuenciales de la siguiente manera:

- La fijación de objetivos a largo plazo.
- La fijación de estrategias.
- La determinación de las tácticas o acciones.

Estas tres etapas mencionadas, construirían el plan estratégico de una organización, que posteriormente se desplegará en las estrategias funcionales del negocio, las cuales irán alineadas con la estrategia global definida. Es importante destacar que las definiciones presentadas anteriormente, dentro de la planeación estratégica, caben en cualquier nivel de la organización. De esta manera, se pueden tomar para desarrollar la estrategia global de la compañía o desarrollar la estrategia funcional de cualquier departamento de la empresa, como por ejemplo producción, en donde contribuye a definir y desarrollar la estrategia de producción, la cual irá alineada con la estrategia general.

En lo que hace referencia a las operaciones agrícolas en el nivel estratégico, se pueden encontrar autores como Abrahão y Hirakawa (2018), que describen la ontología de tareas en operaciones agrícolas (AGROPTO), donde se desarrollan modelos conceptuales que describen aspectos de tareas complejas y posibles soluciones de modelado, con el fin de tomar decisiones estratégicas y a largo plazo en este negocio. Sopegno, Busato, Berruto y Romanelli (2016) presentan un modelo matemático con el fin de predecir el costo de las operaciones en el campo y del transporte para múltiples cultivos; el modelo que proponen, referido al nivel estratégico de toma de decisiones, establece un sistema de producción agrícola relacionado con el diseño del sistema de mano de obra / maquinaria en relación con los tipos de cultivos seleccionados.

- **Planificación táctica**

La planeación táctica de operaciones puede ser denominada planeación de ventas y operaciones, como lo proponen Chase, Jacobs y Aquilano (2006) y Heizer y Render (2015), quienes mencionan que este proceso se conoce también como planeación agregada, y que por lo general incluye la planeación de actividades de la gerencia general, ventas, operaciones, finanzas y desarrollo de productos. Chase, Jacobs y Aquilano (2006) definen el propósito del plan agregado como “la combinación óptima de índice de producción, nivel de fuerza de trabajo e inventario a la mano”.

Así mismo, autores como Buffa y Sarin (1987), describen que el plan agregado va sujeto a la necesidad de los gerentes de planificar y controlar las operaciones en un nivel más amplio, de modo que supere los detalles de los productos individuales y la programación detallada de las instalaciones y el personal, para de esta manera tener un panorama más general en todo el proceso de planificación de la producción.

De las técnicas utilizadas para realizar la planificación agregada, se puede encontrar 3 grupos principalmente (Domínguez Machuca et al., 1995b), que se mencionan a continuación:

- Intuitivos.
- Analíticos.
- De simulación.

Autores como Heizer y Render (2015) mencionan algunos métodos similares a los de los autores descritos anteriormente, como son los métodos gráficos y los métodos matemáticos, identificados como técnicas intuitivas y analíticas, respectivamente. Se puede observar que los autores no tienen en cuenta los métodos de simulación para desarrollar planes agregados, que también son utilizados en la actualidad.

Centrando la programación táctica en el sector agrícola, se pueden destacar autores como Bing, Fulin, Jiquan y Shengxue (2017), que establecen un modelo de estimación de la demanda de mano de obra en la industria agrícola, específicamente en el proceso de la siembra, considerando los factores de la estructura de siembra y el grado de mecanización. El modelo establecido en este estudio puede utilizarse para calcular la demanda laboral actual en el proceso de siembra y la demanda laboral en los distintos momentos en el futuro a través de la previsión del nivel de mecanización futuro y el área cultivada. Por otra parte, autores como Wishon, Villalobos, Mason, Flores y Lujan (2015),

se enfocan en determinar el número apropiado de trabajadores para la plantación y cosecha de frutas y hortalizas, con el fin de adquirir la mano de obra necesaria con anterioridad.

- **Programación maestra**

El programa maestro de producción según Gaither y Frazier (2000), es el que “establece el volumen final de cada producto que se va a terminar cada semana del horizonte de producción a corto plazo”. En este programa se incluyen los pronósticos del mercado, los pedidos de los clientes, los niveles de inventario, la carga de las instalaciones y la información de capacidad. La información de la capacidad está delimitada por el plan agregado, por lo que, el programa maestro toma esta capacidad y la pasa a corto plazo asignando los pedidos de productos finales. Hill y Hill (2012), mencionan que el programa maestro luego será utilizado como entrada a la programación de componentes, y se realizará por medio de la explosión de partes.

Como lo menciona Chapman (2006), el programa maestro es de alta relevancia, ya que todo negocio cuenta con uno. Independientemente que sea informal, al punto que exista solo en la cabeza de alguna persona de la organización, el programa maestro es el principal vínculo con los clientes, lo que lo vuelve imprescindible. Arnold y Chapman (2001) lo mencionan también como un programa fundamental, debido a que es la comunicación directa con ventas y manufactura en una organización, resaltando que el programa maestro genera un vínculo entre la planeación de la producción y lo que se está realizando en la actualidad. Adicional a esto, y como lo subrayan los autores, es la forma más básica de calcular la capacidad y los recursos que se necesitan en una empresa, al igual que prioriza el plan de manufactura y es insumo para conocer las unidades de material que se requieren.

La programación maestra especifica los artículos finales que la organización había planificado producir para satisfacer la demanda. Con más detalle, la programación maestra es la presentación de un periodo de planificación de la demanda, incluyendo los pronósticos y las reservas, el plan de suministro, la finalización del inventario y la promesa de cantidad (Fogarty, Hoffmann y Stonebraker, 1989). Greeff y Ghoshal (2004) mencionan que generar un programa maestro de producción lo mas ajustado posible, se debe comparar la carga de trabajo contra la capacidad, y un periodo base de demanda versus el análisis del suministro.

Según afirman Render y Heizer (2014), un ejemplo de “un plan fijo de 7 semanas tiene una semana adicional que se agrega al completar cada semana, de manera que mantiene un programa fijo de 7

semanas”. De igual manera, los autores mencionan que el programa maestro indica lo que se debe producir y no es un pronóstico de la demanda.

En cuanto al horizonte de tiempo de programación, autores como Miranda González et al. (2006) mencionan que éste puede variar de acuerdo con el tipo de producto, volúmenes de producción y tiempos de entrega, por lo que puede ser de unas horas, semanas o meses. Así mismo, los autores mencionan que, para introducir flexibilidad al programa, es necesario establecer distintos límites temporales como: sección congelada o fija, sección moderadamente firme o medio fija y sección flexible o abierta.

De las técnicas utilizadas para desarrollar el programa maestro de una organización, se encuentran desde métodos informales, llevados en hojas de cálculo, hasta programas maestros de producción computarizados (Gaither y Frazier, 2000). Así mismo, Vollmann et al. (2005) incluyen dentro de las principales técnicas para desarrollar un programa maestro de producción las siguientes:

1. Registro de tiempo – fases.
2. Rodando a través del tiempo.
3. Promesa de orden.
4. Consumiendo el pronóstico.
5. Promesa de orden con ATP.

En los agroecosistemas también se encuentran trabajos enfocados en la programación de operaciones a corto plazo (Ooster et al., 2013, Ooster et al., 2015, Wishon et al., 2015) o programación maestra; autores como Arnaout y Maatouk (2010) desarrollan un programa maestro para minimizar los costos de recolección de la uva, mediante la aplicación de una heurística enfocada a asignar mejor los días de recolección, teniendo en cuenta la optimización de la calidad del vino. Por su parte, autores como Wu, Zhao, Wang, Zhou y Cai (2015) enfocan su investigación en el desarrollo de un programa maestro que utiliza un sistema de Programación de Operación Picker de Algodón (CPOSS), el cual permite despachar maquinaria y labores, y guiar las labores hacia el campo de destino, además de programar de manera efectiva y justa diferentes tipos de recolectores de algodón y trabajadores con diferentes habilidades.

La metodología para la programación de la recolección manual de café, según todo lo analizado en este capítulo, se inscribirá en la

programación maestra o a corto plazo, ya que al ser un cultivo agrícola, está sujeto a cambios en la cantidad de producción de acuerdo al clima de la semana inmediatamente anterior de la recolección del café, por lo que finalizando la semana anterior a la recolección del fruto, se debe estimar la cantidad de trabajadores por lote necesarios para recolectar el café que se encuentre maduro. Esta estimación se da con el ajuste de la cantidad de kilogramos de café por lote disponible y con el rendimiento por trabajador. Con esta información, se propone el programa maestro para la recolección del café.

- **Programación de componentes**

También llamado por algunos autores como el plan de requerimientos de material (Arnold y Chapman, 2001), se puede definir como la programación necesaria para que estén disponibles los materiales correctos, en las cantidades que se requieren, en los tiempos justos, con el fin cumplir el programa maestro previamente definido.

Render y Heizer (2014), mencionan que, en este punto, existen tres listas importantes. La primera, es la lista modular, que como su nombre lo indica, es la lista de materiales por módulos; la segunda, es la lista de planeación, que se crea para asignar un “*padre*” artificial a la lista estructurada de materiales; y la tercera, es la lista fantasma, estructurada con materiales y componentes que existen sólo temporalmente.

Autores como, Krajewski, Malhotra y Ritzman (2016) mencionan que la programación de materiales no se encuentra en un tercer nivel (programación detallada), como se tiene descrito en el presente documento, sino que pertenece al nivel de la programación maestra, justo después de la planeación agregada, dejando en el último nivel la programación del trabajo y equipos. Cabe destacar que los autores manejan los mismos horizontes de tiempo (corto, mediano y largo plazo) que se tienen descritos en el proceso de programación o planificación de operaciones elegida para el actual trabajo.

En las investigaciones enfocadas al sector agrícola no se detecta ningún estudio que trate la programación de componentes. Esto se puede deber a que el proceso de producción en los agroecosistemas es diferente al de la industria y la disponibilidad de componentes para llevar a cabo las actividades agrarias es poco relevante, ya que en su mayoría el proceso consiste en recolectar el producto del campo.

Enfocando la literatura en la programación detallada, se encontraron autores como Wijngaard (1988), Corner y Foulds (2005), Ferrer et al. (2008), Guan et al. (2008) y Arnaout y Maatouk (2010), que abordan

la programación de operaciones desde este nivel en diferentes cultivos agrícolas. Para el proceso de recolección manual de café, la programación detallada se refiere a la asignación de los recolectores de acuerdo con las cantidades a recolectar y los tiempos disponibles según las características de cada uno de los lotes cultivados.

- **Ejecución y control**

También conocido como implementación y control de la producción. La ejecución y control de procesos está orientada al ordenamiento del flujo de material para obtener los objetivos de una producción eficiente. El control, específicamente, se define como el control de inventarios, seguimiento de órdenes de producción y aprovisionamiento (Larrañeta, Onieva y Lozano, 1995).

Bajo esta misma definición, se puede enmarcar la ejecución y control de los procesos agrícolas. Aunque no son los mismos controles que se aplican en la industria, debido a que los procesos en el sector agrícola tienen características distintas a los industriales, sí se emplean en diferentes puntos de la producción en este sector. Por ejemplo, en el proceso de recolección de café, diariamente se pesa el café recolectado en cada lote, para saber cuánto se debe procesar.

Según los estudios analizados y referenciados, se puede concluir que las investigaciones del sector agrícola se centran principalmente en las 3 primeras fases de la estructura de un sistema jerárquico de planeación y control de la producción. Sin embargo, de acuerdo al objetivo principal de la presente investigación, y a los horizontes de tiempo que se utilizará, la programación maestra es la fase en donde la metodología para la programación de la recolección manual de café comenzaría, con el fin de definir a corto plazo la cantidad de trabajadores que se necesitan por lote. Posterior a esto, la metodología propuesta, continuará con la programación detallada, específicamente, en la asignación del personal disponible, ya que es el recurso principal en este proceso y el que limita la capacidad disponible, por lo que la asignación de cada recolector al lote indicado es lo que genera más relevancia en la actual investigación.

1.1.2 Pronósticos como insumo para decisiones de programación

Según la literatura, la planeación agregada es el insumo principal en la formulación de un programa maestro, sin embargo, en el sector estudiado esta actividad no se realiza, por lo que se acoge en esta investigación la posición de Castrillón, Giraldo, y Sarache (2009)b, según la cual se puede hacer uso de pronósticos como insumo para decisiones de planeación. La utilización de pronósticos, también se detectó anteriormente como técnica con el objetivo de realizar el programa maestro de producción en una compañía.

Autores como Render y Heizer (2014), mencionan que pronosticar es “el arte y la ciencia de predecir los eventos futuros”, y lo dividen en 3 tipos de pronósticos: a corto, mediano y largo plazo; los pronósticos a largo y mediano plazo manejan aspectos más generales y apoyan decisiones enfocadas a la planeación de los productos que produce una empresa, a las instalaciones de la planta productiva y a los procesos, es decir, enmarca todo lo relacionado a decisiones más estratégicas del negocio y de tipo gerencial. Dado el objetivo del presente trabajo investigativo, estos tipos de pronósticos no son aplicables. Los pronósticos a corto plazo, por el contrario, pueden tener un horizonte de tiempo de hasta un año, son de utilidad para desarrollar el plan de compras, determinar niveles de mano de obra, asignar trabajos y decidir los niveles de producción (Render y Heizer, 2014), por lo que son los tipos de pronósticos aplicables al presente estudio, ya que contemplan decisiones operativas que son las que se deben tomar en la actual investigación.

Otros autores como Hanke y Reith (1996), realizan una clasificación de los tipos de pronósticos mucho más detallada, dividiéndolos en tres tipos: según el horizonte de tiempo, la posición de la empresa en el entorno y la metodología empleada. Según el horizonte de tiempo es muy similar al de Render y Heizer (2014), en donde ya se definió que el trabajo está dentro de un horizonte de tiempo a corto plazo. Según la posición de la empresa en el entorno, los autores los clasifican en dos tipos: micro o macro. La actual investigación, por desarrollarse con el propósito de realizar una programación de personal en la recolección de café al menor costo posible, requeriría un pronóstico tipo micro.

Por último, según la metodología empleada, se tienen de tipo cuantitativo o cualitativo. Los de tipo cualitativo, como lo mencionan los autores, son en los que se emplea el “juicio” de quien pronostica; mientras que, por otro lado, los de tipo cuantitativo no requieren elementos de juicio, son enfocados a una manipulación de datos que producen los resultados cuantitativos. El actual trabajo emplea los de tipo cualitativo para pronosticar la producción de café por lotes de las fincas. Este proceso utiliza el registro de floraciones, que es una técnica desarrollada en varias fincas cafeteras (de las 18 fincas visitadas en el trabajo de campo, 12 de ellas realizan esta actividad), el cual consiste en hacer un registro por lotes cada que florecen los árboles para pronosticar un plazo de 32 semanas aproximadamente (semanas que hay entre la floración y la recolección del grano), la producción de café. Estos pronósticos van sujetos al juicio del administrador o encargado de la finca, quien clasifica entre una floración muy buena, buena, regular y mala, de acuerdo a la cantidad de flores que ve en el lote y su experiencia previa. Es de importancia mencionar, que este pronóstico solo es la base para realizar el programa maestro de la recolección manual del café, ya que al ser el objeto de estudio el sector agrícola, se debe ir ajustando a la realidad, de acuerdo al comportamiento climático, que afecta directamente la producción. Este ajuste, es conveniente llevarlo a cabo una semana antes de la recolección, para que el pronóstico de la producción de café por lote sea lo más acertado posible.

Con lo anteriormente descrito, se puede concluir que los pronósticos que se emplearán para el programa maestro de la recolección manual de café, serán en un sector económico micro, con una metodología cualitativa y de corto plazo, con un horizonte de pronóstico de 32 semanas aproximadamente.

1.1.3 Programación de operaciones en la agricultura

Después de realizar una revisión de la teoría relacionada con el proceso de programación de operaciones y detectar algunos aspectos útiles, es claro que el sector agrícola posee particularidades propias que afectan directamente la programación. Por esto, para detectar qué tipos de programaciones se han realizado en la agricultura en las operaciones de cosecha manual, qué variables se están teniendo en cuenta en las investigaciones y qué herramientas se están utilizando, se desarrolló una revisión sistemática de literatura.

La metodología que se siguió en la revisión sistemática de literatura comienza con la definición de la ecuación de búsqueda. Desde título se definieron las palabras "labor or staff or work or crew or shift or operatio* or "human resourc*"" y de "scheduling or assignment or modeling or planning" y desde tema se definieron las palabras: "Agri* or farm or land or plantation or coffee or harvest"; palabras que fueron utilizadas en las bases de datos WEB OF SCIENCE y SCOPUS. Adicionalmente, se consultaron las investigaciones que se han realizado en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) sobre el tema.

1.1.3.1 Revisión de literatura en las bases de datos WEB OF SCIENCE y SCOPUS

Los artículos que se identificaron como muy relevantes (tabla 1) son los que se centraron en el tema de programación de recursos o actividades, enfocadas directamente a la agricultura, incluyendo el recurso humano como prioridad en las investigaciones. Los que se identificaron como medianamente relevantes son las investigaciones que pueden contribuir a la investigación desde condiciones especiales de algún tipo de cultivo, alguna metodología o método interesante para analizar en el desarrollo de la investigación y herramientas de solución a problemas del mismo tipo. Los artículos no relevantes son los que no tienen aporte a la tesis doctoral y tratan temáticas muy diferentes a las actualmente investigadas.

De los resultados obtenidos de la ecuación de búsqueda, se realizó un análisis detallado de cada artículo seleccionado, y se obtuvo la información que se observa en las tablas 2 y 3:

Tabla 2. Artículos identificados como muy relevantes, sus autores y principales objetivos.

Autores	Objetivo
Wijngaard (1988)	El problema básico que aquí se considera es la programación de los puestos de trabajo. Los ejemplos incluyen la cosecha de grano, empacado de paja y arado. La programación consiste en asignar los hombres y las máquinas a los puestos de trabajo y la asignación de puestos de trabajo a los períodos de tiempo. El objetivo es la minimización del costo. La asignación se llevan a cabo bajo varias restricciones: el número de puestos de trabajo, los equipos y hombres disponibles y las propiedades de los materiales (estos últimos están relacionados con el clima). Aplica una heurística para la solución del problema.
Corner y Foulds (2005)	Realizar un informe sobre el desarrollo y aplicación de un modelo de programación para un escenario particular que involucra la recolección de bloques forestales. El objetivo primario del estudio de caso de recolección reportado en este trabajo, es especificar la actividad de cada trabajador y cada máquina, en cada período de tiempo, con el fin de minimizar la duración de la recolección de todo el bloque.
Ferrer, Mac Cawley, Maturana, Toloza y Vera (2008)	Desarrollar una herramienta práctica basada en programación lineal entera mixta, para programar de manera óptima las operaciones de cosecha de uva, teniendo en cuenta tanto los costos operativos y la calidad de la uva. Busca un modelo de optimización que equilibra los costos operativos del proceso de recolección, con los efectos de pérdida de calidad de la uva.
Guan, Nakamura, Shikanai y Okazaki (2008)	Desarrollar un flujo de trabajo en fincas, con un modelo híbrido de redes de Petri, aplicado a la caña de azúcar. Este flujo incluye la programación del trabajo agrícola y la selección y asignación de maquinaria y mano de obra para determinar las operaciones sobre el terreno, en un lapso corto de la producción efectiva del cultivo. Así mismo se pretende diseñar un modelo apropiado con el fin de modelar el flujo de trabajo agrícola para las granjas geográficamente dispersas.
Arnaout y Maatouk (2010)	Minimizar los costos de recolección de la uva, aplicando una heurística, enfocada a asignar mejor los días de recolección, teniendo en cuenta la optimización de la calidad del vino.
Ooster, Bontsema, van Henten y Hemming (2013)	El objetivo fue identificar parámetros con fuerte influencia en el desempeño laboral, así como el efecto de la incertidumbre en los parámetros de entrada en los indicadores claves de desempeño. Se analizó la sensibilidad diferencial y se probaron los resultados de la linealidad del modelo. Los objetivos de este estudio fueron identificar: 1) los parámetros de entrada que deben elegirse con cuidado para no comprometer la exactitud de la predicción del modelo, 2) las características del sistema de cultivo al que la demanda de mano de obra es muy sensible y que podría guiar al diseñador y productor de un sistema en crecimiento a un sistema mejorado y 3) Fuentes de incertidumbre sobre la capacidad del modelo para discriminar entre escenarios de trabajo alternativos.
Ooster, Bontsema, van Henten y	Analizar modelos basados en la gestión de mano de obra, orientada a las habilidades de los trabajadores en un sistema de producción hortícola multioperaciones y multifuncionales.

Hemming (2015)	
Wishon, Villalobos, Mason, Flores y Lujan (2015)	Determinar el número apropiado de trabajadores para plantación y cosecha, con el fin de adquirir la mano de obra necesaria con anterioridad, desarrolla planificaciones de tácticas de nivelación, cosecha y adquisición de mano de obra, para determinar el número adecuado de trabajadores H-2A (trabajadores externos), aplicado a frutas y hortalizas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Artículos identificados como medianamente relevantes, sus autores y principales objetivos.

Autores	Objetivo
Van Wyk y Hatting (1964)	El cálculo de la cantidad de trabajo requerido para las empresas agrícolas, por lo general proporciona muchos problemas; la razón principal de esto, es la gran variedad de necesidades de mano de obra en las granjas con diferentes combinaciones y el número limitado de normas disponibles en relación con los requerimientos de trabajo de estas empresas. El primer paso en la planificación de las necesidades de mano de obra de una granja, es determinar las normas de trabajo físico para cada actividad agrícola. El propósito de este análisis es dar orientación sobre cómo la organización agrícola puede ser planificada y obtener menos mano de obra por unidad de producción.
Walker y Preiss (1988)	Desarrollar un modelo matemático para ayudar a planificar actividades de cosecha y entrega de madera, a cinco años, de un bosque público gestionado industrialmente.
Thangavadivelu y Colvin (1997)	Desarrollar un sistema de apoyo para tomar decisiones basadas en lógica difusa (FLoDSS) con el fin de ayudar a los administradores de granjas a decidir si debe o no llevar a cabo la operación de labranza en un día determinado. Fue probado y evaluado, utilizando los datos de previsión meteorológica y las decisiones diarias realizada por dos encargados de la granja. Este sistema muestra de acuerdo con la humedad del suelo si es factible o no realizar la operación de labranza.
Foulds y Wilson (2005)	Desarrollar un modelo de programación de operaciones para especificar la actividad de cada trabajador y cada máquina, en cada período de tiempo, con el fin de minimizar la duración de todo el proceso de recolección en la colza y el heno. Un objetivo secundario, es modificar el cronograma resultante, con el fin de nivelar el uso de trabajadores y máquinas.
Weintraub y Romero (2006)	Analizar y evaluar el rendimiento pasado de los modelos de investigación de operaciones en la agricultura, resaltar los problemas actuales, las direcciones futuras de la investigación y las aplicaciones. Se centra en la planificación a escala de fincas y del sector regional, las implicaciones ambientales, las cuestiones de riesgo e incertidumbre. En la parte forestal, se enfoca en la planificación de problemas en los niveles estratégico, táctico y operacional, las cuestiones de implementación, las implicaciones ambientales, así como el tratamiento de la incertidumbre y múltiples objetivos.

Foulds y Zhao (2007)	Describir el Sistema de Soporte de Decisiones (DSS) desarrollado para la programación de las operaciones de los contratistas que viajan de una granja a otra con el maíz de la cosecha. MaizeManager está diseñado para ayudar a los programadores de maquinarias de cosecha y de personal en la creación o mejora de horarios, y permite el uso de su experiencia y preferencias.
Guan, Nakamura, Shikanai y Okazaki (2008)	Proponer un enfoque metaheurístico de dos fases con el fin de planificar el trabajo agrícola diario, para las corporaciones de producción agrícola. La metaheurística de dos fases contiene, la optimización de la asignación de recursos y el cronograma de búsqueda basado en el algoritmo genético y el modelo híbrido de redes de Petri.
Pardo, Rivavololona y Munier-Jolain (2010)	El objetivo del presente estudio fue analizar las consecuencias de la adopción de los sistemas de cultivo IWM (gestión integrada de malezas) ensayados de 2000 a 2006, este ensayo se enfocaba principalmente en: 1) la organización del trabajo a nivel de finca y 2) la rentabilidad económica.
Eakin, Bojórquez-Tapia, Diaz, Castellanos y Haggar (2011)	Utilizar un proceso de Redes Analíticas para sintetizar el conocimiento experto sobre los principales impulsores del cambio en los medios de subsistencia en una región, así como sobre las estrategias familiares más comunes. Se desarrollará un marco de análisis de decisiones multicriterio y conocimientos expertos con el fin de estructurar sistemáticamente el proceso de evaluación, no solo para elucidar las relaciones de causa-efecto hipotéticas, sino también enfatizar la naturaleza sistémica del cambio socioecológico.
Beaudoin, Frayret y Lebel (2014)	Presentar un proceso de planificación táctica, basado en el enfoque genérico de modelos jerárquicos de Schneeweiss. Esta planificación busca, primero que todo, anticipar solo parte del nivel operacional para evaluar la información más relevante para el tomador de decisiones tácticas y evaluar la factibilidad operativa de un plan, y en segundo lugar, evaluar el costo mínimo total de transporte de equipos en la implementación del plan táctico seleccionado.
Wu, Zhao, Wang, Zhou y Cai (2015)	Desarrollar un Sistema de Programación de Operación Picker de Algodón (CPOSS), para despachar maquinaria y labores, y guiar las labores hacia el campo de destino. Además de programar de manera efectiva y justa diferentes tipos de recolectores de algodón y trabajadores con diferentes habilidades.
Cunha, Silva, Andrade y Carvalho (2016)	Evaluar la utilización de la metodología de superficie de respuesta (RSM) para verificar el efecto de la velocidad de operación, la longitud media de las filas de café y la pendiente de las áreas, en los parámetros de desempeño operacional en la cosecha de café súper mecanizada.
Sopegno, Busato, Berruto y Romanelli (2016)	Presentar un modelo matemático para predecir el costo de las operaciones en el campo y del transporte de múltiples cultivos. El modelo propuesto se refiere al nivel estratégico de toma de decisiones en un sistema de producción agrícola relacionado con el diseño del sistema de mano de obra / maquinaria en relación con los tipos de cultivos seleccionados.

Bing, Fulin, Jiquan y Shengxue (2017)	Establecer un modelo de estimación de la demanda de mano de obra de la industria de siembra, considerando los factores de la estructura de siembra y el grado de mecanización. El modelo establecido en este estudio puede utilizarse para calcular la cantidad de demanda laboral actual en la industria de siembra y la demanda laboral en los distintos momentos en el futuro a través de la previsión del nivel de mecanización futuro y el área cultivada, que son los dos factores principales que influyen en la cantidad de demanda de mano de obra en la estructura de siembra.
Brack y McLarin (2017)	Este documento describe un enfoque práctico para combinar los modelos de rendimiento, con la variación estocástica por tipo de bosque y período, en un gran número de escenarios con el fin de producir una distribución de los esquemas óptimos de cosecha a largo plazo. El enfoque permite identificar decisiones operativas sólidas que son apropiadas bajo una amplia gama de condiciones futuras inciertas. El enfoque también permite el desarrollo de modelos de regresión logística que relacionan las decisiones operacionales con la variación en el crecimiento futuro o las condiciones del mercado.
Gautam, LeBel y Beaudoin (2017)	Este estudio propone una simulación de un sistema de optimización, con el propósito de modelar la planificación jerárquica de la gestión foresta, con el objetivo de examinar el impacto. El sistema consiste en modelos matemáticos para desarrollar planes jerárquicos, es decir, estratégicos, tácticos y operativos.
Abrahão y Hirakawa (2018)	Este documento describe la ontología de tareas en operaciones agrícolas (AGROPTO), donde se utiliza OntoUML para desarrollar modelos conceptuales que describen aspectos de tareas complejas y posibles soluciones de modelado basadas en onified of Unified Foundation Ontology (UFO).

Fuente: Elaboración propia.

Con base al análisis sistemático de la literatura realizado, se identificó el tipo de programación en que se enfocaron los autores con investigaciones detectadas como muy relevantes y medianamente relevantes. Estos resultados se pueden observar en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Autores identificados como muy relevantes para el trabajo investigativo y el tipo de programación en el que enfocaron sus investigaciones.

Autores	Tipo de programación
Wijngaard (1988)	Operativa, Corto plazo
Corner y Foulds (2005)	Operativa, Corto plazo
Ferrer, Mac Cawley, Maturana, Toloza y Vera (2008)	Operativa, Corto plazo
Guan, Nakamura, Shikanai y Okazaki (2008)	Operativa, Corto plazo
Arnaout y Maatouk (2010)	Operativa, Corto plazo
Ooster, Bontsema, van Henten y Hemming (2013)	Táctica, Mediano plazo
Ooster, Bontsema, van Henten y Hemming (2015)	Táctica, Mediano plazo
Wishon, Villalobos, Mason, Flores y Lujan (2015)	Táctica, Mediano plazo

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 4, se detectaron 5 artículos muy relevantes para el trabajo investigativo, que se centran en la programación de operaciones a corto plazo; seguido por la programación táctica, a mediano plazo, con 3 artículos. La programación estratégica, a largo plazo, no se identificó dentro de estos artículos que se seleccionaron. Con los artículos detectados en la clasificación de muy relevantes, se concluye que las investigaciones relacionadas con la programación de operaciones agrícolas manuales o semi-mecanizadas, están enfocadas a la programación a corto plazo, seguido del mediano plazo, dejando de un lado la parte estratégica de las operaciones. Como conclusión adicional, se detectó que las investigaciones más actuales son las que se están centrando en la programación táctica; esto se puede dar por una evolución en la forma de abordar los problemas de programación de operaciones en el sector agrícola.

Tabla 5. Autores identificados como medianamente relevantes para el trabajo investigativo y el tipo de programación en el que enfocaron sus investigaciones.

Autores	Tipo de programación
Van Wyk y Hatting (1964)	Táctica, Mediano plazo
Walker y Preiss (1988)	Estratégica, Largo plazo
Thangavavelu y Colvin (1997)	Operativa, Corto plazo
Foulds y Wilson (2005)	Operativa, Corto plazo
Weintraub y Romero (2006)	Estratégica, Largo plazo - Táctica, Mediano plazo - Operativa, Corto plazo
Foulds y Zhao (2007)	Operativa, Corto plazo
Guan, Nakamura, Shikanai y Okazaki (2008)	Operativa, Corto plazo
Pardo, Rivavololona y Munier-Jolain (2010)	Estratégica, Largo plazo
Eakin, Bojórquez-Tapia, Diaz, Castellanos y Hagggar (2011)	Estratégica, Largo plazo
Beaudoin, Frayret y Lebel (2014)	Táctica, Mediano plazo
Wu, Zhao, Wang, Zhou y Cai (2015)	Operativa, Corto plazo
Cunha, Silva, Andrade y Carvalho (2016)	Operativa, Corto plazo
Sopegno, Busato, Berruto y Romanelli (2016)	Estratégica, Largo plazo
Bing, Fulin, Jiquan y Shengxue (2017)	Táctica, Mediano plazo
Brack y McLarin (2017)	Estratégica, Largo plazo
Gautam, LeBel y Beaudoin (2017)	Estratégica, Largo plazo - Táctica, Mediano plazo - Operativa, Corto plazo
Abrahão y Hirakawa (2018)	Estratégica, Largo plazo

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 5, el 35,29 % (6 artículos) de los estudios identificados como medianamente relevantes, están enfocados en las actividades en un nivel operativo o a corto plazo. Así mismo, se identificaron 6 artículos en las actividades estratégicas o a largo plazo, teniendo igualmente una participación del 35,29 %. Los artículos identificados en el nivel táctico representaron un 17,65 % (3 artículos). Por último, se tiene que el 11,77 % (2 artículos), se enfocaron en la programación estratégica, táctica y operativa, de forma simultánea. Los resultados presentados anteriormente, se dan, ya que los artículos identificados como medianamente relevantes para este trabajo, están enfocados a investigaciones en

las que la programación de operaciones en la agricultura no fue el único tema que se tuvo en cuenta; para esta clasificación se abordaron tanto operaciones manuales como semi-mecanizadas y mecanizadas. Debido a esto, los resultados son un poco más amplios que los de los artículos muy relevantes, teniendo como consecuencia los tipos de programación más variada.

1.1.3.2 Revisión de la literatura en el Centro Nacional de Investigaciones de Café

Con el objetivo de identificar las investigaciones que se adelantan actualmente en el país en el tema de esta propuesta, se identificó el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé), entre cuya producción se identificaron varios artículos pertinentes al tema tratado (Tabla 6).

Tabla 6. Clasificación de la literatura encontrada en Cenicafé.

Tema tratado	Cantidad de artículos
Mano de Obra	4
Investigaciones con pendiente de inclinación	3
Herramientas o métodos para obtener el grano en la recolección manual de café	20

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 6, el tema específico de recolección de café ha sido bastante estudiado, pero las investigaciones se han enfocado principalmente en la optimización de la obtención del grano del árbol. Por otro lado, sólo 4 estudios han investigado la mano de obra y 3 la pendiente de inclinación del terreno.

La revisión de las investigaciones locales en el sector cafetero ha permitido identificar estudios que tratan el recurso humano como prioridad en la recolección de café. Duque O. (2005), desarrolló un estudio enfocado a la caracterización del personal que realiza la operación de recolección del fruto, a partir del cual, se determinan características principales de este recurso para posteriores estudios. Así mismo, Duque O. y Dussán (2004), realizan un estudio sobre la productividad de la mano de obra en la recolección del café, comparando cómo las formas de pago al trabajador afectan este indicador. De igual manera, la FNC (2001), adelantó un estudio con el fin de generar indicadores de medición de diferentes actividades, entre las cuales la recolección de café tenía gran relevancia.

Los estudios mencionados anteriormente muestran que el personal para la recolección manual de café ha sido estudiado desde diferentes enfoques, que van desde las características de la mano de obra hasta el rendimiento; además, se

han realizado investigaciones con el fin de identificar las ineficiencias, pero hasta el momento no se han detectado estudios que conlleven a una optimización de este recurso que impacta directamente la actividad de recolección de café. Estas investigaciones en su mayoría han sido de tipo descriptivas y se analizarán más detalladamente en los siguientes apartados.

De otro lado, autores como Villegas B. et al. (2005), Martínez R. et al. (2005) y Castañeda B. et al. (2014) han encontrado que la pendiente de inclinación impacta directamente en el proceso de recolección manual de café. Sin embargo, no se encontraron evidencias de que esta variable se haya incluido dentro de estudios enfocados a la optimización, programación, planeación o mejora del proceso.

La mayor parte de los estudios adelantados desde Cenicafe, se enfocan en el desarrollo de herramientas y métodos para mejorar la recolección del grano de café, pero se centran específicamente en la obtención del fruto del árbol. Los autores que han tratado este tema se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Autores que han desarrollado herramientas o métodos para mejorar la recolección del grano de café y sus respectivos estudios.

Autores	Título del artículo
Vélez Z., Montoya R. y Oliveros T. (1999)	Estudio de tiempos y movimientos para el mejoramiento de la cosecha manual del café.
Londoño H., Oliveros T. y Moreno S. (2002)	Desarrollo de una herramienta manual para asistir la recolección de café en Colombia
Palencia López, Olivero Tascón y Álvarez Mejía (2002)	Cosecha manual de café con asistencia neumática
García U., Oliveros T., Álvarez M. y Aristizabal T. (2003)	Desarrollo de un sistema de acople eficiente y de bajo daño mecánico para los vibradores inerciales del tallo del cafeto.
Wallis G., Montoya R., Vélez Z. y Oliveros T. (2004)	Calidad y eficacia de dos métodos no selectivos de recolección manual de café <i>Coffea arabica</i> .
Álvarez V., Oliveros T. y Ramírez G. (2004)	Evaluación de dos sistemas para el manejo de mallas en la cosecha manual del café.
Oliveros T., Medina R. y Tibaduiza V. (2005)	Diseño y evaluación de una herramienta para agilizar la cosecha manual del café.
Martínez R. et al. (2005)	Estudio de tiempos y movimientos de la recolección manual del café en condiciones de alta pendiente
Ramírez G., Oliveros T., Sanz U., Acosta A. y Buenaventura A. (2006)	Desgranador mecánico portátil para la cosecha del café Descafé.
Araque S., Oliveros T., Sanz U. y Ramírez G. (2006)	Desempeño de vibradores portátiles del tallo en la cosecha del café.
López D., Montoya R., Isaza G. y Oliveros T. (2007)	Contribución de los componentes del método mejorado de cosecha en el desempeño operativo de los recolectores de café.

López F., Oliveros T. y Ramírez G. (2007)	Disminución del costo unitario de la cosecha de café con el empleo de un método de recolección manual asistido.
Acosta A., Oliveros T., Ramírez G. y Sanz U. (2007)	Recolección de frutos de café caídos al suelo.
López F., Roa M. y Parra C. (2007)	Evaluación del equipo Aroandes un prototipo para la cosecha manual asistida de café.
Isaza G., Montoya R., Vélez Z. y Oliveros T. (2007)	Evaluación de la concentración de los frutos maduros de café empleando técnicas no selectivas de recolección manual.
López F., Ramírez G., Oliveros T. y Sanz U. (2009)	Aroandes una tecnología para la cosecha manual de café con alta calidad
Oliveros T. et al. (2013)	Cosecha manual de café utilizando mallas plásticas.
Castañeda B. et al. (2014)	Evaluación de un método para la recolección de café en terrenos de alta pendiente.
Ramírez G. et al. (2014)	Equipo para la recolección manual de café Canguaro 2M: Experiencia de investigación participativa.
Oliveros T. et al. (2015)	Evaluación de un dispositivo manual en la recolección de frutos de café caídos al suelo.

Fuente: Elaboración propia.

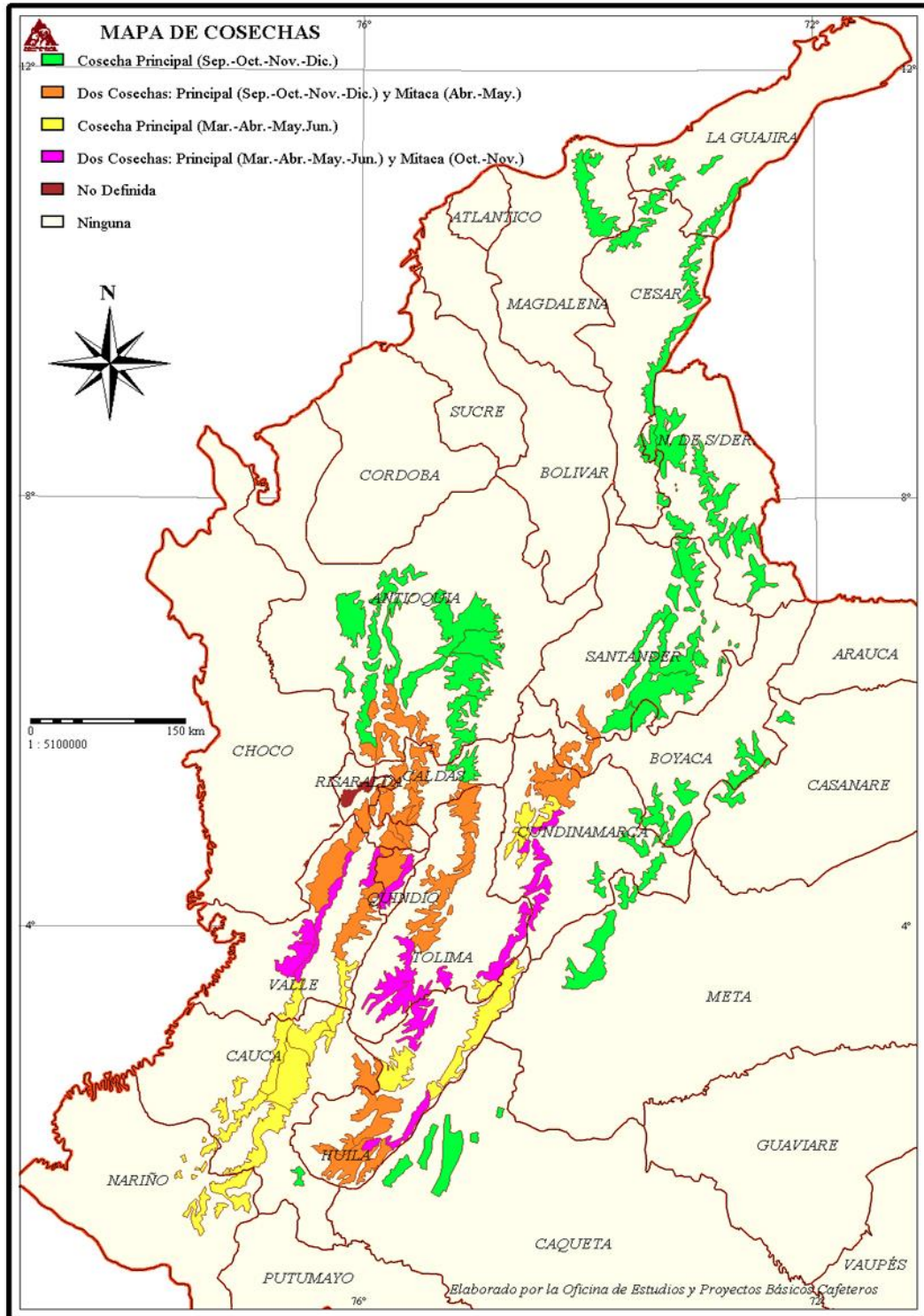
Entre los estudios consultados, no se encuentran investigaciones orientadas a la reducción del costo de la recolección manteniendo la mejor calidad del grano de café. Como se pudo observar en la tabla 7, los estudios encontrados se centran en la optimización de la obtención del grano del árbol, por medio en su mayoría, del uso de equipos adicionales.

1.2 Descripción del sector cafetero en Colombia y de la programación de la recolección manual de café

1.2.1 Importancia del sector cafetero en Colombia

Para la producción de un café de alta calidad, se necesitan condiciones especiales como: altura entre 1.200 y 1.800 metros sobre el nivel del mar, temperaturas entre los 17 y 23 grados centígrados y precipitaciones cercanas a los 2.000 milímetros anuales, distribuidas a lo largo del año (FNC, 2010). Estas condiciones afectan la cosecha y dan características únicas al café. Colombia cuenta con las características descritas anteriormente en varios Departamentos (Figura 3), lo que lo convierte en productor de café de alta calidad (FNC, 2019)a. Adicional a esto, la calidad del café colombiano es mundialmente reconocida por su gran aceptación en el mercado. Un claro ejemplo es Estados Unidos, el mayor mercado de consumo mundial del grano, donde el 85 % de la población reconoce sus atributos de calidad. La Asociación de Café de Estados Unidos ha establecido en el 2014 que Colombia es considerada por un 96 % de la población americana como un productor de café con muy buen sabor (FNC, 2019)a.

Figura 3. Cosechas de café en Colombia.



Fuente: FNC (2010).

La caficultura colombiana alcanzó, a diciembre de 2018, los 4.570 millones de árboles de café en más de 877 mil hectáreas, en 600 municipios del país. Esta área se encuentra distribuida entre 541 mil productores, que corresponden a unas 660 mil fincas (FNC, 2019b).

1.2.2 Descripción del proceso de programación de la recolección manual de café

Debido a la importancia de este sector, se elige el sector cafetero de Colombia como objeto de estudio con el fin de diseñar una metodología para la programación de la recolección manual del café, con la condición especial de que es en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %. Con el propósito de entender mejor el objeto de estudio, se realizó un acercamiento a una muestra de fincas cafeteras, de las cuales se pudo obtener la información pertinente para la descripción del proceso de programación de la recolección manual de café.

Se eligen 18 fincas cafeteras del Departamento de Caldas (la elección de la muestra de fincas, se puede observar en el capítulo 2, en la metodología de la investigación). Con la información de las visitas a las 18 fincas seleccionadas, se pudo concluir que el proceso de programación de la recolección manual de café comienza con la observación del área cultivada, realizada por el responsable de la finca. Lo que se busca con esto es determinar la cantidad de personal que necesita cada semana, de acuerdo con su conocimiento. Posteriormente, se les informa a las personas encargadas de conseguir el personal, que se denominan agregados, con el fin de que sepan cuánto personal deben conseguir. La actividad de conseguir el personal, en su mayoría, se desarrolla el fin de semana para que inicien todas las personas necesarias el día lunes de la siguiente semana. Estas actividades se realizan con una periodicidad semanal. En las 18 fincas se observó que los aspectos que inciden en la cantidad de recolectores a contratar, son los siguientes:

- La cosecha en un 89 % de las fincas.
- El tamaño del lote en un 89 % de las fincas.
- El clima en un 83 % de las fincas.
- El precio a pagar por kilo recolectado en un 67 % de las fincas.
- La apreciación de la floración en un 61 % de las fincas.

Una vez el personal se encuentra en la finca, el responsable distribuye los lotes a recolectar por cada grupo, teniendo como criterios sus conocimientos previos y las casas en las que duermen o se alimentan. En este punto, el responsable no tiene en cuenta las condiciones del lote ni del personal para realizar dicha distribución. De acuerdo con el lote que les asignen a cada grupo, también se asigna a cada recolector un surco de café, es decir, una hilera de siembra de café, (En la figura 4 se pueden observar los surcos de café, señalados en una línea intermitente roja). En el 1,1 % de las fincas entrevistadas, esta asignación se realiza por parcelas,

que se refiere a una sección del lote. Estas distribuciones se realizan aleatoriamente.

Figura 4. Surcos de café.



Fuente: Elaboración propia, foto tomada de la finca “*Villa Hermosa*”, Vereda el Guineo, del Departamento de Caldas, Colombia.

Una vez distribuidos los surcos, cada operario puede utilizar el método de recolección de café que desee. Se observó que el 30 % de los operarios recolectan el café rodeando cada árbol del surco; el 46 % recolectan una cara de todos los árboles del surco y posteriormente se devuelven recolectando la cara opuesta; y el 24 % de operarios toman una cantidad determinada de árboles, los cuales recolectan por una de las caras y se regresan por la cara opuesta, para continuar con la siguiente sección de árboles en el surco. Los movimientos en el árbol en su mayoría se realizan desde el copo hacia las raíces, y los movimientos en las ramas se hacen en su mayoría desde el tronco del árbol hacia el extremo de las ramas (Figura 5). Cabe destacar que estos tipos de recolección fueron los comúnmente observados, pero es importante aclarar, que cada recolector puede escoger la técnica para realizar este proceso.

Figura 5. Método de recolección del café, por rama.



Fuente: Foto tomada de la finca “La Popa”, Vereda el Guineo, del Departamento de Caldas, Colombia.

Adicional a lo ya mencionado, cada operario debe mantener unas condiciones de calidad en la recolección del café, por lo que el responsable exige a los recolectores lo siguiente: Que no recolecten granos de café verdes ni hojas, que no dejen granos maduros en el árbol y que dejen la menor cantidad de granos en el suelo; con el fin de obtener un café en óptimas condiciones. Un café en muy buenas condiciones es la prioridad para los caficultores; por lo tanto, al delegar actividades sobre el agregado, un 67 % de las fincas le asignan la función de realizar un repaso por todo el lote, revisando y evitando que queden granos en los árboles o en el suelo; además, el responsable también revisa el trabajo de los agregados para que se lleve a cabo correctamente. Esta actividad solo la realizan algunas fincas.

Por último, el café que recolectan los operarios es pesado, para saber cuánto se les pagará el día, ya que el 100 % de las fincas entrevistadas paga por destajo (de acuerdo con lo que cosechen diariamente). El precio por kilo lo determina el responsable a principio de semana, y lo realiza de acuerdo con su conocimiento del lote; cada lote varía en precio de acuerdo con las condiciones específicas del cultivo.

Todo lo anteriormente descrito, fue con el propósito de detectar las variables que afectan directamente el proceso de programación de la recolección manual de café; se observan las siguientes variables específicas:

Condiciones del cultivo: estas variables se van a desglosar de la siguiente manera:

1. Número total de lotes de la finca y número de lotes a recolectar por semana.
2. Características del lote: número de árboles por lote (densidad de siembra), altura promedio de los árboles del lote a recolectar (variedad y edad), promedio de café maduro por árbol (muestreo),

- pendiente de inclinación del terreno (porcentaje de disminución del rendimiento del personal de acuerdo a la pendiente).
3. Condiciones climáticas: porcentaje de reducción de horas laborales, de acuerdo a las condiciones climáticas (se realizará teniendo en cuenta la zona y el mes de producción).
 4. Persona: rendimiento del personal de acuerdo a la experiencia y edad (kilogramos por hora).
 5. Como restricciones se proponen dos. La primera, en cuanto a los días en que se debe recolectar el café, ya que una vez el grano se encuentre maduro se tienen en promedio 8 días para su recolección, sin que el fruto pierda las características. La segunda, son las restricciones del valor por kilo que se va a pagar, ya que como la idea es desarrollar una metodología que reduzca los costos del proceso, se deben generar límites superiores e inferiores para el precio del kilo por lote (este se determinará de acuerdo con las características del lote ya mencionadas anteriormente).

1.3 El recurso humano desde el enfoque de programación de operaciones

En el actual apartado se aborda como tema central al personal de recolección, debido a que es el recurso principal en la recolección manual de café; no solo porque en Colombia el 100 % de esta operación es manual, sino que este capital humano aporta su trabajo, tiempo, experiencia y conocimiento, para el desarrollo de la actividad de recolección de este fruto. La fuerza laboral se abordará desde la programación de operaciones, esto quiere decir que se enfocará en las características del personal necesarias con el fin de realizar la programación de estas actividades, en donde se incluye la cantidad de personal requerido, la cantidad de personal disponible y los perfiles de los recolectores de café, para posteriormente definir los rendimientos del proceso, así como la capacidad disponible.

1.3.1 Generalidades y enfoques

Como se pudo observar en la estructura de un sistema jerárquico de planeación y control de la producción de Domínguez Machuca et al. (1995)b, lo que alimenta el programa maestro de una organización son los pronósticos y la capacidad de producción. Los pronósticos ya se trataron anteriormente y se especificaron en el capítulo de programación de operaciones. Por otro lado, se encuentra la capacidad de producción, la cual sí toma relevancia y aplicabilidad en el presente capítulo, debido a que es la limitante principal en este proceso y está dada por la cantidad de café disponible y el personal disponible para realizar la recolección del grano de café. Detectado esto, a continuación, se realiza un desarrollo más profundo del tema.

1.3.1.1 Capacidad de producción

Existen varios enfoques al momento de hablar de capacidad de producción. Autores como Chase y Jacobs (2014) prefieren hablar de “nivel de operación”, debido a que el término capacidad no es específico en cuanto al tiempo que se puede sostener ese índice de capacidad y que puede ser la capacidad del día más productivo. Autores como Gaither y Frazier (2000) prefieren manejar la expresión de “capacidad de producción” y dicen que es “la tasa máxima de producción de una organización”. Así mismo, Buffa y Sarin (1987) hacen referencia a que la capacidad es “la característica limitante de una unidad productiva para producir dentro de un periodo de tiempo indicado, expresado normalmente en términos de unidades producidas por unidad de tiempo”.

Por otro lado, al hablar de capacidad disponible, Domínguez Machuca et al. (1995)b mencionan que es fundamental determinar, primero que todo, la unidad de medida que es válida para el proceso que se está trabajando; la selección de esta medida en muchas ocasiones puede significar un problema grave, ya que no existe una medida universal y la capacidad puede verse afectada por múltiples circunstancias. Estas unidades de medida pueden variar de acuerdo al tipo de proceso, tipo de configuración, número y cantidad de productos, entre otros. A partir de las especificaciones definidas se puede precisar cuál será la unidad de medida de capacidad, encontrándose entre las más comunes la hora de mano de obra o la de centro de trabajo por unidad de tiempo (Domínguez Machuca et al., 1995b).

Al analizar el proceso de recolección manual de café se determina que la capacidad de producción está directamente relacionada con los kilogramos de café maduro que tenga un lote y con los kilogramos por hora recolectados por un operario. La cantidad de café a ser recolectado (en kilogramos) se toma como un dato de entrada fijo, es una medida que se puede determinar de diversas maneras, autores como De lima et al. (2014), realizan una investigación donde definen la capacidad de producción por muestreo en 20 árboles de *Mora paraensis* (Ducke), de esta manera analizan el volumen real de la especie para

posteriormente realizar la aplicación de diferentes modelos volumétricos. Otros autores como, Resop, Fleisher, Timlin y Reddy (2014), analizan la capacidad de producción potencial de un cultivo de papa por medio de simulaciones en campo con dos escenarios (agua limitada y no limitada), y así determinan la capacidad de producción de papa desde Maine hasta Virginia, Estados Unidos. Asimismo, no solo en la recolección de café, sino en diferentes cultivos agrícolas, la capacidad de producción la da la cantidad de producto que se puede recolectar del cultivo.

Adicionalmente, la capacidad de producción también es posible de calcular, con base en información de otros agricultores o del servicio nacional de extensión agrícola o de servicios de investigación, de tal manera que se pueda saber de acuerdo a las condiciones del cultivo, cual es la producción promedio por hectárea (Shepherd, 2001). En el presente trabajo no se hará uso de este método, ya que como lo menciona Shepherd (2001), estos cálculos la mayoría de veces los realizan con base a fincas en condiciones ideales, por lo que no sería un dato muy ajustado a la realidad de cada finca cafetera. Debido a esto, es que se plantea el muestreo en campo (este método se explicará más adelante en los ajustes de los pronósticos de producción), para saber, lo más ajustado posible a la realidad, la cantidad de café maduro que hay en un lote.

De esta manera, de los artículos referenciados, sumados a los resultados del trabajo de campo, dan soporte a la decisión de hacer uso del registro de floraciones y muestreo en campo, como medio para determinar el volumen de producción por lote.

Por otro lado, la capacidad de producción se ve afectada por los factores de utilización (U) y eficiencia (e), según lo define Domínguez Machuca et al. (1995)b. El factor de utilización (U), se refiere al cociente entre el número de horas productivas (NHP, son las horas que realmente se emplean en el desarrollo de la actividad) y el de horas reales (NHR, son las horas totales de la jornada de trabajo, incluyendo periodos de mantenimiento, desayuno, entre otros) de jornada por período (ecuaciones 1 y 2) (Domínguez Machuca et al., 1995b).

$$U = NHP/NHR \quad (\text{Ec } 1)$$
$$\text{de donde: } NHP = NHR \times U \quad (\text{Ec } 2)$$

Donde,

U = factor de utilización.

NHP = horas que realmente se emplean en el desarrollo de la actividad.

NHR = horas totales de la jornada de trabajo, incluyendo periodos de mantenimiento, desayuno, entre otras.

En el caso de la recolección de café, no será necesario emplear el factor de utilización (U), ya que el horario laboral que se fijará para desarrollar la metodología, solo incluye las horas reales en la labor de recolección del grano de café, esto se da en gran medida porque el pago de esta actividad en su mayoría se realiza por destajo.

Adicional a esto, se debe determinar el factor de eficiencia (E), que se refiere a que la misma labor la pueden realizar personas diferentes con tiempos distintos, es decir con diferentes eficiencias, esto debido a conocimientos y habilidades. El factor de eficiencia estará dado por el cociente entre el número de horas estándar (NHE) y de horas productivas (NHP), desarrolladas en el mismo periodo (ecuaciones 3 y 4) (Domínguez Machuca et al., 1995b).

$$E = NHE/NHP \quad (\text{Ec } 3)$$

$$\text{de donde: } NHE = NHP \times E \quad (\text{Ec } 4)$$

Donde,

E = factor de eficiencia.

NHE = número de horas estándar.

NHP = número de horas productivas.

En el desarrollo del programa maestro (paso 3 de la metodología propuesta) se tomará una eficiencia promedio en kilogramos por hora (esta eficiencia promedio se explicará detalladamente en el siguiente capítulo), en una pendiente de inclinación entre el 100 % y el 200 %, esta eficiencia promedio solo se verá afectada por el cambio en la pendiente de inclinación del terreno, en donde disminuye o aumenta de acuerdo a esta variable (tabla 24). Por otro lado, para la asignación de personal (paso 4 de la metodología propuesta), se dividirán los recolectores de café en tres grupos de acuerdo a su eficiencia, por lo que no se manejarán valores individuales, sino un rangos de rendimiento, adicional a esto no se tratará la unidad de medida únicamente en horas, sino kilogramo por horas (en el apartado 2.2.3.2 se puede ver en detalle la programación de este punto).

Para definir qué horizonte de tiempo se debe manejar en la capacidad de producción en el proceso de la recolección manual de café, se analizan los 4 horizontes de planificación (el largo, el mediano, el corto y el muy corto plazo) que proponen Domínguez Machuca et al. (1995)b. Se concluye que la Planificación de Capacidad Detallada, la cual hace parte de la planificación a corto plazo, será la requerida en la actual investigación. Tal decisión se basa en que la cantidad de café a recolectar es afectada por las condiciones meteorológicas que se den la semana anterior a la recolección y no se tiene certeza de la cantidad total del grano disponible para recolección, hasta un par de días antes.

Definir la capacidad de producción permitirá conocer la cantidad de café maduro que hay en el lote a recolectar y el cálculo de la cantidad de recursos humanos que se necesitan para la recolección manual de café con un horizonte de programación de 5 días.

1.3.2 Asignación de personal

Cuando se habla de dividir las actividades de producción por semanas, por días o por horas, se puede hacer referencia a la programación de operaciones, en la cual se logra especificar la carga de trabajo de un operario a muy corto plazo (Chase y Aquilano, 1995).

Dentro de la programación de operaciones se tienen dos pasos fundamentales: la asignación de personal y la determinación de la secuencia de los trabajos. Aplicando estos puntos al cultivo de café, la asignación de personal constaría en definir que recolectores van para cada lote; y en la secuencia de los trabajos, se tendría en que orden cada trabajador debería entrar a cada lote y cuánto tiempo permanece en este primer lote asignado antes de continuar al siguiente.

Por otro lado, dentro de la asignación de personal es fundamental tener en cuenta las jornadas laborales y los horarios de trabajo, para poder realizar la correcta asignación de personal (Chase y Jacobs, 2014). En varios casos de asignación, debido a las capacidades de producción y a las necesidades del proceso, se pueden variar tanto las jornadas laborales como los horarios, en el caso de la recolección manual de café se tienen horarios y jornadas laborales definidas y lo que varía es la cantidad de personal que se contrate para realizar la recolección de café maduro de una semana, dado que las fincas cafeteras son sistemas abiertos y diversos.

La asignación de personal aplicada a la industria ha sido diversamente estudiada. Existen múltiples herramientas para realizar esta actividad, la cual facilita la programación de operaciones en una organización. Entre las más aplicadas están los gráficos GANTT y la programación lineal (Chase, Jacobs y Aquilano, 2006). Para el problema de la investigación actual, estas herramientas no tienen la capacidad de realizar una asignación de personal óptima con las características de la recolección de café, debido a que es un problema de la vida real, con diversas variables complejas (la descripción del problema y de las variables se realizará en el siguiente capítulo). Por esto es que una heurística, debido a las características mencionadas, podría resultar mucho más apropiada.

1.3.3 Clasificación de los perfiles de los recolectores de café

Uno de los principales procesos en una organización es la planeación de personal, no solo desde la definición de cuanto personal se requiere, sino con qué características o perfiles se desean las personas para desarrollar los trabajos definidos (Chiavenato, 2007). El proceso de la recolección de café en Colombia se realiza manualmente. Debido a esto, cada semana se debe calcular la cantidad de recolectores que se necesitan en esta actividad. Actualmente en Colombia hay déficit de personal disponible para desarrollar esta labor, por lo que se debe contratar al personal que se logre conseguir, ya sea con o sin experiencia y de edades avanzadas, con el fin de no perder los frutos maduros de los árboles.

Según lo anteriormente mencionado, no es posible desarrollar una planeación de personal para definir qué perfiles se desean conseguir, sino que se vinculan las personas que se encuentren disponibles. Debido a esto, es que se analizan los recolectores que se encuentran en el sector, con el fin de saber qué perfiles y con qué características se están contratando. De acuerdo con esto, se realizó un trabajo de campo con el objetivo principal de caracterizar el recurso humano de esta labor; se desarrolló una entrevista semi-estructurada a 90 trabajadores, en donde se concluyó lo siguiente:

- La mayoría de los recolectores son de género masculino, con un 94,44 %, sin embargo, se percibió que en las zonas cercanas a pueblos se encuentran mujeres trabajando como recolectoras, a diferencia de las zonas cafeteras cerca a ciudades.
- El 43,33 % de los recolectores están en el rango de edad entre 36 y 65 años, seguido por el 28,89 % que están en el rango de edad entre 26 y 35 años. Por lo que se observa que, aunque se detectaron personas de edades avanzadas realizando la labor de recolección de café, aún generaciones jóvenes están en esta labor.
- La mayoría de los recolectores encuestados tienen entre 11 y 20 años de experiencia (33,33 %) y más de 20 años (31,11 %), porque han trabajado desde pequeños en el campo y es la labor que toda la vida han desempeñado.

Se puede concluir de estas entrevistas, que el perfil del recolector de café Colombiano cuenta con las siguientes características: son masculinos, con edades entre los 36 y 65 años y con experiencia entre 11 y 20 años recolectando café. Así mismo, se compara esta información recolectada con el estudio realizado por Duque O. (2005), en el cual, se entrevistaron 796 recolectores, empleando una encuesta en la que se incluyeron aspectos socioeconómicos. Como principales resultados se observa que la mayoría de los recolectores tienen algún grado de educación primaria. Además, la edad, mayoritariamente, está entre 20 y 40 años, con una experiencia promedio como recolector de 17 años.

Es importante resaltar que, como se observa en los resultados de las entrevistas, existe un 3,33 % de los entrevistados que tiene más de 65 años, y un 7,78 % de los recolectores que no tiene experiencia o con muy poca. Cabe aclarar que, los operarios que fueron entrevistados, eran los que ya se encontraban en las fincas, y fueron los que los administradores decidieron contratar o lograron conseguir. Adicional a esto, debido a la migración de personas venezolanas a Colombia, el perfil del recolector de café, puede variar en diferentes aspectos a lo largo del tiempo, pero hasta el momento no se evidencia un impacto relevante en el sector en cuanto a mano de obra, ni se tienen estadísticas claras de este hecho.

Como conclusión general, se puede decir que el recurso humano es la principal limitante en el proceso de recolección manual de café. Así mismo, este recurso determina la capacidad actual de las fincas cafeteras, como se mencionó

anteriormente, creando en los caficultores los problemas más graves, no solamente en la consecución del número adecuado de operarios, sino también en la correcta elección de las personas y la asignación adecuada de las actividades.

1.4 Marco normativo

Se desarrolla el presente capítulo debido a la importancia de la normatividad de cada país en la programación de las actividades laborales. Por esto, se enmarca la recolección de café dentro de la normatividad vigente en Colombia, enfocado principalmente a las jornadas de trabajo legales para desarrollar esta actividad.

Quien regula las jornadas de trabajo en Colombia, es el Ministerio del Trabajo, por medio del Código Sustantivo del Trabajo (Ministerio del Trabajo, 1951); para la presente investigación es necesario tener claridad sobre el “**título VI, Jornada de trabajo, capítulo I, Definiciones**” y sobre el “**título VI, Jornada de trabajo, capítulo II, jornada Máxima**”, que contemplan los artículos 158 y 159 sin modificaciones, el artículo 160 fue modificado por medio del artículo 1 LEY 1846 de 2017 y el artículo 161, el cual fue modificado por medio del artículo 20 LEY 50 de 1990 y modificado parcialmente (literal d) por el artículo 2 LEY 1846 de 2017 (Ministerio del Trabajo, 1951), los cuales se describen a continuación:

“El título VI, Jornada de trabajo, capítulo I, Definiciones: ARTÍCULO 158. JORNADA ORDINARIA. La jornada ordinaria de trabajo es la que convengan a las partes, o a falta de convenio, la máxima legal.

ARTÍCULO 159. TRABAJO SUPLEMENTARIO. Trabajo suplementario o de horas extras es el que excede de la jornada ordinaria, y en todo caso el que excede de la máxima legal.

Artículo 160. Trabajo Diurno y Nocturno .

Trabajo diurno es el que se realiza en el periodo comprendido entre las seis horas (6:00 a. m.) y las veintiuna horas (9:00 p. m.).

Trabajo nocturno es el que se realiza en el período comprendido entre las veintiuna horas (9:00 p. m.) y las seis horas (6:00 a. m.).

El título VI, Jornada de trabajo, capítulo II, jornada Máxima:

Artículo 161. Duración.

La duración máxima legal de la jornada ordinaria de trabajo es de ocho (8) horas al día y cuarenta y ocho (48) a la semana, salvo las siguientes excepciones:

1. En las labores que sean especialmente insalubres o peligrosas, el Gobierno puede ordenar la reducción de la jornada de trabajo de acuerdo con dictámenes al respecto.
2. La duración máxima legal de la jornada de trabajo del menor se sujetará a las siguientes reglas: El menor entre doce y catorce años sólo podrá trabajar una jornada máxima de cuatro (4) horas diarias y veinticuatro (24) horas a la semana, en trabajos ligeros. Los mayores de catorce y menores de dieciséis años sólo podrán trabajar una jornada máxima de seis (6) horas diarias y treinta y seis (36) horas a la semana. La jornada de trabajo del menor entre

dieciséis y dieciocho años no podrá exceder de ocho (8) horas diarias y cuarenta y ocho (48) a la semana.

3. En las empresas, factorías o nuevas actividades que se establezcan a partir de la vigencia de esta ley, el empleador y los trabajadores pueden acordar temporal o indefinidamente la organización de turnos de trabajo sucesivos, que permitan operar a la empresa o secciones de la misma sin solución de continuidad durante todos los días de la semana, siempre y cuando el respectivo turno no exceda de seis (6) horas al día y treinta y seis (36) a la semana. En este caso no habrá lugar al recargo nocturno ni al previsto para el trabajo dominical o festivo, pero el trabajador devengará el salario correspondiente a la jornada ordinaria de trabajo, respetando siempre el mínimo legal o convencional y tendrá derecho a un día de descanso remunerado.
4. El empleador y el trabajador podrán acordar que la jornada semanal de cuarenta y ocho (48) horas se realice mediante jornadas diarias flexibles de trabajo, distribuidas en máximo seis días a la semana con un día de descanso obligatorio, que podrá coincidir con el domingo. Así, el número de horas de trabajo diario podrá repartirse de manera variable durante la respectiva semana teniendo como mínimo cuatro (4) horas continuas y como máximo hasta diez (10) horas diarias sin lugar a ningún recargo por trabajo suplementario, cuando el número de horas de trabajo no exceda el promedio de cuarenta y ocho (48) horas semanales dentro de la Jornada Ordinaria de 6. a. m. a 9 p. m.

Parágrafo. El empleador no podrá, aún con el consentimiento del trabajador, contratarlo para la ejecución de dos turnos en el mismo día, salvo en labores de supervisión, dirección, confianza o manejo.” (Ministerio del Trabajo, 1951)”.

Según lo observado en el código sustantivo del trabajo (Ministerio del Trabajo, 1951), lo que aplica directamente en la actividad de la recolección manual de café, estaría ligado a una jornada diurna, ya que las fincas operan con la luz solar, por lo que la jornada máxima que se podría tener es de 6:00 a. m., hasta las 5:00 p. m. Actualmente lo que se observó en las fincas cafeteras que se visitaron, es que utilizan una jornada laboral definida de la siguiente manera: comienzo de las actividades a las 6:00 a. m. hasta las 8:00 a. m., descanso de una hora hasta las 9:00 a. m., de 9:00 a. m. hasta las 12:00 m. realizarían labores de recolección; se realiza otro descanso de 12:00 m. hasta la 1:00 p. m. y de 1:00 p.m. se trabajaría hasta las 5:00 p. m. Esta jornada se realiza de lunes a viernes, lo que da un total de 45 horas laborales a la semana, las cuales están acorde con la reglamentación vigente y será el horario propuesto para la actual investigación.

1.5 Técnicas de programación

Gran cantidad de problemas de la vida real no pueden ser resueltos usando métodos exactos, es decir, aquellos que buscan la mejor solución posible de acuerdo a los objetivos, ya que la complejidad matemática genera un

número considerable de soluciones, lo cual demandaría mucho tiempo y esfuerzo en encontrar esta solución, condición que es común en los problemas reales (Gallego, Escobar y Romero, 2006). Debido a esto, se encontró en la literatura gran cantidad de artículos con aplicación de heurísticas; las cuales pueden resolver de una manera más eficiente y rápida los problemas de la vida real.

Las heurísticas hacen parte del gran grupo de la Inteligencia Artificial (IA) y están entre las herramientas más reconocidas en la programación de operaciones. Se destacan autores como McCulloch y Pitts (1943), Hebb (1949), Turing (1950) y McCarthy (1956), que dan inicio a este tipo de técnicas demostrando su importancia y relevancia. Las técnicas de inteligencia artificial son unas de las herramientas más utilizadas para programar recursos en busca de lograr eficiencias en los sistemas (Batista, Pérez y Vega, 2003), ya que son procedimientos que aportan soluciones de buena calidad en problemas complejos.

Las técnicas heurísticas están dentro de una amplia clasificación de agentes inteligentes. Russell y Norvig (2004) y Monett y Burkhard (2004) consideran las herramientas heurísticas como agentes que interactúan para darle una respuesta a un usuario que previamente suministra información. Al ser una definición tan amplia, es aplicable a diversos campos de la vida real y pueden ser usadas con el fin de dar soluciones óptimas en varios tipos de problemas. Burke et al. (2010) aplican las técnicas heurísticas mediante la utilización de estos agentes, explican cómo se resuelven casos de programación entera no lineal, difíciles de resolver matemáticamente, pero que pueden llegar a óptimos locales de buen desempeño.

Ahora bien, las metaheurísticas son técnicas de optimización matemática, que si bien no garantizan la solución óptima, permiten encontrar soluciones de alta calidad, en tiempos de cómputo razonables, para problemas en los cuales las técnicas exactas no son eficientes. Están basadas generalmente en fenómenos naturales o en conocimientos científicos (Gallego, Escobar y Romero, 2006). Dentro de las principales metaheurísticas se incluyen: el recocido simulado, los agentes inteligentes, la colonia de hormigas, la búsqueda tabú y los algoritmos genéticos, entre otros. Como se observará en el desarrollo del segundo capítulo, el algoritmo genético es la metaheurística escogida para darle solución al actual problema, por esto es que se explicará más a fondo a continuación.

1.5.1 Recocido simulado

Este es un método de búsqueda propuesto por Kirkpatrick, Gelatt Jr. y Vecchi (1983) con el fin de hallar soluciones a problemas de optimización combinatoria. Una de las ventajas de esta técnica es su habilidad para evitar quedar atrapado en óptimos locales, dado que, bajo cierta probabilidad, el algoritmo acepta soluciones de menor calidad. Dicha probabilidad decrece a medida que el algoritmo avanza en el proceso de optimización, ya que cada vez se debería estar más cerca del óptimo deseado. El recocido simulado entonces es: “ Una variante de la búsqueda local que permite movimientos ascendentes para evitar quedar atrapado prematuramente en un óptimo local.

El nombre le viene de la idea en que está basado un algoritmo diseñado en los años 50 para simular el enfriamiento de material (un proceso denominado “recocido”) (Dowland y Adenso-Díaz, 2003).

Esta heurística, puede ser aplicada en diversos problemas, como lo describen Dowland y Adenso-Díaz (2003), en donde mencionan aplicaciones en el problema del viajante, el problema de coloración de un grafo y varios problemas reales con múltiples objetivos y variedad de restricciones, así mismo, citan algunos autores que han resuelto problemas como, la planificación de turnos de una compañía aérea, dividir una región en distritos para la asignación de patrullas de policía, entre otras, con el fin de mostrar la aplicabilidad de dicha heurística.

1.5.2 Agente inteligente

Fu, Fang y Horn (2018) definen al agente inteligente como un conjunto de piezas de software y hardware que pueden interactuar con el ambiente por medio de sensores, con el objetivo de resolver una tarea en específica. El agente inteligente debió haber sido entrenado con una gran cantidad de datos, de modo que se encuentre preparado para resolver dicha tarea. Se puede definir también como: “programa de ordenadores capaces de efectuar una tarea o actividad sin la manipulación directa de un humano” (Castrillón, Giraldo y Sarache, 2009)a.

Así mismo, autores como Navarra y Martínez (2006), mencionan que según las leyes de la inteligencia artificial, estos agentes deben tener las siguientes características: Autonomía, Sociabilidad / comunicatividad, capacidad de reacción e iniciativa.

1.5.3 Colonia de hormigas

Esta técnica de optimización fue introducida por Colorni, Dorigo y Maniezzo en el año de 1991, inspirada en cómo las hormigas logran establecer las rutas más cortas desde su colonia hasta sus fuentes de alimentación. Se requiere que el problema sea modelado en forma de grafo, de modo que cada camino entre dos nodos dentro del grafo determina una solución al problema (Colorni, Dorigo y Maniezzo, 1991).

La optimización por colonia de hormigas es una metaheurística basada en el comportamiento real de este insecto. Está compuesto por algoritmos necesarios para obtener soluciones a problemas complejos de optimización, en un tiempo razonable de cómputo (Robles-Algarín, 2011).

1.5.4 Búsqueda tabú

La búsqueda tabú es una técnica metaheurística, la cual adopta la programación de memoria adaptativa (Glover y Laguna, 1997) para resolver

problemas de optimización. Esta técnica, introducida por Fred W. Glover en el año de 1986, se encarga mediante un procedimiento de búsqueda local, de moverse de forma iterativa desde una solución a otra perteneciente a la misma vecindad, de modo que los movimientos que hacen son los mejores posibles; el regreso a las soluciones previamente visitadas se evita mediante el uso de memorias conocidas como “listas tabú”.

Su metodología se basa en el aprovechamiento de diversas estrategias inteligentes para la solución de problemas, basadas en procedimientos de aprendizaje. El marco de memoria adaptativa de la búsqueda tabú explota la historia del proceso de resolución del problema haciendo referencia a cuatro dimensiones principales consistentes en la propiedad de ser reciente, en frecuencia, en calidad y en influencia (Batista y Glover, 2006).

1.5.5 Algoritmos genéticos

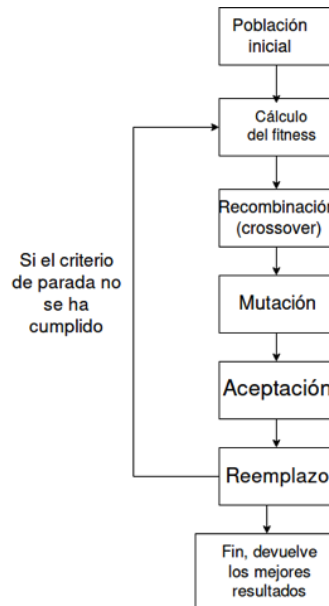
Padilla-Navarro et al. (2017) define los algoritmos genéticos como métodos adaptativos usados en problemas de búsqueda y optimización. Estos algoritmos implementan estrategias para simular la evolución de las especies a través de la selección natural. Otros autores definen a los algoritmos genéticos como una técnica de búsqueda heurística aplicable a una gran variedad de problemas, los cuales son resueltos por medio de técnicas biológicamente inspiradas (Kramer, 2017).

Un algoritmo genético está compuesto generalmente de tres procesos sobre una población de cromosomas o individuos que representan soluciones al problema que se esté tratando. Cada uno de estos tiene una “*evaluación*”, la cual es una medida que determina qué tan buena es una solución para el problema en particular, medida que se toma teniendo en cuenta las propiedades físicas generalmente conocidas como el fenotipo del cromosoma. El primer proceso es la selección de individuos, con el fin de generar la próxima población, el segundo proceso es la manipulación de los individuos seleccionados para formar la siguiente generación por medio de técnicas de recombinación (crossover) y, finalmente, el tercer proceso es la mutación. Su importancia radica en que este proceso puede ayudar a prevenir el estancamiento de la población, ya que al cambiar determinados genes del cromosoma, permite explorar otros lugares del espacio de búsqueda que probablemente no habían sido explorados (Steven, Cerdeño y Robles, 2018).

La principal regla del mecanismo de selección es que los mejores individuos tengan mayor probabilidad de ser elegidos para reproducirse. Durante cada generación los operadores de selección, recombinación y mutación son aplicados a cada individuo bajo ciertas probabilidades (Goldberg, 1989). El proceso se repite hasta que se llegue al límite de iteraciones posibles o se alcance el óptimo deseado. Cada una de las generaciones sucesivas

evoluciona y la aptitud media de los individuos tiende a aumentar, esto con el fin de llegar a las mejores soluciones. En la figura 6 se puede obtener una idea gráfica del flujo que sigue un algoritmo genético básico.

Figura 6. Flujo del algoritmo genético básico.



Fuente: Elaboración propia. Adaptada de Goldberg, 1989.

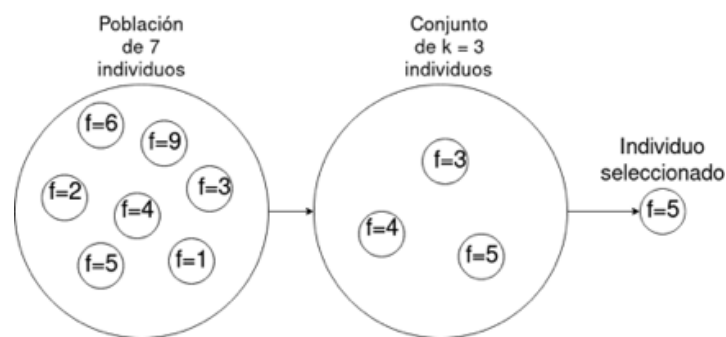
A continuación se hará una descripción detallada de cada una de las etapas, según lo descrito por Goldberg (1989):

1. Población inicial: Es un conjunto de cromosomas o individuos, generado normalmente de forma aleatoria. El tamaño de la población se toma como entrada y depende del problema que se esté tratando. Este tamaño será el mismo para todas las futuras generaciones.
2. “*Función de evaluación*”: Para cada uno de los individuos de la población se determina el valor de “*evaluación*”. Este depende de la función objetivo del problema que se esté tratando.
3. Creación de nueva población: Se crea una nueva población, iterando, hasta que la cantidad de individuos sea igual al tamaño de la población inicial.
4. Selección: Se seleccionan dos cromosomas “*padres*” que permitirán la generación de individuos para la siguiente población. Para realizar esta operación hay varias opciones, como son la selección por ruleta, el muestreo estocástico universal y la

selección por torneo, entre otros (Jebari, Madiafi, Elmoujahid, 2014). A continuación se presenta una descripción del funcionamiento de la selección por torneo:

La idea detrás de este método es que para cada uno de los “padres” se selecciona un conjunto de k individuos de la población de forma aleatoria. Esta selección se puede dar con o sin reemplazo; esto determinará si un mismo individuo puede llegar a ser seleccionado varias veces. Del conjunto de individuos seleccionados se toma al mejor de ellos para ser “padre” (figura 7).

Figura 7. Selección del individuo.



Fuente: Elaboración propia.

5. Recombinación (*crossover*): Este paso permite generar nuevas soluciones utilizando la información de los individuos “padres” que fueron seleccionados en el paso anterior. Para realizar este proceso se han propuesto varios operadores tales como el cruce en un punto, en dos puntos o varios puntos (mayor a 2 puntos), además, se tiene el cruce binario simulado (conocido como SBX), los cuales varían según el método que usen para generar los descendientes. A continuación se describirá el operador de cruce SBX:

Este operador fue propuesto por Deb y Agrawal (1995). Es ampliamente usado en los algoritmos genéticos multiobjetivo, donde se deben optimizar dos o más funciones. También son muy aplicados en problemas donde la codificación de los individuos está dada con números reales. El algoritmo empieza con un valor v aleatorio entre 0 y 1. Es importante aclarar, que para todo el tema de programación se utilizará el punto (.) como separación decimal. Después de esto, se define lo siguiente:

$$B = 2Xv^{(1/n_{\{c\}} + 1)} \text{ si } v \leq 0.5$$

$$(1/2(1 - v))^{(1/n_{\{c\}} + 1)} \text{ en otro caso } (v > 0.5) \quad (\text{Ec 5})$$

Donde,

B = operador de cruce.

V = valor aleatorio entre 0 y 1.

n = índice de distribución, un valor real no negativo.

Luego, cada uno de los “*hijos*” se obtiene de la siguiente forma:

$$h_{\{1\}} = 0.5[(1 + B)p_1 + (1 - B)p_2] \quad (\text{Ec 6})$$

$$h_{\{2\}} = 0.5[(1 - B)p_1 + (1 + B)p_2] \quad (\text{Ec 7})$$

Donde,

B = valor obtenido en la Ecuación 5.

p₁ y p₂ = cromosomas elegidos para generar los “*hijos*”.

Para una mayor claridad en cómo se realiza este cruce, se plantea el siguiente ejemplo:

Se tienen los siguientes cromosomas “*padres*”

p₁: [24, 13, 9]

p₂: [30, 23, 2]

n: 15 índice de distribución.

Por cada uno de los 3 genes que conforman los cromosomas se realiza el siguiente proceso:

Gen 1

v = 0.46 número aleatorio entre 0 y 1

Dado que 0.46 es menor que 0.5 entonces el valor de B es

$$B = (2v)^{(1/(n + 1))}$$

$$B = (2 * 0.46)^{(1/(15 + 1))}$$

$$B = 0.994$$

De modo que el gen 1 del “*hijo*” 1 será:

$$0.5 * ((1 + B) * \text{gen1p}_1 + (1 - B) * \text{gen1p}_2)$$

$$0.5 * ((1 + 0.994) * 24 + (1 - 0.994) * 30)$$

$$24.018$$

Y el gen 1 del “*hijo*” 2 será:

$$0.5 * ((1 + B) * \text{gen1p}_2 + (1 - B) * \text{gen1p}_1)$$

$$0.5 * ((1 + 0.994) * 30 + (1 - 0.994) * 24)$$

$$29.982$$

Gen 2

$v = 0.66$ número aleatorio entre 0 y 1
 Dado que 0.46 es mayor que 0.5 entonces el valor de B es
 $B = (1/(2(1 - v)))^{1/(n+1)}$
 $B = (1/(2(1-0.66)))^{1/(15+1)}$
 $B=1.024$

De modo que el gen 2 del “hijo” 1 será:
 $0.5 * ((1 + B) * \text{gen2p1} + (1 - B) * \text{gen2p2})$
 $0.5 * ((1 + 1.024) * 13 + (1 - 1.024) * 23)$
 12.88

Y el gen 2 del “hijo” 2 será:
 $0.5 * ((1 + B) * \text{gen2p2} + (1 - B) * \text{gen2p1})$
 $0.5 * ((1 + 1.024) * 23 + (1 - 1.024) * 13)$
 23.12

Gen 3

$v = 0.26$ número aleatorio entre 0 y 1
 Dado que 0.26 es menor que 0.5 entonces el valor de B es
 $B=(2v)^{1/(n + 1)}$
 $B=(2*0.26)^{1/(15 + 1)}$
 $B = 0.959$

De modo que el gen 3 del “hijo” 1 será:
 $0.5 * ((1 + B) * \text{gen3p1} + (1 - B) * \text{gen3p2})$
 $0.5 * ((1+0.959) * 9 + (1-0.959) * 2)$
 8.8

Y el gen 3 del “hijo” 2 será:
 $0.5 * ((1 + B) * \text{gen3p2} + (1 - B) * \text{gen3p1})$
 $0.5*((1+0.959)*2+(1-0.959)*9)$
 2.1

Al final los “hijos” obtenidos tras el proceso de cruce son:
 $h1:[24, 12, 8]$
 $h2:[29, 23, 2]$

6. Mutación: La importancia de esta etapa en el proceso del algoritmo genético radica en que es el principal operador con el que se puede mantener la diversidad en la población (Goldberg, 1989; Holland, 1975). Por cada uno de los genes y con una probabilidad $P_{\{m\}}$ mutan los individuos mediante algún operador de mutación como la mutación aleatoria (Michalewicz, 1992), el método Gaussiano (Schwefel, 1987) o la mutación polinomial (Deb y Agrawal, 1999; Deb, 2001), entre otros.

El método de mutación polinomial (PM por sus siglas en inglés), fue propuesto por Deb y Agrawal (1999), el cual toma como parámetro de entrada un índice de distribución $n_{\{m\}}$. Cuanto más pequeño es este valor, más alejado del individuo original quedará el individuo mutado. Se determina un número aleatorio r entre 0 y 1, y a continuación se define lo siguiente:

$$\begin{aligned} \mathit{delta}_{\{1\}} &= x_{\{p\}} - x_{\{l\}} / x_{\{u\}} - x_{\{l\}} \\ \mathit{delta}_{\{2\}} &= x_{\{u\}} - x_{\{p\}} / x_{\{u\}} - x_{\{l\}} \\ d_{\{q\}} &= [2r + (1 - 2r)(1 - \mathit{delta}_{\{1\}})^{n_{\{m\}} + 1}]^{(1/n_{\{m\}} + 1)} - 1 \text{ si } r \leq 0.5 \\ &1 - [2(1 - r) + 2(r - 0.5)(1 - \mathit{delta}_{\{2\}})^{n_{\{m\}} + 1}]^{(1/n_{\{m\}} + 1)} \text{ si } r > 0.5 \end{aligned} \quad (\text{Ec 8})$$

Así, el valor mutado será:

$$x_{\{c\}} = x_{\{p\}} + \mathit{delta}_{\{q\}}(x_{\{u\}} - x_{\{l\}}) \quad (\text{Ec 9})$$

Donde,

r = valor aleatorio entre 0 y 1.

$n_{\{m\}}$ = índice de distribución.

$x_{\{p\}}$ = valor en el gen antes de mutar.

$x_{\{u\}}$ = límite superior del rango de valores que puede tomar cada gen.

$x_{\{l\}}$ = límite inferior del rango de valores que puede tomar cada gen.

$x_{\{c\}}$ = valor del gen después de mutar.

Lo anterior, se realiza por cada uno de los genes del cromosoma.

7. Aceptación: Los individuos que se obtuvieron a partir de la población $p_{\{t\}}$ pasan a formar la población $p_{\{t+1\}}$.
8. Reemplazo: Se usa la nueva generación para repetir los pasos anteriores que permitirán obtener las futuras generaciones.
9. Prueba: Si la condición de parada se satisface, esto es que se haya alcanzado el número máximo de iteraciones o el óptimo deseado, el algoritmo se detiene y devuelve las soluciones encontradas.

Debido a lo analizado en la teoría y en el trabajo de campo, se concluye que la programación de la recolección manual de café, dadas las características del proceso en cuanto a variables y necesidad de soluciones, hace parte de los problemas que deben ser solucionados por medio de heurísticas, para darle una solución óptima.

1.5.6 Técnicas de programación aplicadas a la agricultura

De los trabajos que fueron detectados para el presente trabajo, como relevantes y medianamente relevantes, se pudieron identificar diversas herramientas de programación que están siendo utilizadas en la agricultura (tabla 8 y 9).

Tabla 8. Autores identificados como muy relevantes para el trabajo investigativo y la herramienta de programación que desarrollaron.

Autores	Herramienta de programación
Wijngaard (1988)	Heurística
Corner y Foulds (2005)	Programación de enteros
Ferrer, Mac Cawley, Maturana, Toloza y Vera (2008)	Heurística y programación lineal de enteros mixtos
Guan, Nakamura, Shikanai y Okazaki (2008)	Red de Petri híbrida
Arnaout y Maatouk (2010)	Heurística
Ooster, Bontsema, van Henten y Hemming (2013)	Método de Montecarlo robusto
Ooster, Bontsema, van Henten y Hemming (2015)	Simulación - El modelo GWorkS
Wishon, Villalobos, Mason, Flores y Lujan (2015)	Programación entera mixta

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Autores identificados como medianamente relevantes para el trabajo investigativo y la herramienta de programación que desarrollaron.

Autores	Herramienta de programación
Van Wyk y Hatting (1964)	Manual - Excel
Walker y Preiss (1988)	Programación entera mixta
Thangavadivelu y Colvin (1997)	Base de lógica difusa
Foulds y Wilson (2005)	Heurística
Weintraub y Romero (2006)	Técnica de Investigación de Operaciones
Foulds y Zhao (2007)	Sistema de Soporte de Decisiones (DSS)
Guan, Nakamura, Shikanai y Okazaki (2008)	Algoritmo genético y el modelo híbrido de redes de Petri
Pardo, Riravololona y Munier-Jolain (2010)	Simulación - Integrated Weed Management (IWM)
Eakin, Bojórquez-Tapia, Diaz, Castellanos y Haggar (2011)	Redes Analíticas (decisiones multicriterio y conocimientos expertos)
Beaudoin, Frayret y Lebel (2014)	Modelos Jerárquicos de Schneeweiss

Wu, Zhao, Wang, Zhou y Cai (2015)	Sistema de Programación de Operación Picker de Algodón (CPOSS)
Cunha, Silva, Andrade y Carvalho (2016)	RSM (Response Surface Methodology)
Sopegno, Busato, Berruto y Romanelli (2016)	Modelo matemático con Información SQL y lenguaje en MATLAB
Bing, Fulin, Jiquan y Shengxue (2017)	Modelo de cálculo mejorado, estimación de la demanda laboral
Brack y McLarin (2017)	Programación Lineal
Gautam, LeBel y Beaudoin (2017)	Programación Lineal
Abrahão y Hirakawa (2018)	Modelo conceptual

Fuente: Elaboración propia.

De lo observado en la literatura analizada, desde la perspectiva del sector agrícola, se puede decir que las heurísticas toman un papel muy importante a la hora de programar operaciones en la agricultura, con buenos resultados en las investigaciones realizadas.

1.6 Conclusiones parciales

Como conclusión general del marco teórico - referencial de la investigación, se puede decir que al desarrollar teóricamente la programación de operaciones y analizarla desde el sector agrícola, estudiar el papel de las personas en la programación de operaciones, definir la jornada laboral según normatividad y analizar el contexto, la metodología propuesta para la programación de la recolección manual de café comenzará con la aplicación de pronósticos de tipo cualitativo con el fin de calcular la producción de café por lotes de las fincas. Se realizará un pronósticos inicial por medio del registro de floraciones y luego un ajuste a ese pronóstico implementando un muestreo en campo.

Posterior a esto y según lo analizado en la teoría especializada, se define el programa maestro como la fase de la programación donde se iniciará. Esta se realizará con el fin de definir a corto plazo la cantidad de trabajadores que se necesitan por lote, de acuerdo a la cantidad de kilogramos de café disponibles para recolección (definido en el análisis de los pronósticos) y el rendimiento de los trabajadores seleccionados. Seguido, la metodología propuesta continuará con la programación detallada, específicamente en la asignación del personal disponible, en donde se asigna cada recolector al lote indicado.

Como conclusión parcial de este capítulo, se puede decir que las variables que están involucradas en la recolección manual de café son las siguientes: número total de lotes de la finca y número de lotes a recolectar por semana, características del lote, condiciones climáticas y personal. Como restricciones se identifican dos. La primera, en cuanto a los días en que se debe recolectar el café, ya que una vez

el grano se encuentre maduro, se tienen en promedio 8 días para su recolección, sin que el fruto pierda las características. La segunda, son las restricciones del valor por kilo que se va a pagar, ya que como la idea es desarrollar una metodología que reduzca los costos del proceso, se deben generar límites superiores e inferiores para el precio del kilo por lote (este se determinará de acuerdo con las características del lote ya mencionadas anteriormente).

Como conclusión adicional y con base a las 90 entrevistas realizadas a los recolectores de café y al trabajo realizado por Duque O. (2005), el perfil del recolector de café Colombiano cuenta con las siguientes características: son masculinos, con una edad entre los 36 y 65 años y con una experiencia entre 11 y 20 años recolectando café. Es de importancia mencionar que esta es la información que se recolectó en lo analizado anteriormente, pero estas características pueden variar con el tiempo, debido a la migración de mano de obra de otros países y a condiciones propias del país. Esta información proporciona a la tesis doctoral la generalidad del tipo de personal que se está vinculando a la recolección de café y de acuerdo a estas características cómo puede estar influenciado el rendimiento de la fuerza laboral.

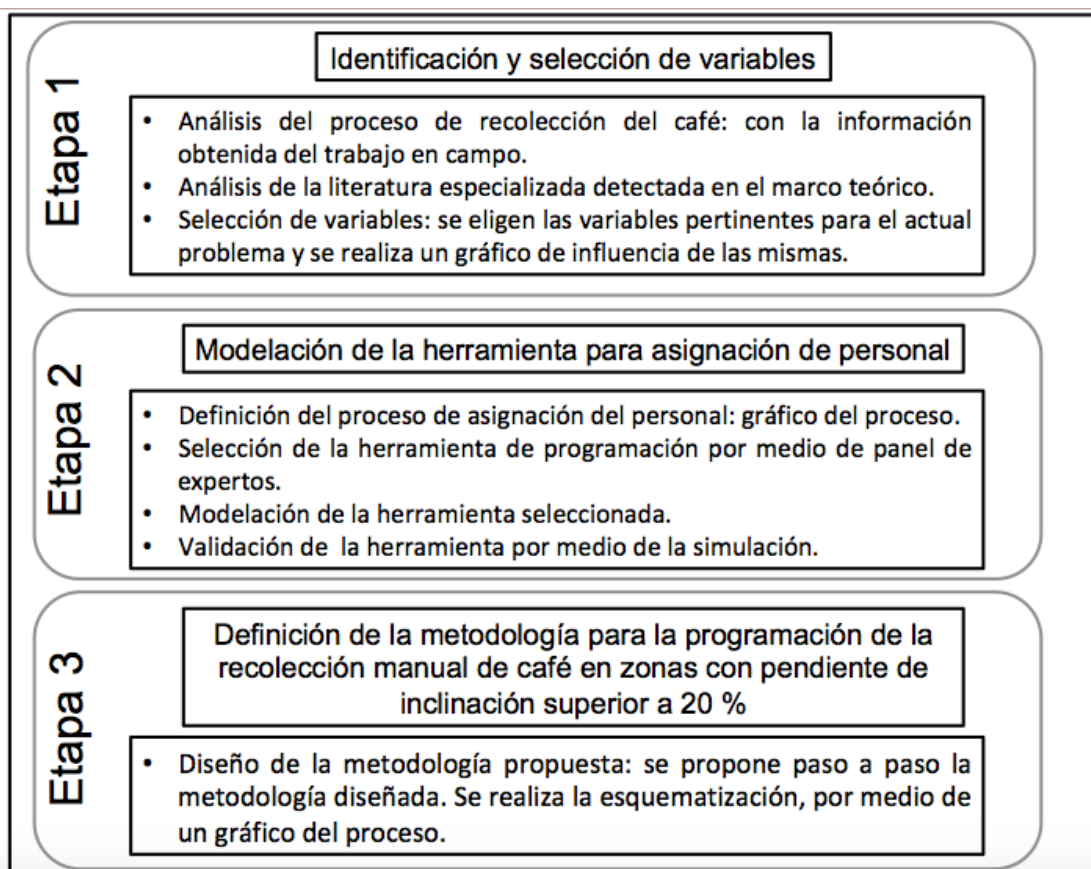
Por último, se define el horario laboral para los recolectores de café en Colombia, con el fin de cumplir con las 9 horas diarias de trabajo reglamentarias, según del código sustantivo del trabajo (Ministerio del Trabajo, 1951). Adicional a esto, se identifican las heurísticas como las mejores herramientas para realizar la asignación del personal a cada lote, de acuerdo a todas las variables ya mencionadas.

2 Metodología de la investigación

Según el análisis de la teoría y el contexto que se desarrolló en el marco teórico – referencial de la investigación, en donde se incluyeron temas específicos como: la programación de operaciones y su aplicabilidad en la agricultura, la administración del recurso humano en este campo, la normativa que aplica en la actualidad para las labores humanas en Colombia, el sector cafetero en Colombia, la programación de la recolección manual de café y las técnicas de programación útiles para resolver el actual problema, se propone la metodología de la investigación (figura 8).

Esta propuesta metodológica muestra los pasos a seguir con el fin de desarrollar una metodología para la programación de la recolección manual de café en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %, con el fin de reducir los costos de operación, manteniendo la calidad del grano de café. La metodología esquematizada (figura 8) nace en respuesta a los problemas analizados en el capítulo 1, en donde se detectan problemas de programación del personal y de costos de recolección del grano de café. Como propuesta, se plantean 3 etapas: la primera, tiene como objetivo la selección de las variables que se utilizarán en la actual investigación. En la segunda, se realizará la selección de la herramienta de programación y se modelará y validará. Por último, se diseñará la metodología para la programación de la recolección manual de café con pendiente de inclinación superior al 20 %.

Figura 8. Esquematización de la metodología de la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

2.1 Etapa 1: Identificación y selección de variables

La etapa 1 de la metodología de la investigación tiene como finalidad la identificación y selección de las variables que se utilizarán en la actual investigación. Estas variables serán el insumo principal, tanto para diseñar la metodología de programación de la recolección manual de café en pendiente superior al 20 %, como para modelar la herramienta de programación seleccionada. Con este fin, se realizó el análisis del proceso de recolección manual de café, por medio de un trabajo de campo. Posterior a esto, se realizó el análisis de la literatura especializada que se presentó en el capítulo 1, donde se identificaron unas variables preliminares basadas en la literatura. Por último, se seleccionaron las variables a modelar de acuerdo al trabajo de campo realizado y a la literatura analizada y se establecieron por medio de un gráfico de influencia.

2.1.1 Análisis del proceso de recolección manual de café

En este punto de la metodología se desarrolló un trabajo de campo con el fin de definir las características del proceso, las variables y los problemas del sector.

Este trabajo en campo comenzó con la selección de la muestra de fincas para realizar las visitas. Posterior a esto, se planteó el instrumento (entrevista semiestructurada), con el cual se obtuvo toda la información. Se finalizó con la aplicación de la entrevista semiestructurada a las fincas seleccionadas y con la consolidación de los resultados.

2.1.1.1 Selección de la muestra de fincas a visitar

El Departamento de Caldas cuenta con 25 municipios cafeteros, que registran cerca de 74 mil hectáreas sembradas de café en más de 43 mil fincas pertenecientes a 34 mil caficultores, que representan el 6,2 % de los productores del país (FNC, 2014). Adicional a esto, el cultivo de café representa el 49 % de la actividad productiva del Departamento de Caldas (Gobierno de Caldas, 2016). Dada la importancia del café en este Departamento, se eligió como zona de estudio que proporcionara la información necesaria para el presente trabajo investigativo.

Con el fin de obtener información para la descripción del proceso de programación de la recolección manual de café en fincas del Departamento Caldas con pendientes de inclinación superiores al 20 %, las variables que influyen en el proceso y los problemas del sector, se visitaron 18 fincas cafeteras, que fueron seleccionadas con base en dos variables: área del cultivo de café en hectáreas y la pendiente de inclinación.

Para la realización de las entrevistas, se seleccionaron fincas bajo el tipo de muestreos no probabilísticos. En estos muestreos se emplean algunas técnicas que logran seguir un procedimiento que permita realizar un seguimiento exploratorio, piloto o cualitativo cuando no se cuenta con poblaciones muy definidas (Universidad de Antioquia, 2016), o cuando se desea conocer rasgos de la muestra o grupo analizado y no se pretende generalizar a toda la población, o no se cuenta con el tiempo y los recursos suficientes para lograr hacer un muestreo probabilístico con una mayor cantidad de datos (Lohr, 2010).

Existen diferentes tipos de muestreo no probabilístico (Brenner, 2016; Kothari, 2004; Robledo, 2005; Trochim, 2006), entre ellos el muestreo deliberado por conveniencia, el muestreo deliberado por juicio, el muestreo por cuotas, el muestreo por moda, el muestreo experto, el muestreo por cuotas no proporcional, el muestreo bola de nieve y el muestreo consecutivo (en el anexo 1, se puede observar la descripción de cada tipo de muestreo).

Al analizar cada tipo de muestreo para elegir el que se usará en el presente estudio, se encuentra que el muestro deliberado por conveniencia y por juicio no son convenientes, ya que aunque se pueden tener unas variables definidas (tamaño de la finca y pendiente de inclinación del terreno) con el fin de seleccionar la muestra, este tipo de muestreo no contempla la posibilidad de definir rangos de

observación, que lleven a destacar diferencias en el comportamiento de las variables.

El muestreo por cuotas requiere que al realizar el muestreo se conserve la proporción entre la muestra y la población general. En el caso de las fincas que se encuentran en el Departamento de Caldas, cuyos tamaños son variados (FNC, 2016), se tendría que para las de tamaño de cultivo grande la proporción sería muy baja, debido a su poco número (729 Fincas), lo cual no permitiría hacer distinción entre estas; y para las fincas con tamaño de cultivo pequeño, se visualizarían muchos casos comunes, ya que son una cantidad considerable (15.465 Fincas), lo cual haría que se realicen grandes esfuerzos con el fin de obtener información redundante o con mucha similitud.

En cuanto al muestreo por moda, al buscar el caso más típico, no se logra hacer un diagnóstico representativo, ya que se deben lograr ubicar las diferencias entre los rangos de las variables consideradas. El muestreo por expertos se hace inviable en este caso, ya que se centra en la persona o experto y deja de lado el entorno en el que se encuentra, lo que excluiría de la muestra las características del cultivo (tamaño de la finca y pendiente de inclinación del terreno).

El muestreo bola de nieve no aplica al estudio, ya que las poblaciones a investigar tienen cierta facilidad de acceso y no se necesita contar con la recomendación de otros sujetos entrevistados. El muestreo consecutivo podría generar el mismo inconveniente que se tiene en el muestreo por cuotas, ya que se realizarían grandes esfuerzos para rescatar datos que tienden a ser redundantes y que al no igualar el número de muestras a tomar en ciertas categorías, no se podría llegar de manera rápida y eficiente a los mismos resultados del diagnóstico.

Existen otros tipos de muestreos, como el de caso extremo, donde se seleccionan los casos de los extremos de los rangos; caso crítico, en el que se seleccionan casos de referencia; y muestreo poblacional, que se basa en la población de un subgrupo calificado. Sin embargo, no son de utilidad para el análisis del presente trabajo, debido a que este tipo de muestras excluyen algunos elementos importantes de la investigación, como por ejemplo, fincas medianas en el caso de extremo.

Para la selección de la muestra de fincas, con el fin de realizar una adecuada descripción del proceso de programación de la recolección manual de café, se hizo uso del muestreo por cuotas no proporcional, en el cual se determinan unos estratos o categorías, donde el tamaño de cada estrato está sujeto a determinación del investigador (Trochim, 2006), considerando la representatividad de los datos en el estudio exploratorio a realizar. Este tipo de estudios se asimila al muestreo estratificado, logrando dar representatividad en las diferentes categorías definidas (Universidad de Antioquia, 2016).

En la selección de las fincas se tuvieron en cuenta dos variables para su estratificación. La primera fue el área del cultivo de café, medido en hectáreas,

para la cual se tomaron inicialmente los rangos del tipo de economía cafetera que maneja el Comité Departamental de Cafeteros de Caldas (FNC, 2016). Sin embargo, al observar que en las fincas de tamaño minifundista no agremiable (< 0,5 ha) y minifundista agremiable (0,5 – 1,5 ha) los cultivos son recolectados por una sola persona y no se necesita una planeación de la recolección de café, se modificaron estos rangos de la siguiente manera:

- Pequeña (1,6 - 5 ha)
- Mediana (6 - 10 ha)
- Grandes (> 10 ha)

En Caldas, se tienen actualmente 15.465 caficultores con economía cafetera Minifundista Agremiable (45,8 % de la población de caficultores) con una área de café promedio de 0,9 ha, 11.999 caficultores con economía cafetera Campesina (35,6 % de la población de caficultores) con una área de café promedio de 3 ha, y 729 caficultores con economía cafetera Empresarial (2,2 % de la población de caficultores) con una área de café promedio de 26,7 ha (FNC, 2016).

Al considerar el tipo de fincas clasificadas por el área cultivada de café, se procedió a realizar una nueva clasificación de acuerdo a los rangos de la pendiente de inclinación del terreno, teniendo en cuenta que a partir de una pendiente del 20 % no se puede hacer recolección mecanizada (Silva y Carvalho, 2011, como es citado en Cunha et al., 2016):

- Pendiente de elevación entre 20 y 100 % (11,3 – 45 grados)
- Pendiente de elevación entre 101 y 200 % (45,1 – 63,4 grados)
- Pendiente de elevación mayor al 200 % (mayor a 63,4 grados)

A pesar de que en otros estudios se han establecido unos rangos diferentes para la consideración de la pendiente (FNC, 1993), este trabajo hace una división más amplia, que logre notar las diferencias significativas entre las diferentes pendientes y contribuya a un mejor diagnóstico de las actividades de recolección de café.

Teniendo en cuenta los rangos de las variables ya mencionadas, se escogieron 6 fincas por cada tamaño de los que se definieron anteriormente y, de estas 6, se seleccionaron dos fincas dentro de cada rango de pendiente, para un total de 18 fincas a visitar. En cada una de estas, se realizaron las entrevistas a las personas pertinentes y que tuvieran los conocimientos sobre las generalidades de la finca, los lotes, la planeación y los problemas que se tienen en la recolección de café. Posteriormente, se realizaron entrevistas a recolectores que estaban cosechando en el lote a analizar. Bajo las anteriores determinaciones, se pudo asegurar un procedimiento, que si bien es exploratorio, cuenta con una clasificación representativa y proporciona una buena base de datos.

2.1.1.2 Diseño del instrumento de recolección de datos

Debido a la información que se deseaba recolectar y a las condiciones del sector, se aplica una entrevista semiestructurada para la recolección de los datos. Tomando como punto de partida la revisión de literatura, la descripción del proceso de recolección de café y una visita inicial que se realizó en Finca “*La Popa*” ubicada en la vereda El Guineo, Caldas, se procedió a elaborar una serie de preguntas categorizadas por tópicos, que permitieran dirigir la entrevista semiestructurada en las fincas a visitar. Esta entrevista se dividió principalmente en 5 categorías:

- **Fincas:** Se describen los aspectos generales de las fincas.
- **Problemas:** Se identifica información relacionada con problemas generales del sector cafetero y se especifica sobre algunos encontrados en las fincas.
- **Planeación:** Se recolecta información sobre la manera de planear la recolección de café, asignación de mano de obra a contratar, cálculo del precio a pagar a los trabajadores, condiciones para recolectar y errores cometidos.
- **Lotes:** Se recolecta información relacionada con el lote a analizar.
- **Operarios:** Información relacionada con los trabajadores y su manera de recolectar en el lote analizado.

Una vez se concretó el instrumento para la recolección de datos (en el anexo 2, se puede encontrar el instrumento detallado), se procedió a realizar una prueba piloto en la Finca “*La Popa*”, con el fin de lograr hacer una clasificación de las respuestas y establecer un procedimiento correcto al momento de realizar las entrevistas.

2.1.1.3 Consolidación de resultados

Con el instrumento de recolección de datos definido, se realizaron preguntas relacionadas con las fincas, planeación de la recolección de café, problemas relacionados con la actividad cafetera, descripción de los lotes y descripción de los operarios o recolectores. De esta manera, se obtuvieron los resultados de las visitas a las 18 fincas, donde se entrevistaron 18 personas entre administradores, agregados y propietarios para los tópicos de fincas, problemas, planeación y lotes, y se recopiló información de 90 recolectores de café. Los resultados se pueden ver a continuación:

- **Fincas:** a continuación se muestran datos generales de las fincas entrevistadas:

Ubicación: Las fincas están ubicadas en el Departamento de Caldas, Colombia, en los municipios de Pácora, Salamina, La Merced, Manzanares, Neira y Manizales.

Altitud: Las fincas se encontraban entre los 1.300 y 1.950 M.S.N.M.

Pendiente: Las pendientes promedios se tomaron de los lotes de interés, por lo tanto se analizará posteriormente.

Clima: El clima rondó entre los 20 °C y 25 °C.

Cantidad de lotes: Las fincas variaron entre los 2 lotes que solían ser de fincas pequeñas y algunas medianas, hasta los 30 lotes, valores que se obtuvieron en fincas grandes.

Número de administradores: Solo se tuvo un administrador en las fincas y principalmente en las grandes, ya que las medianas y pequeñas suelen ser manejadas por el mismo propietario o un mayordomo.

Número de agregados: Hubo hasta 5 agregados en las fincas visitadas.

% de humedad: se obtuvieron valores del porcentaje de humedad desde 60 % hasta el 83 % en las fincas visitadas.

Los siguientes datos se muestran tabulados:

Tabla 10. Datos recabados en las fincas.

Tamaño de las fincas	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
0 – 5 ha	33,33 %	6
6 – 10 ha	33,33 %	6
Mayor a 10 ha	33,33 %	6
Variedad de cultivo sembrado	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Caturro	22,22 %	4
Colombia	72,22 %	13
Castillo	61,11 %	11
Caturro	5,56 %	1
¿Se hace registro de floraciones?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Si	66,67 %	12
No	33,33 %	6
¿Se hace repase final de lotes?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Si	66,67 %	12
No	33,33 %	6

Fuente: Elaboración propia.

Se logra observar una predominancia de la variedad Castillo y Colombia sobre las demás variedades cultivadas en las fincas. Del total de fincas visitadas, un 67 % hace registro de floraciones, mientras que el 33 % restante no lo hace; un 67 % hace repase final de lotes (re-re) y el 33 % restante no lo hace.

- **Problemas:** se muestran las respuestas obtenidas sobre las problemáticas generales del sector cafetero y problemáticas internas relacionadas con diferentes tópicos en el manejo de las fincas cafeteras, así como las sugerencias para darles solución.

Tabla 11. Datos recabados sobre los problemas de las fincas.

¿Cuáles de los siguientes problemas generales ve en el sector cafetero?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Escasez de mano de obra	77,78 %	14
Caída de precios del café	61,11 %	11
Aumento de precios de abonos y tratamientos para los cultivos	88,89 %	16
Falta de programas del gobierno para incentivar el sector	83,33 %	15
Falta de sociedades entre las fincas cafeteras	55,56 %	10
Otra	33,33 %	6
¿Cuáles de los siguientes problemas relacionados con la recolección y la programación de la recolección de café ha visto en su finca?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Demoras para la recolección de lotes	83,33 %	15
Mal cálculo de precio a pagar por kilogramo recolectado	77,78 %	14
Daños a cafetales por emplear técnicas equivocadas	27,78 %	5
Exceso de granos verdes recolectados	100 %	18
Exceso de granos dejados en el suelo o sin recolectar en los árboles	94,44 %	17
Otros	0 %	0
¿Cómo podría mejorar la recolección y la programación de	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta

la recolección de café en la finca?		
Con maquinaria y tecnología	38,89 %	7
Con técnicas para programar la recolección manual de manera efectiva	77,78 %	14
Realizando registro y análisis de datos sobre las cosechas	33,33 %	6
Haciendo un proceso de selección detallado para contratar recolectores	61,11 %	11
Otra	11,11 %	2
¿De los siguientes problemas con recolectores cuáles ha tenido?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Problemas de drogadicción	77,78 %	14
Peleas	83,33 %	15
Falta de motivación e inasistencia a trabajar	94,44 %	17
Accidentes laborales	38,89 %	7
Otros	11,11 %	2
¿Cómo podría mejorar los problemas con los recolectores?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Programas de integración entre los recolectores	55,56 %	10
Bonificaciones por realizar actividades mejor que otros	100 %	17
Capacitaciones relacionadas con una buena actitud en el trabajo	44,44 %	8
Capacitaciones relacionadas con la forma de recolección	61,11 %	11
Otra	5,56 %	1
De los siguientes problemas ambientales, ¿Cuáles considera que afectan su finca?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Cambios de clima abruptos	55,56 %	10
Aparición de plagas y enfermedades	66,67 %	12
Falta de lluvias	100 %	18
Deslizamientos	66,67 %	12

De las siguientes actividades, ¿Cuáles cree usted que mejorarían los problemas ambientales?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Cuidado de árboles y laderas, barreras vivas y conservación de suelos	100 %	17
Uso de abonos y tratamientos que no sean nocivos para el medio ambiente	100 %	17
Manejo integrado de broca	100 %	17
Otras	5,56 %	1

Fuente: Elaboración propia.

Los tres problemas más destacados fueron el aumento de precios de abonos y tratamientos, la falta de programas del gobierno para incentivar el sector y la falta de mano de obra. Entre los otros problemas mencionados, estuvo el plan de formalización del campo que está haciendo el gobierno, el monopolio de los precios de café por parte de la Federación Nacional de Cafeteros, el cambio de mano de obra hacia otros cultivos, el clima no favorable y la falta de relevo generacional en la mano de obra.

Los problemas dominantes en cuanto a la programación de la recolección en las fincas, son el exceso de granos verdes recolectados, ya que solo se deben recolectar los frutos maduros, demoras en la recolección de los lotes y mal cálculo del precio a pagar por kilogramo recolectado. Las técnicas para programar la recolección manual de café de manera efectiva, fue la opción que se cree que tiene más impacto según los encuestados, seguido del proceso de selección de personal al momento de las acciones para mejorar la recolección y la programación de la misma. Otra manera comentada fue la renovación constante de cafetales, teniendo lotes nuevos.

Los mayores problemas evidenciados entre los recolectores fueron la falta de motivación e inasistencia a trabajar (94,44 %), peleas (83,33 %) y problemas de drogadicción (77,78 %). En las otras respuestas también se mencionan infidelidades entre parejas y asesinatos. Las opciones más seleccionadas para mejorar la situación de problemas entre los recolectores fueron

las bonificaciones por realizar actividades mejor que otros y las capacitaciones relacionadas con la forma de recolección.

La falta de lluvias fue el problema ambiental más mencionado, seguido de la aparición de hongos y deslizamientos. El 100 % de entrevistados estuvo de acuerdo con que el cuidado de árboles y laderas, abonos y tratamientos amigables con el medio ambiente y buenas prácticas del cultivo para tratamiento de broca, pueden mejorar los problemas ambientales. Dentro de las otras respuestas se mencionó hacer la reforestación, protección de microcuencas y nacimientos, así como evitar quemas.

- **Planeación:** a continuación se muestran los resultados tabulados sobre las preguntas realizadas para describir la planeación en las fincas cafeteras:

Tabla 12. Datos recabados sobre la planeación en las fincas.

De las siguientes actividades, ¿Cuáles realiza para planear la recolección del café?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Recorrido por los cafetales, determinando el momento de recolectar de acuerdo a la experiencia	100 %	18
Seguimiento del registro de floración y porcentaje de madurez para determinar el momento de recolectar	11,11 %	2
Uso de técnicas estadísticas para estimar y planear el momento de recolección	0 %	0
¿Cómo selecciona a los recolectores?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Se seleccionan con base en el conocimiento de los agregados	77,78 %	14
Se tiene en cuenta la experiencia, el rendimiento, la edad, comportamiento entre otras variables	33,33 %	6
Se selecciona al que tenga disposición de trabajar	66,67 %	12
Otro	5,56 %	1
¿De qué depende la cantidad	Porcentaje de	Conteo de

de recolectores a contratar?	Respuesta	Respuesta
Clima	83,33 %	15
Precio a pagar por kilogramo recolectado	66,67 %	12
Cosecha	88,89 %	16
Tamaño de lote	88,89 %	16
Apreciación de la floración	61,11 %	11
Otra	16,67 %	3
¿Cómo se asignan los surcos a los recolectores?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Método del banderín	66,67 %	12
Por registro de experiencia o rendimiento	5,56 %	1
Aleatoriamente	11,11 %	2
Otra manera	50 %	9
¿Cómo priorizan los lotes a ser recolectados?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Se maneja un orden de recolección y se pasa cada cierto tiempo por cada lote	94,44 %	17
Se lleva un registro de floración y en base a esto se recolecta	5,56 %	1
Se hacen por la experiencia que se tiene en la recolección	5,56 %	1
Se hace aleatoriamente	5,56 %	1
Otra manera	5,56 %	1
¿Cómo se establece el precio a pagar por kilo recolectado?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Basado en la cantidad de café que haya en los lotes	61,11 %	11
Se establecen los precios en acuerdo con fincas vecinas	88,89 %	16
Se tienen en cuenta condiciones del lote como altura del árbol, pendiente, número de cosecha	22,22 %	4
Otra manera	5,56 %	1
¿Qué errores ha cometido al programar la recolección de café?	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Poco personal contratado	72,22 %	13
Mucho personal contratado	88,89 %	16

Cálculo erróneo del precio a pagar por kilogramo recolectado	66,67 %	12
Distribución inadecuada de los surcos	88,89 %	16
Contratar personas sin experiencia	94,44 %	17
Otros	11,11 %	2

Fuente: Elaboración propia.

El 100 % de los entrevistados realiza un recorrido por los cafetales. Solo el 11,11 % además de hacer el recorrido, tiene en cuenta el registro de floración para determinar el momento de recolectar. En un 77,78 % se hace con base en el conocimiento de los agregados, ya que son ellos los que directamente deben contratarlos, y en fincas grandes y medianas se selecciona al que tenga disposición de trabajar debido a la escasez de mano de obra y al afán de recolectar un lote para que no se sobre-madure.

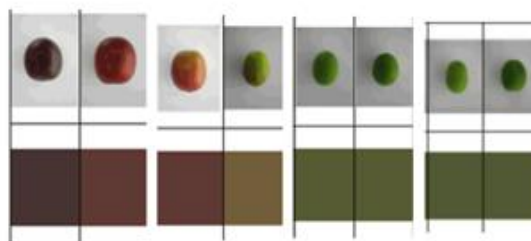
La cosecha (cantidad de café) y el tamaño del lote son factores fundamentales al determinar la cantidad de recolectores a contratar, ya que de acuerdo a esto, los encargados de las fincas estiman la cantidad de personal que se necesita. Por otro lado, el clima también es una variable que se tiene en cuenta para el cálculo de la cantidad de personas necesarias, ya que este factor específico determina cuantas horas al día se podrá recolectar.

Desde el punto de vista de la técnica de asignación de surcos, se observa que el 67 % de los encuestados usan el método del banderín, principalmente en fincas grandes y medianas, ya que en fincas pequeñas se hace aleatoriamente o por registro de experiencia de los agregados. En las otras respuestas se tuvo que se asignan surcos sin bandera o se asignan parcelas enteras a los recolectores, en todos los tamaños de fincas. También se observó que se asignan de a dos surcos, argumentando que así los recolectores tiene menos desplazamientos.

En la mayoría de las fincas, manejan un orden de recolección de lotes, pasando cada cierto tiempo, que puede ir de 15 a 30 días. En las otras respuestas, una finca mencionó que lo hacen por el número de días de haber sido recolectado el café. La mayoría de fincas establecen los precios en acuerdo con fincas vecinas, seguido de la cantidad de café que haya en los lotes. En las otras maneras, se mencionó que se tiene en cuenta el porcentaje de maduración.

El 100 % mencionaron que se debe tener un porcentaje de maduración entre el 81 % y el 100 %, sin embargo, al mostrarles la imagen del color de maduración (figura 9), mencionaron que no debe estar sobre-maduro en el 100 %.

Figura 9. Colorimetría del grano de café.



Fuente: Carvajal, Aristizábal, Oliveros, y Mejía, (2011).

Los problemas más destacados fueron: la contratación de personas sin experiencia, mucho personal contratado y distribución inadecuada de los surcos. Entre las otras respuestas, se tuvo que no se revisan antecedentes delictivos de los recolectores y que en ocasiones no se han conseguido recolectores. En el 100 % de las fincas entrevistadas se usan pesas, recipientes (cocos) o estopas. En el 72,22 % se usan vehículos.

- **Lotes:** se observaron las siguientes características generales:

Número de hectáreas: Este valor estuvo entre 1 y 10 ha, siendo 8 y 10 ha el valor con menos frecuencia, y 1 ha el más frecuente.

Cantidad de operarios: El número de recolectores va desde 5 hasta 30 recolectores para ciertos lotes, sin embargo en época de cosecha han tenido hasta 100 recolectores en las fincas grandes.

A continuación se muestran otras variables estudiadas con la entrevista:

Tabla 13. Datos recabados sobre los lotes de las fincas.

Pendiente	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
20 % – 100 %	33,33 %	6
101 % – 200 %	33,33 %	6
Mayor a 200 %	33,33 %	6

Número de cosecha	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
1	11,11 %	2
2	27,78 %	5
3	33,33 %	6
4	27,78 %	5
5	0 %	0
Apreciación de la flora	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Buena	55,56 %	10
Regular	33,33 %	6
Mala	11,11 %	2

Fuente: Elaboración propia.

El número de cosecha de los lotes estuvo principalmente entre la segunda y cuarta cosecha, siendo la tercera la que más se observó en las fincas. La densidad de siembra rondó entre 3.500 árboles/ha y 9.000 árboles/ha, siendo 5.000 árboles/ha el valor más frecuente. En cuanto a los zoqueos o podas, en los lotes visitados se han hecho desde 0 hasta 4 zoqueos, siendo 0 el valor más frecuente.

La altura de los árboles estuvo entre 80 y 200 cm, siendo 80, 180 y 150, los valores más frecuentes. Se encontró que en las fincas esperaron desde 20 hasta 36 semanas después de la floración con el fin de hacer la recolección, siendo 30 semanas el valor más frecuente. En un poco más de la mitad de las fincas, se percibió una buena floración para la cosecha.

Los pases realizados en las fincas estuvieron entre 17 y 24 pases al año, siendo los valores más frecuentes 19 y 20. La distancia entre surcos estuvo entre 100 y 150 cm, siendo el valor más frecuente 120 cm. La distancia entre árboles estuvo entre 100 y 140 cm, siendo el valor más frecuente 110 cm. El precio a pagar por Kg de café recolectado estuvo entre \$ 400 y \$ 700, siendo el valor más frecuente \$ 500.

Se mencionó que en los lotes con pendiente es compleja la recolección porque los granos se riegan y luego no se recogen, lo cual promueve la generación de broca. También se comentó que en terrenos con pendiente se complica la labor por el hecho de llevar la estopa con café hasta el punto de acopio.

- **Operarios:** a continuación se muestran las respuestas relacionadas con las características de los operarios y la actividad de recolección que ejercen:

Tabla 14. Datos recabados sobre las operarios de las fincas.

Género	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Masculino	94,44 %	85
Femenino	5,56 %	5
Edad	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Menor a 18 años	4,44 %	4
18 – 25 años	10,00 %	9
26 – 35 años	28,89 %	26
36 – 55 años	43,33 %	39
56 – 65 años	10,00 %	9
Mayor a 65 años	3,33 %	3
Años de experiencia	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
0 – 5 años	7,78 %	7
6 – 10 años	27,78 %	25
11 – 20 años	33,33 %	30
Mayor a 20 años	31,11 %	28
Desplazamientos en el surco	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Rolos	30,00 %	27
Caras	45,56 %	41
Caras – Rolos	24,44 %	22
Caras - Serpentín	0,00 %	0
Movimientos en el árbol	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Desde estrato alto a estrato bajo	77,78 %	70
Desde estrato bajo a estrato alto	14,44 %	13
Desde estrato medio a estrato alto y luego bajo	0 %	0
Desde estrato medio a estrato bajo y luego alto	0 %	0
Combinación de	3,33 %	3

movimientos continuo		
Movimiento aleatorio	4,44 %	4
Movimientos en rama	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Del tronco hacia afuera	91,11 %	82
De afuera hacia el tronco	7,78 %	7
Del centro de la rama hacia el tronco y luego hacia afuera	0 %	0
Del centro de la rama hacia afuera y luego hacia el tronco	0 %	0
Otro	1,11 %	1
Cantidad recolectada por día en cosecha (rendimiento) Kg	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
30 – 50	4,44 %	4
51 – 100	38,89 %	35
101 – 150	23,33 %	21
151 – 250	28,89 %	26
Mayor a 250	4,44 %	4
¿Cómo es la calidad del recolector? (% de frutos verdes)	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Aceptable	84,44 %	76
No Aceptable	15,56 %	14
¿Cómo son las pérdidas del recolector? (número de frutos dejados en el suelo)	Porcentaje de Respuesta	Conteo de Respuesta
Aceptable	87,78 %	79
No Aceptable	12,22 %	11
¿Cómo es la eficacia? (número de frutos dejados en el árbol)		
Aceptable	90,00 %	81
No Aceptable	10,00 %	9

Fuente: Elaboración propia.

La mayoría de recolectores es de género masculino, sin embargo, se percibió que en las zonas cercanas a pueblos se encuentran mujeres trabajando como recolectoras, a diferencia de las zonas cafeteras cerca a las ciudades. La mayoría de los recolectores entrevistados, tienen entre 35 y 55 años de edad, tienen entre 11 y 20 años de experiencia porque han trabajado desde pequeños en el campo y realizan la actividad de recolección de café por caras, es decir, se desplazan por un lado del surco y se devuelven por el lado opuesto.

La mayoría de recolectores recolectan desde la parte más alta del árbol hacia abajo, realizan la recolección desde el tronco del árbol hacia afuera cuando se desplazan en la rama y recogen una cantidad entre 51 y 100 Kg, seguidos de los que recogen de 151 a 250 Kg y 101 a 150 Kg al día (jornada de 9 horas) durante época de cosecha, es decir, con una buena cantidad de café maduro en los árboles. Es importante mencionar que estos rendimientos se determinaron en pendientes de inclinación medias entre el 101 % y el 200 %.

Según lo observado en campo, se definen tres rangos principales de rendimiento, según se describe a continuación:

Bajo rendimiento: entre 30 y 100 kilogramos en una jornada de 9 horas (entre 3,33 y 11,11 kilogramos/hora).

Medio rendimiento: entre 101 y 250 kilogramos en una jornada de 9 horas (entre 11,22 y 27,77 kilogramos/hora).

Alto rendimiento: mayor a 251 kilogramos en una jornada de 9 horas (mayor a 27, 88 kilogramos/hora).

Adicional a esto, el rendimiento promedio de los 90 recolectores es de 123,03 kilogramos en una jornada de 9 horas (13,67 kilogramos/hora).

Observaciones: En la finca Villahermosa se mencionó que antes recolectar el café era más rápido y efectivo, cuando se sembraba en triángulo y se daba más espacio entre los cafetales.

Después de realizar el trabajo de campo ya descrito, y al ver detenidamente toda la información recolectada, se considera pertinente realizar un nuevo acercamiento a campo, con el fin de determinar cómo afecta específicamente la pendiente de inclinación del terreno en el rendimiento de un trabajador. Para esto se escogieron 3 fincas de la vereda el Guineo del municipio de Manizales, Colombia, las cuales proporcionaron tanto

recolectores de café como lotes, para realizar los estudios necesarios. El proceso que se empleó, con el fin de obtener la información, fue el siguiente:

1. Se seleccionaron 6 trabajadores de edades diversas de las 3 fincas.
2. Se realizó un estudio con cada trabajador para observar el rendimiento (kg de café/hora) del recolector, en lotes donde la cantidad de café era muy buena, pero la pendiente de inclinación variaba entre 20 y 100 %, 101 y 200 % y mayor al 200 %, con el fin de determinar cómo afectaba la inclinación del terreno en el rendimiento del recolector.
3. Se consolidaron los datos y se obtuvieron conclusiones.

Los resultados de este trabajo de campo se observan en la tabla 15:

Tabla 15. Resultados de la influencia de la pendiente de inclinación del terreno en el rendimiento de los recolectores de café.

Nombre	Edad	Rango de pendiente de inclinación	Kilogramos de café recolectado en una hora
Jesús Antonio Osa	65 años	20 % - 100 %	18
		101 % - 200 %	14,5
		Mayor a 200 %	13
Jhon Fredi Giraldo	35 años	20 % - 100 %	20
		101 % - 200 %	19
		Mayor a 200 %	17
José Luis López	60 años	20 % - 100 %	18
		101 % - 200 %	15
		Mayor a 200 %	14
Aldeman Restrepo	49 años	20 % - 100 %	25
		101 % - 200 %	20
		Mayor a 200 %	16
Javier Herrera	52 años	20 % - 100 %	25
		101 % - 200 %	22
		Mayor a 200 %	20
José Eutimio Ramírez	64 años	20 % - 100 %	20
		101 % - 200 %	15
		Mayor a 200 %	12

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 15, en todos los casos, a medida que se incrementa el rango de pendiente de inclinación, el

rendimiento (kg de café/hora) disminuye. Si se observa más detalladamente, se concluye que, al pasar de una pendiente mayor al 200 % a una entre el 101 % y 200 %, el rendimiento se incrementa en 2,25 Kg/hora; y al pasar de una pendiente entre el 101 % y 200 % al 20 % y 100 %, el rendimiento se incrementa en 3,4 Kg/hora.

2.1.2 Análisis de la literatura especializada

En esta sección se pretende identificar las principales variables que se están abordando actualmente en las investigaciones de programación de operaciones en el sector agrícola, y de esta manera detectar algunos factores que no se hayan tenido en cuenta en el trabajo de campo y puedan ser de utilidad en la actual investigación. Para esto se tomarán los trabajos expuestos en la tabla 2, en la que se mostraron los artículos identificados como muy relevantes, sus autores y principales objetivos.

De la literatura identificada, se pudieron detectar las principales variables que utilizaron los autores en sus investigaciones. Dentro de estas variables se observan, por ejemplo, las que empleó Wijngaard (1988), quien tiene en cuenta el número de puestos de trabajo, los equipos, hombres disponibles y las propiedades de los materiales (estos últimos están relacionados con el clima), así como los costos de operación, ya que su objetivo principal es la reducción de estos. Por otro lado, están Corner y Foulds (2005), quienes tienen en cuenta la actividad de cada trabajador y cada máquina, en cada período de tiempo, con miras a minimizar la duración de la recolección de todo el bloque forestal.

De igual manera, autores como Ferrer et al. (2008) proponen como principales variables los costos operativos de la recolección de uva y la calidad de la fruta. Así mismo, autores como Arnaout y Maatouk (2010), quienes también trabajan en el cultivo de uva, incluyen variables muy similares a las mencionadas en los autores anteriores, solo que se enfocan en la asignación del mejor día para recolección, con el fin de minimizar los costos; no solo tienen en cuenta la calidad de la uva, sino también la calidad final del vino.

Por otro lado, existen autores que se enfocan en otros tipos de cultivo, como es la caña de azúcar, en donde incluyen dentro de las variables de la investigación la mano de obra, la maquinaria y las operaciones sobre el terreno, con el fin de modelar un flujo de trabajo óptimo (Guan et al., 2008). Ooster et al. (2013), realizan una investigación en la cual abordan las características del sistema de cultivo y la demanda de mano de obra, pero incluyen un factor importante en este sector, como es la incertidumbre.

Finalmente, se encontraron dos investigaciones que se enfocan y dan mayor relevancia al recurso humano. Ooster et al. (2015), se basan en la gestión de la mano de obra orientada a las habilidades de los trabajadores en un sistema de

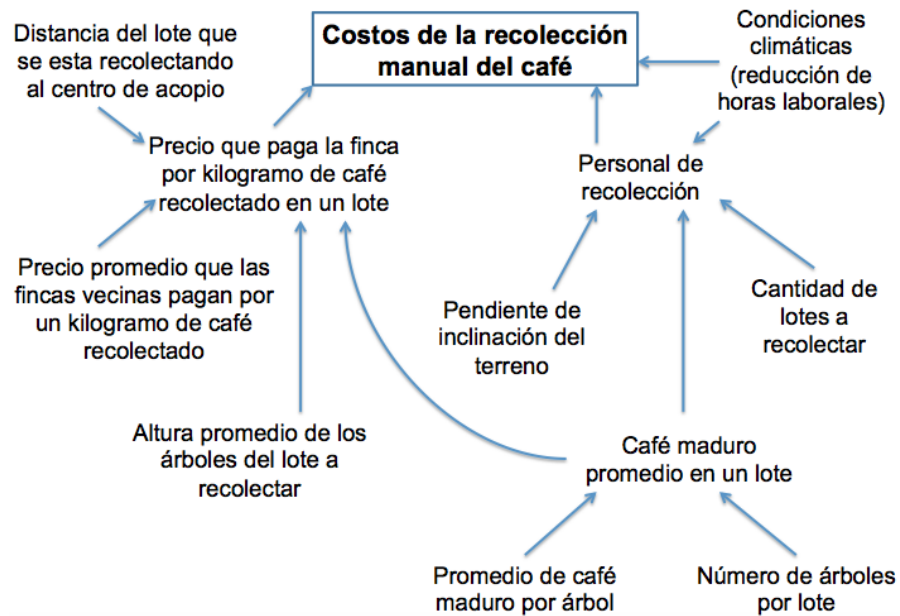
producción hortícola. Por su parte, Wishon et al. (2015) enfocan su investigación en determinar el número apropiado de trabajadores para plantación y cosecha, con el fin de adquirir la mano de obra necesaria con anterioridad.

De la literatura analizada, se concluye que la mano de obra, la maquinaria y las condiciones particulares de cada cultivo son las principales variables que están utilizando los investigadores en estudios enfocados a la programación de operaciones en los agroecosistemas. Así mismo, el clima es una variable que tienen en cuenta en los estudios, no con tanto peso, pero si la incluyen en varios artículos.

2.1.3 Selección de variables

En la presente sección se exponen las variables elegidas en la actual investigación. Con base en lo analizado en el trabajo de campo, la experiencia obtenida en este acercamiento y el análisis de la literatura especializada, se logra ajustar esta información para definir 12 variables que se plantean a partir del conocimiento del proceso y del sector (figura 10).

Figura 10. Gráfico de influencias de las variables seleccionadas.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 10, se eligen 12 variables para esta investigación. Dentro de estas se tienen 8 variables independientes: condiciones climáticas, cantidad de lotes a recolectar, número de árboles por lote, promedio de café maduro por árbol, altura promedio de los árboles del lote a recolectar, pendiente de inclinación del terreno, precio promedio que las fincas vecinas pagan por un

kilogramo de café recolectado y distancia del lote que se esta recolectando al centro de acopio. Así mismo, se detectan 4 variables dependientes: el personal de recolección, café maduro promedio en un lote, precio que paga la finca por kilogramo de café recolectado en un lote y los costos de la recolección manual de café.

A continuación se realizará una descripción detallada de cada variable seleccionada:

- Condiciones climáticas: Las condiciones climáticas se tendrán en cuenta solo desde la afectación que tiene el clima en la posibilidad de realizar las operaciones de recolección de café. Esta variable afecta directamente el rendimiento del personal y los costos de la recolección manual de café.
- Cantidad de lotes a recolectar: Esta variable es una de las primeras que se debe definir, ya que es la que indicará qué lotes están listos para recolectar y de esta manera obtener las características específicas de cada lote. Esta variable se definirá por medio de la observación, debido a que, al ver un lote con granos maduros listo para recolectar, entra como uno de los lotes óptimos en esta labor.
- Número de árboles por lote: En esta variable se especificará la cantidad de árboles que se deben recolectar en un lote. Esto se medirá por la densidad de siembra, que se calcula con el tamaño del lote y las distancias a las que se encuentran sembrados los árboles de café.
- Promedio de café maduro por árbol: A partir de esta variable, se podrá calcular la cantidad de café que está listo para recolectar en un lote. Esta variable se establecerá por medio del muestreo en campo, en donde se observará la cantidad de café que tienen los árboles de café en el lote a recolectar y se promediará.
- Pendiente de inclinación del terreno: Esta variables es relevante, ya que es la que más influye en el rendimiento de los trabajadores al momento de realizar la recolección del grano de café, por lo que se necesita definir a qué pendiente de inclinación se encuentra el lote a recolectar, para establecer la cantidad de trabajadores necesarios.
- Altura promedio de los árboles del lote a recolectar: Esta variable es importante, ya que de la altura de los árboles depende en gran medida el precio por kilogramo recolectado de café que se le

paga a los trabajadores. Esta variable se definirá con mediciones a un grupo de árboles en campo.

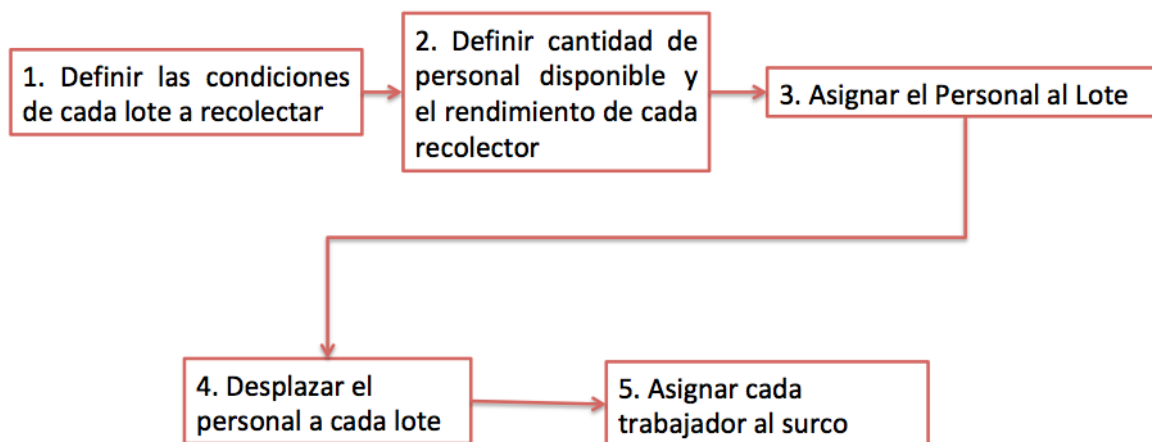
- Precio promedio que las fincas vecinas pagan por un kilogramo de café recolectado: Este valor será la base para fijar el precio por kilogramo de café recolectado en determinado lote.
- Distancia del lote que se está recolectando al centro de acopio: Después de 1.000 metros de distancia del lote al centro de acopio, se debe incrementar 100 pesos por kilogramo de café recolectado.
- Café maduro promedio en un lote: Esta variable se definirá multiplicando el número de árboles del lote a recolectar, por el promedio de café maduro por árbol; esto la hace una variable dependiente de estas dos variables mencionadas.
- Precio que paga la finca por kilogramo de café recolectado en un lote: Esta variable es dependiente del precio promedio que las fincas vecinas pagan por un kilogramo de café recolectado, de la altura promedio de los árboles del lote a recolectar, del café maduro promedio del lote y de la distancia del lote que se está recolectando al centro de acopio. Por otro lado, esta variable afecta directamente los costos de la recolección manual de café.
- Personal de recolección: Es una de las variables y recursos más importantes en este proceso, debido a que no solo dará la capacidad de producción, como se mencionó anteriormente, sino, que de acuerdo a las capacidades de cada persona varía el rendimiento en esta actividad. De aquí que, dependiendo de la cantidad de lotes a recolectar, el café maduro promedio del lote, la pendiente de inclinación del terreno y las condiciones climáticas, se determinará el rendimiento de cada recolector en cierto lote, con el fin de especificar la cantidad de personal que se necesita para realizar el proceso de recolección en una finca. Por otro lado, esta variable afecta directamente los costos de la recolección manual de café.
- Costos de la recolección manual de café: Esta variable se ve afectada directa e indirectamente por todas las otras variables especificadas. En consecuencia, esta variable no solo es la más importante en el proceso, sino que la reducción de esta será el objetivo principal de la presente investigación.

2.2 Etapa 2: Modelación de la herramienta para asignación de personal

2.2.1 Definición del proceso de asignación de personal

La definición del proceso de asignación de personal es una de las etapas principales en esta metodología, ya que entrega información para plantear la herramienta que sea de utilidad con el fin de asignar este recurso. Se plantea la figura 11, donde se puede observar el proceso paso a paso de la asignación de personal.

Figura 11. Proceso de asignación de personal.



Fuente: Elaboración propia.

Al observar en la figura 11 el proceso de asignación de personal esquematizado, es necesario describir detalladamente cada actividad, por lo que a continuación se hace referencia a esta información:

- Definir las condiciones de cada lote a recolectar: Cuando se habla de las condiciones del lote, se hace referencia a la pendiente de inclinación del terreno donde se encuentra el lote y a la cantidad de café maduro promedio del lote.
- Definir cantidad de personal disponible y el rendimiento de cada recolector: En este paso, lo que se realiza es la caracterización de todas las personas que se tengan disponibles al día lunes. En este punto, se tendrá en cuenta el rendimiento de cada trabajador.

- Asignar el personal al lote: En este punto, es donde se hará uso de la herramienta de programación para realizar la correcta asignación del personal.
- Desplazar el personal a cada lote: Una vez se tengan los resultados de la herramienta de programación, se darán las indicaciones a cada grupo de trabajadores para que se desplacen al lote correspondiente.
- Asignar cada trabajador al surco: Una vez los recolectores se encuentren en cada lote, la asignación de cada surco de café se realizará aleatoriamente, ya que las características de cada surco serán muy similares dentro del mismo lote.

2.2.2 Selección de la herramienta de programación

En este punto de la metodología, se utilizará el conocimiento de varios expertos en herramientas de programación, para tener el concepto de varias personas especializadas en estos temas. Por esto, se escogieron 7 profesores de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales y sede Medellín, y de la Universidad Tecnológica de Pereira. Para su elección se revisaron cuidadosamente hojas de vida de múltiples profesores de ambas universidades y se eligieron los más idóneos en el tema, según sus estudios y la experiencia en heurísticas (en el anexo 3, se encuentra la información detallada de cada profesor entrevistado).

A cada uno de los profesores elegidos se le realizó una entrevista, en donde primero se contextualizaba el trabajo, luego se explicaba detalladamente el problema, se continuaba explicando las variables involucradas en la tesis doctoral y se culminaba exponiendo los pasos generales de la metodología propuesta y en dónde aplicaba la herramienta de programación. De esta manera, cada experto dio el concepto de qué herramienta de programación podría ser la adecuada para este problema específico (en el anexo 3, se encuentran las respuestas detalladas de cada profesor entrevistado). Los resultados que se obtuvieron se pueden observar en el tabla 16:

Tabla 16. Profesores expertos en herramientas de programación y la herramienta sugerida para la actual investigación.

Profesor	Herramienta sugerida
Elkin Rodríguez Velásquez	Algoritmos genéticos, búsqueda tabú.
Jaime Antero Arango Marín	Algoritmo genético, en general, los algoritmos poblacionales o evolutivo.
Omar Danilo Castrillón Gómez	Algoritmo aleatorio, algoritmo genético.
Santiago Ruiz Herrera	Algoritmo genético, recocido simulado.
Jorge Iván Ríos Patiño	Algoritmo genético, búsqueda tabú, colonia de hormigas.
Antonio Hernando Escobar Zuluaga	Algoritmo genético de Chu – Beasley.
Luis Fernando Castillo Ossa	Programación dinámica, algoritmo genéticos, razonamientos basados en casos, técnicas de machine learning.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en los resultados de las 7 entrevistas realizadas, la herramienta más sugerida por todos los profesores, es el **algoritmo genético**. Gracias a este concepto de los expertos es que se elige como la herramienta a utilizar en esta investigación.

2.2.3 Modelación de la herramienta seleccionada

Una vez se opta por el algoritmo genético como herramienta de programación, se procede a escoger el que mejor aplique para el presente problema, de aquí que se elige un algoritmo genético multiobjetivo, por la cantidad de variables que se deben incluir en el actual trabajo. La diferencia con un algoritmo genético mono-objetivo está en que ya no se tiene solo una función por optimizar, sino que hay un grupo de funciones que deben ser optimizadas simultáneamente (Zitzler y Thiele, 1999), de esta manera:

$$\min/\max f_{\{m\}}(x) \quad m = 1, 2, \dots, M$$

s.a.

$$g_{\{i\}}(x) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, I$$

$$h_{\{k\}}(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, K$$

$$x_{\{j\}}^L \leq x_{\{j\}} \leq x_{\{j\}}^U \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (\text{Ec } 10)$$

Estas últimas serán el conjunto de restricciones, donde, $g_{\{i\}}(x)$, $h_{\{k\}}(x) = 0$, son diferentes reglas que debe satisfacer la solución encontrada.

$x_{\{j\}}^L \leq x_{\{j\}} \leq x_{\{j\}}^U$ $j = 1, 2, \dots, J$, es el rango donde se deben encontrar los diferentes J valores de la solución.

De esta forma, lo que se busca es encontrar un vector de variables de decisión $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_j)$ que cumpla con el conjunto de restricciones y donde las funciones objetivo sean optimizadas.

Un algoritmo genético multiobjetivo encontrará varias soluciones al problema planteado, formando un conjunto conocido como el frente óptimo de Pareto (Zitzler y Thiele, 1999). Este conjunto contiene todas aquellas soluciones que no pueden ser mejoradas en una de las funciones objetivo, sin afectar cualquier otra función objetivo.

Como se pudo observar en la descripción del algoritmo genético básico o mono-objetivo, la evaluación de un individuo está dada por la “función de evaluación”, ya que solo hay una función a optimizar. En este caso, dado que hay múltiples funciones a optimizar, no se puede tomar esta misma idea. Por lo anterior, se introduce el concepto de dominancia, que hará parte del proceso de clasificar las diferentes soluciones y de encontrar buenas alternativas teniendo en cuenta la presencia y la evaluación de los M objetivos del problema (Zitzler y Thiele, 1999).

Una solución x_1 domina a otra solución x_2 si se cumple alguna de las siguientes condiciones:

1. Si x_1 es factible y x_2 es infactible.
2. Si x_1 y x_2 son infactibles y x_1 tiene un valor de violación de restricciones menor.
3. Si x_1 y x_2 son factibles y x_1 domina a x_2 con el principio habitual de dominancia (Chankong y Haimes, 1983).

Los individuos que se encuentran en el frente óptimo de Pareto se consideran no dominados en todo el espacio de búsqueda.

El algoritmo genético multiobjetivo seleccionado ha sido el NSGA – III, ya que está diseñado para trabajar con la optimización de muchos objetivos al mismo tiempo (mayor a dos objetivos). Este algoritmo fue propuesto por Deb y Jain (2014), haciendo algunas modificaciones a los mecanismos de selección usados previamente por su predecesor, el algoritmo NSGA – II, el cual está diseñado para trabajar con un número de objetivos menor o igual a 2. El NSGA – III está compuesto por los siguientes pasos:

Algoritmo 1, NSGA – III

- 1: Calcular el número de puntos de referencia (H) a ubicar en el hiperplano.
- 2: Generar la población inicial de forma aleatoria, teniendo en cuenta las restricciones que haya dentro del problema.
- 3: Realizar el ordenado de la población no dominada
: for i = 1 a Criterio de parada hacer.
- 4: Seleccionar dos “padres” p’ y p” usando el método modificado de selección por torneo.
- 5: Aplicar la recombinación (*crossover*) entre p’ y p” con una probabilidad de cruce pr y realizar el proceso mutación a los individuos obtenidos.
- 6: Realizar el ordenado de la población no dominada.
- 7: Normalizar los miembros de la población.
- 8: Asociar cada miembro de la población con sus puntos de referencia.
Aplicar la preservación de contador de nicho.
:end for

En el siguiente link, se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo 1: <https://n9.cl/tza2>.

A continuación se describirá cada uno de estos pasos:

- El número de puntos de referencia puede ser tomado como una entrada más del problema, de la misma forma como se define el número de individuos o la cantidad de iteraciones. Sin embargo, en la implementación se trabajará con la propuesta de Deb y Jain (2014) y de Das y Dennis (1998), quienes definen el número de puntos de referencia de la siguiente forma:

$$H = \text{combinatoria}(M + p - 1 | p) \quad (\text{Ec 11})$$

Donde,

M = número de objetivos.

p = número de divisiones que se tendrán en cada una de las abscisas de los objetivos.

Por ejemplo: Para un número de M = 3 y p = 4, se tienen en total un número de 15 puntos de referencia. Cada punto de referencia será ubicado en el hyper – plano, de tal forma que cada solución encontrada esté asociada a un punto de referencia.

- La generación de la población inicial se hace de forma aleatoria, teniendo en cuenta las reglas del problema en cuestión y la codificación de los cromosomas.

- Este es uno de los puntos que cambian del NSGA-II al NSGA-III. Debido a que el método usado en el NSGA-II no es suficiente para algoritmos multiobjetivos (Deb y Jain, 2014), se optó por usar el concepto de dominancia, descrito previamente, para ubicar a cada uno de los individuos en los distintos frentes.
- El método de selección por torneo, usado por el algoritmo NSGA – III, cuenta con algunos cambios que se encargan de que los individuos factibles estén sobre los infactibles a la hora de ser seleccionados (Deb y Jain, 2014). Además, se tienen en cuenta soluciones con menor violación de regla sobre las de mayor violación. Con el fin de aplicar el método, se requiere elegir de forma aleatoria dos soluciones, p_1 y p_2 , pertenecientes a la población pt . Los siguientes son los pasos de la selección por torneo modificado, para elegir cada uno de los “padres” p' y p'' :

Algoritmo 2, Selección por torneo modificado

- 1 Si p_1 es factible y p_2 es infactible entonces
 $p' = p_1$
- 2 Si p_1 es infactible y p_2 es factible
 $p' = p_2$
- 3 Si p_1 es infactible y p_2 es infactible
- 4 Si la violación de regla de $p_1 >$ que la violación de regla de p_2
 $p' = p_2$
- 5 Si la violación de regla de $p_1 <$ que la violación de regla de p_2
 $p' = p_1$
- 6 en otro caso
 $p' =$ de forma aleatoria se elige entre p_1 y p_2
- 7 en otro caso
 $p' =$ de forma aleatoria se elige entre p_1 y p_2

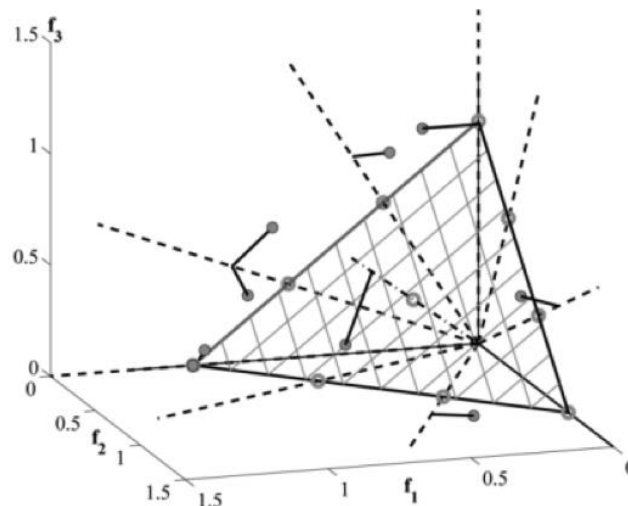
El diagrama de flujo para el algoritmo 2, se observa en el siguiente link: <https://n9.cl/j8w60>.

- Para el proceso de recombinación y mutación, se usan los operadores SBX y PM respectivamente, descritos en la definición de algoritmo genético.
- El mismo proceso del paso 3 (Dominancia).
- En este paso, se debe determinar el punto ideal de la población actual. Por cada una de las M funciones objetivo se debe identificar el mínimo valor ($f_{\{i\}}^{\text{(min)}}$, $i = 1, 2, \dots, M$). Entonces, cada función objetivo será movida sustrayendo $z_{\{i\}}^{\text{(min)}} =$

$(f_{\{1\}}^{\wedge(\min)}, f_{\{2\}}^{\wedge(\min)}, \dots, f_{\{M\}}^{\wedge(\min)})$ al objetivo $f_{\{i\}}$. El siguiente paso será generar un hiperplano descrito por Deb y Jain (2014).

- Para asociar cada miembro de la población con un punto de referencia se debe definir una línea de referencia para cada punto, esto se realiza uniendo el punto de referencia con el punto de origen. Entonces, se debe determinar la distancia perpendicular entre cada miembro de la población y cada línea de referencia. El punto de referencia que tenga la línea de referencia más cerca de un individuo es asociado a este miembro de la población (Figura 12).

Figura 12. Asociación de cada miembro de la población con los puntos de referencia en el hiperplano.



Fuente: Tomada de Deb y Jain (2014).

Cabe resaltar que un punto de referencia puede tener cero o más miembros de la población asociados a él.

2.2.3.1 Descripción del problema

El problema de asignación de personal de recolección de café a los lotes listos para recolectar se define de la siguiente manera (la arquitectura general, se puede observar en el siguiente link: <https://n9.cl/1810>):

Dado un conjunto de r recolectores de café $R = \{R_1, R_2, \dots, R_r\}$ y un conjunto de l lotes de café $L = \{L_1, L_2, \dots, L_l\}$, el objetivo será encontrar la cantidad de horas que cada uno de los recolectores dedique a la recolección de café en cada uno de los lotes.

Para un recolector j se tiene una cantidad de horas h_{ji} las cuales serán las que dedique este recolector j al lote i durante toda la semana. Normalmente, un recolector de café trabaja 45 horas por semana, como se mencionó en el marco normativo, sin embargo, con el fin de dar flexibilidad al algoritmo en esta regla, se optó por usar una desigualdad en lugar de una igualdad; se fijó con 5 horas menos, es decir 1 hora diaria, para que la asignación de personal oscile entre 8 y 9 horas diarias de labores de recolección; de esta manera, el total de horas trabajadas a la semana por cada recolector se encuentra entre 40 y 45 horas, es decir:

$$40 \leq \sum_{i=1}^l h_{ji} \leq 45 \quad (\text{Ec } 12)$$

Donde,

h_{ji} = cantidad de horas para un recolector j . Las cuales serán las que dedique este recolector j al lote i durante toda la semana.

Se conocen, además, el rendimiento de cada uno de los recolectores y la pendiente de inclinación de cada uno de los lotes, así como el efecto que tiene dicha pendiente en el rendimiento del recolector y la cantidad total de café maduro ($C_{\{m\}}$) a recolectar por cada uno de los lotes.

Adicionalmente, se asume que un recolector j dado, puede trabajar en cualquier lote, de modo que la asignación de recolectores para cada uno de los lotes puede ser cualquier subconjunto de R ; de esta manera, un recolector puede o no trabajar en un lote (no se requiere que cada recolector dedique una cantidad de horas mayor a cero en cada uno de los lotes).

Como se mencionó anteriormente, el problema a solucionar es multiobjetivo, ya que se requiere encontrar la asignación óptima de personal para una cantidad de lotes de café mayor a uno ($l > 1$), en donde la cantidad de objetivos estará dada por la cantidad de lotes a recolectar. Con el fin de encontrar la asignación óptima de los recolectores por cada uno de los lotes, se debe determinar un número de horas h_{ji} . Esta cantidad será el total de horas semanales que un recolector le dedique a un lote. Así mismo, se tiene un rendimiento p_{ji} , que se calcula tomando el rendimiento base del recolector j y modificándolo de acuerdo a la pendiente del lote i . De este modo, la cantidad de café recolectado para cierto lote i será:

$$C_r = \sum_{j=1}^r p_{ji} h_{ji} \quad (\text{Ec } 13)$$

Donde,

C_r = café recolectado.

h_{ji} = número totales de horas semanales que un recolector le dedique a un lote.

p_{ji} = rendimiento del recolector. Este se calcula tomando el rendimiento base del recolector j y modificándolo de acuerdo a la pendiente del lote i .

Continuando con la descripción del problema, se procederá a estructurar el algoritmo genético. En esta parte, se describirá con detalle el algoritmo genético empleado, con el fin de encontrar la asignación óptima de personal para la recolección semanal de lotes de café y la representación de los individuos, así como las operaciones y el proceso para hallar un conjunto de posibles soluciones al problema planteado. De conformidad con esto, se mostrará la codificación de cromosomas y la definición de funciones objetivo.

◦ **Codificación de cromosomas**

En el proceso de construcción del algoritmo genético, es fundamental utilizar una codificación de las soluciones que represente las características del problema y respete las restricciones. En este caso, la representación de un individuo o cromosoma de la población se hace mediante un arreglo unidimensional, donde el número de celdas que lo componen está dado por el producto del número de lotes a recolectar y el número de recolectores disponibles. El valor de cada una de las celdas del vector, según donde se encuentre, indicará las horas semanales que cierto recolector le debe dedicar a un lote. En la figura 13 se muestra la estructura del cromosoma, esta permite apreciar gráficamente la idea anterior, de modo que, el cromosoma será la última fila (horas). Los valores que pueden tomar dichas celdas deben estar entre 0 y 45, ya que como se dijo anteriormente, cada recolector puede dedicar semanalmente un número máximo de 45 horas a la recolección de los lotes de café.

Figura 13. Cromosoma propuesto para el presente problema.

Lote	1					2				
Recolector	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Horas	3	10	1	25	4	16	2	1	4	5

Lote	...					l				
Recolector	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Posición	11	12	13	14	15	$lj-4$	$lj-3$	$lj-2$	$lj-1$	lj
Horas	5	10	20	6	3	2	0	8	7	1

Fuente: Elaboración propia.

◦ **Definición de funciones objetivo**

La asignación óptima de horas de trabajo de los recolectores a los lotes de café será aquella que logre minimizar la diferencia entre el café maduro

disponible para recolectar y el café recolectado con dicha asignación. Esto es:

Para un lote i

$$\min(|C_{\{mi\}} - C_{\{rip_{\{n\}}\}}|) \quad (\text{Ec } 14)$$

Donde,

$C_{\{mi\}}$ = total de café maduro en el lote i .

$C_{\{rip_{\{n\}}\}}$ = total de café recolectado para el lote i en la asignación que representa el individuo $p_{\{n\}}$.

Así que, el número de objetivos estará dado por la cantidad de lotes a recolectar.

2.2.3.2 Programación de la herramienta

Con el fin de realizar el programa descrito anteriormente, se desarrolló un programa de escritorio y una aplicación web. En ambos, se usó el lenguaje de programación Python, mientras que para manejar la interfaz y captura de datos se usó el lenguaje de programación Javascript. En el algoritmo genético se usó la librería de python Platypus, la cual ofrece una implementación de distintos algoritmos genéticos multiobjetivos, entre ellos el elegido en esta investigación, el NSGA - III. A continuación se describirá con detalle cómo esta programada la herramienta seleccionada.

1. Datos de entrada

La herramienta toma como entrada los siguientes valores:

- Información de los lotes:
 - Cantidad de café maduro promedio en Kilogramos.
 - Pendiente de inclinación promedio del terreno, esta puede ser:
 - Mayor al 200 %
 - Entre el 101 % y el 200 %
 - Del 20 % al 100 %
- Información de cada uno de los recolectores de café:
 - Puede ser un grupo de recolectores o no; esta opción se dio para facilitar la entrada de grandes cantidades de datos. Cuando está habilitada, se debe ingresar la cantidad de recolectores que conforman el grupo y el programa tomará a cada recolector de forma independiente al momento de calcular la asignación óptima.

- Rendimiento de los recolectores, este puede ser:
 - Alto rendimiento
 - Medio rendimiento
 - Bajo rendimiento

Con base en el nivel de rendimiento en el que se encuentre cada uno de los recolectores, se debe obtener un rendimiento numérico (Kilogramos/hora). Para esto, se toma un valor aleatorio que pertenezca a los siguientes rangos:

- ✓ Alto rendimiento: 27,88 – 40 Kilogramos/hora
- ✓ Medio rendimiento: 11,22 – 27,77 Kilogramos/hora
- ✓ Bajo rendimiento: 3,33 – 11,11 Kilogramos/hora

Con esto, se da por terminada la captura de datos. En este momento, la herramienta informática ya tiene las características de cada uno de los lotes y recolectores, con lo que ya podrá proceder a la ejecución del algoritmo genético.

2. Generación de cromosomas

A continuación, se describirá la generación de cada uno de los cromosomas que formarán la población inicial y cómo se genera dicha población:

- **Generación de cromosoma:**

Para generar el cromosoma, se debe tener en cuenta la cantidad de lotes y la cantidad de recolectores a asignar.

Para cada I E Lotes

Para cada j E Recolectores

Generar un número aleatorio entre 0 y 40 el cual determina el número de horas que el recolector j le va a dedicar al lote I

Fin para cada

Fin para cada

De esta forma, se genera cada uno de los cromosomas, el cual representa una asignación del personal de recolectores a los lotes a recolectar.

- **Generación de la población inicial:**

Para generar la población inicial, se debe tener como entrada la cantidad de individuos que conformarán dicha población. El número de individuos se fijó a 100 por población.

```
población_inicial = []
Mientras longitud(poblacion) < tamaño_poblacion hacer
    Generar individuo y agregarlo a población_inicial
Fin Mientras
```

Después de la ejecución de este proceso, se obtiene una matriz de 100 filas y el número de columnas es el mismo que el número de columnas del cromosoma.

- **Proceso de calificación de un individuo:**

Este proceso se divide en dos partes: Evaluación de funciones objetivo y evaluación de reglas.

- ✓ **Evaluación de funciones objetivo:**

Para realizar este proceso se deben tener en cuenta los lotes, junto con sus atributos: el café maduro promedio y la pendiente de inclinación. Por otro lado, se requieren los recolectores con su respectivo rendimiento. El proceso se hará sobre el individuo que se quiera evaluar.

```
Para cada l E Lotes
    kgs_recolectados = 0
    Para cada r E Recolectores
        kgs_recolectados = kgs_recolectados +
            (rendimiento_recolector_r
            cantidad_de_horas_recolector_r_en_lote_l);
    Fin para cada
    valor_funcion_objetivo_para_lote_l = |
        cafe_maduro_promedio_en_lote_l - kgs_recolectados|
Fin para cada
```

De esta forma, se obtendrá un vector con el valor de cada una de las funciones objetivo. Existe una función por cada una de las funciones objetivo, por lo que se obtendrá un vector donde el número de columnas será igual al número de lotes a recolectar.

✓ Evaluación de reglas

El problema tiene como regla, que la sumatoria total de horas a la semana de un recolector dado debe estar entre 40 y 45, así que, el valor está entre cierto rango, se optó por tener una para el límite inferior y otra para el límite superior. De esta manera, se tendrán dos reglas por cada uno de los recolectores.

Para cada $r \in \text{Recolectores}$

 horas_recolector_r = 0

 Para cada $l \in \text{lotes}$

 horas_recolector_r = horas_recolector_r +
 horas_recolector_r_en_lote_l

 Fin para cada

 Si $40 \leq \text{horas_recolector_r}$ entonces

 violacion_regla_limite_inferior = 0

 Sino

 violacion_regla_limite_inferior = $|40 - \text{horas_recolector_r}|$

 Fin si

 Si $45 \geq \text{horas_recolector_r}$ entonces

 violacion_regla_limite_superior = 0

 Sino

 violacion_regla_limite_superior = $|45 - \text{horas_recolector_r}|$

 Fin si

Fin para cada

De esta forma, se calculan los valores de las funciones objetivo y de las reglas, para luego determinar la calidad de cada uno de los individuos en la población.

3. Dominancia de Pareto

Se toman como entrada dos individuos (individuo1 e individuo2) y se determinará basado en el concepto de dominancia definido previamente, entre esos dos individuos, quién domina a quién, usando las reglas y funciones objetivo de la siguiente forma:

Si violacion_de_reglas(individuo1) == 0 entonces

 devolver -1

Sino Si violacion_de_reglas(individuo2) == 0 entonces

 devolver 1

Sino Si violacion_de_reglas(individuo1) <
violacion_de_reglas(individuo2) entonces

 devolver -1

```

Sino      Si      violacion_de_reglas(individuo2)      <
violacion_de_reglas(individuo1) entonces
    devolver 1
domina_individuo_1 = falso
domina_individuo_2 = falso
Para cada l E Lotes
    valor_funcion_objetivo_individuo1_lote_l      =
    individuo_1.valor_funcion_objetivo_lote_l
    valor_funcion_objetivo_individuo2_lote_l      =
    individuo_2.valor_funcion_objetivo_lote_l

    Si      valor_funcion_objetivo_individuo1_lote_l<
    valor_funcion_objetivo_individuo2_lote_l
        domina_individuo_1 = verdadero
        Si domina_individuo_2 entonces
            devolver 0
    Fin Si
    SiNo Si      valor_funcion_objetivo_individuo1_lote_l>
    valor_funcion_objetivo_individuo2_lote_l entonces
        domina_individuo_2 = verdadero
        Si domina_individuo_1 entonces
            devolver 0
    Fin Si
FinSi

Fin Para
Si domina_individuo_1 == domina_individuo_2 entonces
    devolver 0
SiNo Si domina_individuo_1 entonces
    devolver -1
SiNo
    devolver 1
FinSi

```

Este algoritmo devolverá -1 si el individuo1 domina al individuo2, 1 en caso contrario y 0 si no se dominan entre ellos.

4. Selección de individuos

La selección de individuos se hace por medio del método de selección por torneo modificado, el cual, a grandes rasgos, se encuentra implementado de la siguiente forma:

```

individuo1 = elegir_cromosoma_de_la_poblacion_de_forma_aleatoria
individuo2 = elegir_cromosoma_de_la_poblacion_de_forma_aleatoria

```

```

Si dominancia_de_pareto(individuo1, individuo2) > 0 entonces

```

```

    devolver individuo2
    SiNo
    devolver individuo1
FinSi

```

El algoritmo anterior, tomará a la población actual y devolverá un individuo de dicha población.

5. Cruce (SBX)

Este algoritmo toma como entrada dos individuos (individuo1 e individuo2), una probabilidad de cruce ($P_{\{c\}}$) y un índice de distribución ($I_{\{d\}}$). Devolverá dos individuos “hijos” producto de usar el operador de cruce SBX sobre los dos individuos recibidos. Su implementación se divide en dos funciones. Una función se encarga de iterar en cada gen del cromosoma y determina si bajo cierta probabilidad debería hacer cruce o no. La otra función implementa el operador SBX, recibe como entrada el gen de cada uno de los individuos (x_1, x_2) que se quiera cruzar, el límite inferior que puede tomar cada gen (lb) y el límite superior que puede tomar cada gen (ub), esta función solo es llamada cuando en un gen actual, la probabilidad obtenida de forma aleatoria en el rango $[0.0, 1.0]$ sea menor que 0.5, la función devolverá un nuevo valor para el gen de cada individuo “hijo”.

```

Si probabilidad_aleatoria(0, 1) <= P_{c} entonces
    Para cada gen en cromosoma hacer
        Si probabilidad_aleatoria_entre(0, 1) <= 0.5 entonces
            valor_gen_1 = gen_individuo_1
            valor_gen_2 = gen_individuo_2
            lb = 0
            ub = 40

            valor_gen_1, valor_gen_2 = SBX(valor_gen_1,
            valor_gen_2, lb, ub)
            individuo_hijo_1_gen = valor_gen_1
            individuo_hijo_2_gen = valor_gen_2
        FinPara
    devolver individuo_hijo_1, individuo_hijo_2
Sino entonces
    devolver individuo_1, individuo_2
FinSi

```

Función SBX

$dx = x_2 - x_1$

Si $dx > \text{EPSILON}$ entonces

 Si $x_2 > x_1$ entonces

```

        y2 = x2
        y1 = x1
SiNo
    y2 = x1
    y1 = x2
Fin si

beta = 1 / (1 + (2 * (y1 - lb) / (y2 - y1)))
alpha = 2 - beta ^ (l_{d} + 1)
rand = numero_aleatorio(0, 1)

Si rand <= (1 / alpha) entonces
    alpha = alpha * rand
    betaq = alpha^(1/(l_{d} + 1))
SiNo
    alpha = alpha * rand
    alpha = 1 / (2 - alpha)
    betaq = alpha^(1/(l_{d} + 1))
FinSi

x1 = 0.5 * ((y1 + y2) - betaq * (y2 - y1))
beta = 1 / (1 + (2 * (ub - y2) / (y2 - y1)))
alpha = 2 - beta^(l_{d} + 1)
Si rand <= (1 / alpha) entonces
    alpha = alpha * rand
    betaq = alpha^(1/(l_{d} + 1))
SiNo
    alpha = alpha * rand
    alpha = 1 / (2 - alpha)
    betaq = alpha^(1/(l_{d} + 1))
FinSi

x2 = 0.5 * ((y1 + y2) + betaq * (y2 - y1))

if valor_booleano_aleatorio:
    x1, x2 = x2, x1

```

devolver x1, x2

El diagrama de flujo de este proceso se observa en el siguiente link:
<https://n9.cl/wfhpn>.

6. Mutación (PM)

La implementación de este proceso se divide en dos funciones. La primera función recibe un individuo (que se denomina “*individuo*”) y determina por cada uno de los genes que lo componen si debe ser

mutado o no. Este proceso necesita una probabilidad, designada $P_{\{m\}}$. La otra función, encargada de la mutación, necesita un valor gen (x) para mutar. El límite inferior que puede tomar cada gen es “lb”, de igual manera, el límite superior que puede tomar cada gen es “ub”. Finalmente el índice de distribución es $I_{\{d\}}$.

```

Para cada gen en cromosoma hacer
  Si numero_aleatorio(0, 1) <=  $P_{\{m\}}$  entonces
    gen_mutado_en_individuo = PM(gen, 0, 40)
  Fin Si
Fin Para

```

devolver individuo

Función PM

```

u = numero_aleatorio(0, 1)
dx = ub - lb

```

```

Si  $u < 0.5$  entonces
  bl =  $(x - lb) / dx$ 
  b =  $2 * u + (1 - 2 * u) * (1 - bl)^{(I_{\{d\}} + 1)}$ 
  delta =  $b^{1/(I_{\{d\}} + 1)} - 1$ 

```

```

SiNo
  bu =  $(ub - x) / dx$ 
  b =  $2 * (1 - u) + 2 * (u - 0.5) * (1 - bu)^{(I_{\{d\}} + 1)}$ 
  delta =  $1 - b^{1/(I_{\{d\}} + 1)}$ 
fin si

```

```

x = x + delta * dx

```

devolver x

El diagrama de flujo de este proceso se puede observar en el siguiente link: <https://n9.ci/6agrd>.

7. Elección del mejor individuo

Dado que el algoritmo NSGA – III devuelve un conjunto de soluciones y no una solución particular, se debe determinar la mejor solución del conjunto de soluciones devueltas, en este caso, de la población final obtenida. Se optó por primero determinar las soluciones factibles y luego elegir una de estas soluciones de forma completamente aleatoria. Para determinar si una solución es factible, se revisa si viola o no alguna de las reglas del problema.

```

soluciones_factibles = []
Para cada cromosoma E poblacion_final hacer
    Evalua reglas en cromosoma
    Si cromosoma no viola alguna regla entonces
        soluciones_factibles = soluciones_factibles + cromosoma
    FinSi
Fin para
solucion_elegida = toma solucion de forma aleatoria del conjunto de
soluciones_factibles

devolver solucion_elegida

```

Las funciones previamente definidas, participan en el siguiente proceso de iteración del algoritmo genético.

```

Generar población aleatoria P_{0}
Evaluar individuos de P_{0}
Para i = 1 hasta 10000 hacer
    Para j = 1 hasta 50 hacer
        Seleccionar usando el método de selección por torneo modificado
        Recombinación usando SBX
        Mutación de hijos obtenidos usando PM
        Insertar descendientes mutados en la nueva generación
    Fin para
FinPara
Elegir y devolver el mejor individuo de población final.

```

El proceso fue ejecutado bajo las siguientes condiciones: el número máximo de iteraciones igual a 10.000, el tamaño de la población igual a 100, la probabilidad de mutación $P_{\{m\}} = 1/(\text{número de lotes} * \text{número de recolectores})$, la probabilidad de cruce $P_{\{c\}} = 1$, el índice de distribución es $I_{\{d\}} = 15$, el límite inferior (lb) es igual a 0 y el límite superior (ub) es igual a 40.

Con el fin de dar más claridad en la codificación del problema, se plantea el siguiente ejemplo:

Se va a suponer que hay una finca cafetera que cuenta con 3 lotes para recolección y 3 recolectores de café para realizar este proceso. De esta manera el cromosoma de este ejemplo, se puede observar en la figura 14.

Figura 14. Cromosoma del ejemplo.

LOTE1			LOTE 2			LOTE 3		
Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
6	7	20	10	2	15	24	31	5

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en la figura 14, cada gen está representado por las horas que cada recolector le va a dedicar a cada lote.

Para desarrollar este ejemplo, se necesita el rendimiento de cada recolector (tabla 17), el café maduro en cada lote (tabla 18) y la penalidad en el rendimiento por la pendiente de inclinación de los lote (tabla 19).

Tabla 17. Rendimiento de cada recolector del ejemplo.

Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
30 kg/h	20 kg/h	10 kg/h

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Café maduro en cada lote del ejemplo.

Lote 1	Lote 2	Lote 3
780 kg	600 kg	1.400 kg

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Penalidad en el rendimiento por la pendiente de inclinación de los lotes del ejemplo.

Lote 1	Lote 2	Lote 3
3.4	0	-2.25

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, la evolución de la funciones objetivo son las siguientes:

Para el lote 1 (figura 15).

Figura 15. Cromosoma para desarrollar la función objetivo del lote 1.

LOTE1			LOTE 2			LOTE 3		
Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
6	7	20	10	2	15	24	31	5

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, la función objetivo del lote 1 será:

$$\text{kgs_recolectados_lote1} = 6 * (30 + 3.4) + 7 * (20 + 3.4) + 20 * (10 + 3.4) = 632.2 \text{ kg}$$

$$\text{valor_función_objetivo_lote_1} = |1780 - 632.2| = 1147.8 \text{ kg}$$

Para el lote 2 (figura 16).

Figura 16. Cromosoma para desarrollar la función objetivo del lote 2.

LOTE1			LOTE 2			LOTE 3		
Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
6	7	20	10	2	15	24	31	5

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, la función objetivo del lote 2 será:

$$\text{kgs_recolectados_lote2} = 10 * (30 + 0) + 2 * (20 + 0) + 15 * (10 + 0) = 490 \text{ kg}$$

$$\text{valor_función_objetivo_lote_2} = |1600 - 490| = 1110 \text{ kg}$$

Por último, para el lote 3 (figura 17).

Figura 17. Cromosoma para desarrollar la función objetivo del lote 3.

LOTE1			LOTE 2			LOTE 3		
Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
6	7	20	10	2	15	24	31	5

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, la función objetivo del lote 3 será:

$$\text{kgs_recolectados_lote3} = 24 * (30 - 2.25) + 31 * (20 - 2.25) + 5 * (10 - 2.25) = 1255 \text{ kg}$$

$$\text{valor_función_objetivo_lote_3} = |1400 - 1255| = 145 \text{ kg}$$

Así, se puede decir que el valor de las funciones objetivo del cromosoma son:

Lote 1: 147.8 kg
 Lote 2: 110 kg
 Lote 3: 145 kg

Una vez calculadas las funciones objetivo, se eligen dos padres (figura 18 y figura 19) de la población para realizar el proceso de cruce SBX.

Figura 18. Cromosoma 1 o padre 1.

LOTE1			LOTE 2			LOTE 3		
Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
6	7	20	10	2	15	24	31	5

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Cromosoma 2 o padre 2.

LOTE1			LOTE 2			LOTE 3		
Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
2	10	5	12	7	20	26	23	15

Fuente: Elaboración propia.

Con los padres seleccionados, se procede a realizar el proceso para obtener el primer gen de los cromosomas hijos, de la siguiente manera:

gen1 = 6
 gen2 = 2
 ub = 40
 lb = 0
 $I_{\{d\}} = 15$
 $dx = 6 - 2 = 4$
 $EPSILON = 2.220446049250313e-16$

Dado que $dx > EPSILON$ y $gen1 > gen2$ entonces:

$y2 = gen2$
 $y1 = gen1$
 $beta = -0.5$
 $alpha = 1.99$
 $rand = 0.95$

Dado que $rand > 1/alpha$

$\alpha = 1.99 * 0.95 = 1.89$
 $\alpha = 1 / (2 - 1.89) = 9.13$
 $\beta = 1.14$
 $\text{gen1} = 0.5 * ((8) - 1.14 * (-4)) = 6.28$
 $\beta = 1 / (1 + (2 * (38/-4))) = - 0.055$
 $\alpha = 2$

Dado que $\text{rand} > 1 / \alpha$
 $\alpha = 1.9$
 $\alpha = 1 / 0.1 = 10$
 $\beta = 1.15$
 $\text{gen2} = 6.3$
 intercambiar = falso

Finalmente, el primer gen de los cromosomas hijos serán 6.28 y 6.3.

Después de realizar el proceso anterior por cada uno de los 8 genes restantes, los hijos que se obtienen se observan en la figura 20 y 21.

Figura 20. Hijo 1 del proceso de cruce.

LOTE 1			LOTE 2			LOTE 3		
Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
6.28	8.23	7.6	8.7	7.56	10	25.5	24.21	22.4

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Hijo 2 del proceso de cruce.

LOTE 1			LOTE 2			LOTE 3		
Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
6.3	10.56	8.9	12.4	9	22	21.3	20.44	9.1

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se realizará un ejemplo de mutación aplicado al hijo 2 (figura 21), del proceso de cruce descrito anteriormente. De esta manera el proceso de mutación del primer gen, será:

$ub = 40$
 $lb = 0$
 $l_{\{d\}} = 20$
 $\text{gen} = 6.3$ u = numero_aleatorio(0, 1) = 0.33 $dx = ub - lb = 40$ Dado que $u < 0.5$ entonces:

$$bl = (6.3 - 0) / 40 = 0.15$$

$$b = 2 * 0.33 + (1 - 2 * 0.33) * (0.85 ** 21) = 0.67$$

$$\text{delta} = 1 - (0.67 ** 21) = 0.99$$

$$\text{gen} = 6.3 + 0.99 * 40 = 45.9$$

De modo que, el valor del primer gen de este cromosoma es 45.9, los otros genes no cambiaron, por lo que el cromosoma mutado puede observarse en la figura 22.

Figura 22. Cromosoma mutado.

LOTE1			LOTE 2			LOTE 3		
Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3	Recolector 1	Recolector 2	Recolector 3
45.9	10.56	8.9	12.4	9	22	21.3	20.44	9.1

Fuente: Elaboración propia.

El presente ejemplo desarrollado, se realizó a fin de mostrar cómo se evalúa y calcula las funciones objetivo y el funcionamiento de los operadores genéticos aplicados a la estructura del cromosoma propuesto.

El código fuente del algoritmo genético NSGA – III puede ser encontrado de forma más detallada en <https://github.com/Project-Platypus/Platypus/>. La aplicación web desarrollada para el problema descrito en la presente investigación, donde se tomó la implementación del NSGA - III del proyecto Platypus, se puede encontrar en <https://github.com/AR4Z/cafe-api>. El código fuente de la aplicación de escritorio se encuentra en el siguiente enlace <https://github.com/AR4Z/cafe-client>.

2.2.4 Validación de la herramienta seleccionada

Con el objetivo de validar el proceso que realiza la herramienta y los diferentes valores que toma el algoritmo genético en busca de una solución, y con el fin de verificar que no está incumpliendo ninguna regla y que los valores que arroja se ajustan a los objetivos, se ejecutó dos veces el aplicativo web con diferentes datos de entrada. La primera ejecución consistió en un caso con pocos datos de entrada, con miras a observar cómo se comportaba el algoritmo. El segundo fue más complejo, para analizar su compartamiento con muchos más datos. Los datos que se utilizaron fueron hipotéticos pero muy cercanos a los datos que se tenían de las fincas que se visitaron.

2.2.4.1 Primera ejecución

Se ingresaron los siguientes datos al aplicativo web (tabla 20, tabla 21, figura 23 y figura 24):

Tabla 20. Información de los lotes para la primera ejecución.

Lote	Cantidad de café maduro en kg	Pendiente de inclinación
1	5.200	101 % - 200 %
2	3.600	101 % - 200 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Información de los recolectores de café para la primera ejecución.

Grupo Recolectores	Rendimiento	Número de recolectores
Grupo 1	Alto	3
Grupo 2	Medio	10
Grupo 3	Bajo	3

Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Información de los lotes, ingresada en el formulario del aplicativo web.

Información de lotes

Kg de café
5200

Pendiente de inclinación

mayor al 200%

101% - 200%

20% - 100%

Kg de café
3600

Pendiente de inclinación

mayor al 200%

101% - 200%

20% - 100%

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Figura 24. Información de los recolectores de café, ingresada en el formulario del aplicativo web.

Información de recolectores

Número de recolectores

Rendimiento Alto rendimiento Medio rendimiento Bajo rendimiento

Grupo

Número de recolectores

Rendimiento Alto rendimiento Medio rendimiento Bajo rendimiento

Grupo ✖

Número de recolectores

Rendimiento Alto rendimiento Medio rendimiento Bajo rendimiento

Grupo ✖

AÑADIR RECOLECTOR +

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Una vez ingresada la información, se procedió a ejecutar el algoritmo genético hasta alcanzar la iteración número 10.000.

En la figura 25 se puede observar un individuo tomado de la población inicial, el cual, como se describió anteriormente, es generado de forma aleatoria.

Figura 25. Cromosoma tomado de la población inicial.

Lote 1															
r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10	r11	r12	r13	r14	r15	r16
32	36.7	33.9	34.1	21.4	36	14.8	8.66	32.1	38.1	23.8	30.7	33.1	26.7	9.79	27.3

Lote 2															
r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10	r11	r12	r13	r14	r15	r16
5.86	20.4	11.3	6.67	27.2	12	34.4	6.26	23.8	2.02	6.86	17.5	12.8	37	1.23	10.4

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

El cromosoma de la figura 25 muestra que cada una de las horas asignadas de cada recolector a cada lote se encuentra dentro del rango [0, 40]. Por ejemplo, el recolector 11 al lote 1 le va a dedicar 23,8 horas. El cromosoma mostrado, no es una buena solución al problema, ya que la suma de horas de algunos de los

recolectores, como por ejemplo, el recolector 9, sobrepasa el límite de 40 horas, que son las permitidas para que un recolector trabaje a la semana. En este caso, el recolector 9, según este cromosoma, trabajaría 55,9 horas (el resultado de sumar las horas que le dedicaría al lote 1 y al lote 2). En el proceso evolutivo que ejecuta el algoritmo genético, irá eliminando soluciones como estas.

Luego de 10.000 iteraciones se encuentra un conjunto de posibles soluciones al problema. Como ya se describió anteriormente, se toma un cromosoma de forma aleatoria de dicho conjunto, el cual será presentado al usuario en el aplicativo web. Allí se mostrará uno a uno cada recolector y cada lote, con el número de horas asignadas. El cromosoma solución se muestra en la figura 26.

Figura 26. Cromosoma elegido como solución.

Lote 1															
r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10	r11	r12	r13	r14	r15	r16
23	38	3	39	9	17	6	16	36	21	7	9	0	32	15	21

Lote 2															
r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r9	r10	r11	r12	r13	r14	r15	r16
17	1	36	0	30	22	33	23	3	18	32	30	39	7	24	18

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

En la Figura 26, se observa el cromosoma elegido como solución al problema planteado. Cabe resaltar cómo la solución encontrada no viola ninguna regla, ya que el total de horas asignadas a cada uno de los recolectores se encuentra en el intervalo [40, 45]. La solución es presentada al usuario como se muestra en la Figura 27.

Figura 27. Asignación de personal encontrada por el algoritmo y mostrada en el aplicativo web.

Recolector / Lotes	Lote 1	Lote 2
Recolector 1	23 horas (709.78 Kgs)	17 horas (524.62 Kgs)
Recolector 2	38 horas (1186.74 Kgs)	1 horas (31.23 Kgs)
Recolector 3	3 horas (87.63 Kgs)	36 horas (1051.56 Kgs)
Recolector 4	39 horas (950.04 Kgs)	0 horas (0 Kgs)
Recolector 5	9 horas (217.98 Kgs)	30 horas (726.5999999999999 Kgs)
Recolector 6	17 horas (350.88 Kgs)	22 horas (454.08000000000004 Kgs)
Recolector 7	6 horas (116.22 Kgs)	33 horas (639.21 Kgs)
Recolector 8	16 horas (313.92 Kgs)	23 horas (451.26000000000005 Kgs)
Recolector 9	36 horas (505.43999999999994 Kgs)	3 horas (42.12 Kgs)
Recolector 10	21 horas (512.61 Kgs)	18 horas (439.38 Kgs)
Recolector 11	7 horas (121.73 Kgs)	32 horas (556.48 Kgs)
Recolector 12	9 horas (221.85 Kgs)	30 horas (739.5 Kgs)
Recolector 13	0 horas (0 Kgs)	39 horas (1017.51 Kgs)
Recolector 14	32 horas (134.72 Kgs)	7 horas (29.47 Kgs)
Recolector 15	15 horas (52.35 Kgs)	24 horas (83.76 Kgs)
Recolector 16	21 horas (210.83999999999997 Kgs)	18 horas (180.71999999999997 Kgs)

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

En la figura 27 se pueden observar las horas y los kilogramos de café recolectado de cada trabajador en cada uno de los lotes. A pesar de que la información, como se muestra en la figura 24, fue ingresada por grupos de recolectores al programa, internamente, toma a cada integrante de ese grupo como un recolector individual.

2.2.4.2 Segunda ejecución

Se ingresaron los siguientes datos al aplicativo web (tabla 22, tabla 23, figura 28 y figura 29):

Tabla 22. Información de los lotes para la segunda ejecución.

Lote	Cantidad de café maduro en kg	Pendiente de inclinación
1	4.000	101 % - 200 %
2	7.000	Mayor al 200 %
3	3.000	20 % - 100 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Información de los recolectores de café para la segunda ejecución.

Grupo recolectores	Rendimiento	Número de recolectores
Grupo 1	Medio	20
Grupo 2	Bajo	2
Grupo 3	Alto	4

Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Información de los lotes, ingresada en el formulario del aplicativo web.

Información de lotes

Kg de café
4000

Pendiente de inclinación

mayor al 200%

101% - 200%

20% - 100%


Kg de café
7000

Pendiente de inclinación

mayor al 200%

101% - 200%

20% - 100%




Kg de café
3000

Pendiente de inclinación

mayor al 200%

101% - 200%

20% - 100%



AÑADIR LOTE +

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Figura 29. Información de los recolectores de café, ingresada en el formulario del aplicativo web.

The screenshot shows a web form titled "Información de recolectores" with three entries. Each entry includes a field for the number of harvesters, a radio button selection for yield level (Alto, Medio, Bajo), a toggle for "Grupo", and a red delete button. At the bottom, there is an orange button labeled "AÑADIR RECOLECTOR +" with a plus sign.

Número de recolectores	Rendimiento	Grupo	Acción
20	<input type="radio"/> Alto rendimiento <input checked="" type="radio"/> Medio rendimiento <input type="radio"/> Bajo rendimiento	<input checked="" type="checkbox"/> Grupo	
2	<input type="radio"/> Alto rendimiento <input type="radio"/> Medio rendimiento <input checked="" type="radio"/> Bajo rendimiento	<input checked="" type="checkbox"/> Grupo	<input type="button" value="Eliminar"/>
4	<input checked="" type="radio"/> Alto rendimiento <input type="radio"/> Medio rendimiento <input type="radio"/> Bajo rendimiento	<input checked="" type="checkbox"/> Grupo	<input type="button" value="Eliminar"/>

AÑADIR RECOLECTOR +

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

En esta ejecución, los cromosomas no serán mostrados, ya que su estructura es muy grande debido a la gran cantidad de recolectores y lotes que fueron ingresados (el cromosoma se constituye como en el primer ejemplo). De la misma forma que en la primera ejecución, los cromosomas son generados teniendo en cuenta el intervalo donde se debe encontrar el valor de cada uno de sus genes, es decir, el intervalo $[0, 40]$. De la población inicial, normalmente, los cromosomas no cumplen las reglas bajo las cuales se encuentra el problema, debido a que son generados de forma aleatoria. Después de 10.000 iteraciones, el cromosoma que se obtuvo como solución satisface las reglas y es mostrado al usuario (figura 30).

Figura 30. Asignación de personal encontrada por el algoritmo y mostrada al usuario.

Recolector / Lotes	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Recolector 1	0 horas (0 Kgs)	35 horas (694.4 Kgs)	4 horas (79.36 Kgs)
Recolector 2	0 horas (0 Kgs)	10 horas (119 Kgs)	28 horas (333.2 Kgs)
Recolector 3	20 horas (434.6 Kgs)	0 horas (0 Kgs)	18 horas (391.14 Kgs)
Recolector 4	2 horas (42.66 Kgs)	26 horas (554.5799999999999 Kgs)	11 horas (234.63 Kgs)
Recolector 5	19 horas (495.71 Kgs)	5 horas (130.45 Kgs)	16 horas (417.44 Kgs)
Recolector 6	35 horas (927.15 Kgs)	0 horas (0 Kgs)	3 horas (79.47 Kgs)
Recolector 7	5 horas (108.4 Kgs)	34 horas (737.12 Kgs)	0 horas (0 Kgs)
Recolector 8	25 horas (344.5 Kgs)	11 horas (151.57999999999998 Kgs)	4 horas (55.12 Kgs)
Recolector 9	19 horas (418.19000000000005 Kgs)	19 horas (418.19000000000005 Kgs)	1 horas (22.01 Kgs)
Recolector 10	23 horas (403.19000000000005 Kgs)	16 horas (280.48 Kgs)	0 horas (0 Kgs)
Recolector 11	0 horas (0 Kgs)	20 horas (285.2 Kgs)	19 horas (270.94 Kgs)
Recolector 12	13 horas (284.44 Kgs)	18 horas (393.84 Kgs)	8 horas (175.04 Kgs)
Recolector 13	20 horas (483 Kgs)	7 horas (169.04999999999998 Kgs)	11 horas (265.65 Kgs)

Recolector 14	17 horas (220.83 Kgs)	12 horas (155.88 Kgs)	9 horas (116.91 Kgs)
Recolector 15	11 horas (247.61 Kgs)	7 horas (157.57000000000002 Kgs)	21 horas (472.71000000000004 Kgs)
Recolector 16	5 horas (124.25 Kgs)	16 horas (397.6 Kgs)	18 horas (447.3 Kgs)
Recolector 17	6 horas (95.46000000000001 Kgs)	31 horas (493.21 Kgs)	1 horas (15.91 Kgs)
Recolector 18	6 horas (136.62 Kgs)	8 horas (182.16 Kgs)	25 horas (569.25 Kgs)
Recolector 19	10 horas (182.8 Kgs)	20 horas (365.6 Kgs)	9 horas (164.52 Kgs)
Recolector 20	5 horas (113.94999999999999 Kgs)	9 horas (205.10999999999999 Kgs)	25 horas (569.75 Kgs)
Recolector 21	18 horas (163.08 Kgs)	8 horas (72.48 Kgs)	14 horas (126.84 Kgs)
Recolector 22	16 horas (116.16 Kgs)	9 horas (65.34 Kgs)	15 horas (108.89999999999999 Kgs)
Recolector 23	7 horas (202.79 Kgs)	16 horas (463.52 Kgs)	16 horas (463.52 Kgs)
Recolector 24	14 horas (417.06 Kgs)	6 horas (178.74 Kgs)	19 horas (566.01 Kgs)
Recolector 25	3 horas (87.9 Kgs)	11 horas (322.3 Kgs)	25 horas (732.5 Kgs)
Recolector 26	14 horas (454.44 Kgs)	14 horas (454.44 Kgs)	11 horas (357.06 Kgs)

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

En la Figura 30 se muestra la solución encontrada para este ejemplo. Cabe resaltar que en esta solución hay recolectores que tienen asignadas 0 horas a determinados lotes, es decir, estos trabajadores no recolectarán en ese lote, sino en los demás. Por ejemplo, el recolector 1 trabajará en el lote 2 y 3, pero no en el 1; esto no es causal de infringir alguna de las reglas, ya que como se dijo en la definición del problema, un recolector puede dedicar como mínimo 0 horas a un lote y como máximo 45 horas.

Las soluciones encontradas por medio del proceso evolutivo en ambas ejecuciones satisfacen las reglas. Aquí se pudo observar como desde una población de individuos totalmente infactibles (figura 25), el algoritmo permite llegar a soluciones factibles.

2.3 Etapa 3: Definición de la metodología para la programación de la recolección manual de café en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %

De acuerdo a todo lo analizado y definido anteriormente, se realiza la propuesta metodológica, observada en la figura 31:

Figura 31. Propuesta metodológica para la programación de la recolección manual de café, en pendiente superior al 20 %.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.1 Pronóstico inicial

La metodología propuesta para la programación de la recolección manual de café con pendiente superior al 20 % inicia con un pronóstico inicial de producción. Este pronóstico se realiza de una manera cualitativa, en donde el encargado de la finca se acerca a los lotes que florecen, por medio de la observación evalúa la floración de los árboles de café y cataloga la floración como muy buena, buena, regular y mala. Con la información obtenida de este primer registro se tiene el pronóstico inicial de producción, el cual consiste en calcular la cantidad de café que podrá recogerse por lote al cabo de 32 semanas (32 semanas es el tiempo que toma de la floración a la recolección del grano de café maduro). Este proceso es fácil de implementar en las fincas cafetera de Colombia, ya que como se observó en campo, el 66,67 % de las fincas entrevistadas ya realizan este proceso.

2.3.2 Ajuste de pronóstico

Una vez se tiene el pronóstico inicial, es necesario ajustarlo lo más cerca posible a la recolección del grano de café. Por esto, se plantea que una semana antes de la recolección de cada lote se efectúe este ajuste al pronóstico, el cual consiste en realizar un muestreo al lote que se va a recolectar. Este muestreo se realizará con el mismo procedimiento que se utiliza para determinar la infestación de broca en un lote, que consiste en que por cada hectárea, al azar, se localizan 30 sitios para tomar la muestra y se recorre el lote siguiendo un patrón en “zig-zag”, en “cruz” o “W”, tratando de cubrir toda el área, posterior a esto se escoge de cada sitio elegido un árbol, y de este árbol se escoge una rama productiva para hacer el registro (FNC, 1993). Siguiendo este mismo procedimiento, se realizará el muestreo propuesto, en donde se escogerán 30 árboles por hectáreas siguiendo los patrones sugeridos, se recolectará el café maduro de los árboles seleccionados, se pesará este café recolectado, posteriormente se dividirá entre el número de árboles que se seleccionaron, y de esta manera obtener el promedio de café maduro por árbol en un lote. Consecutivamente se multiplicará este valor por la cantidad de árboles en el lote (ecuación 15). De esta manera, se tendrá lo más ajustado posible la cantidad de café maduro por lote a recolectar.

$$\text{Cantidad de café a recolectar en un lote} \\ = \text{Promedio de café maduro en un árbol} \times \text{Número de árboles en el lote} \\ \text{(Ec 15)}$$

2.3.3 Programa maestro

Una vez se tienen como insumo los pronósticos de producción ajustados, se procede a realizar el programa maestro de producción. Este programa maestro de producción se realiza la semana antes de realizar la recolección, en donde según el proceso ya descrito, se define la cantidad de personas necesarias para recolectar el café pronosticado y el precio por kilogramo de café recolectado en cada lote.

2.3.3.1 Cantidad de personal necesario por lote

Con el fin de definir la cantidad de personal necesario para realizar la recolección del café maduro en una finca, teniendo en cuenta las siguientes variables:

- Cantidad de lotes a recolectar: se definirán la cantidad de lotes que se deben recolectar de acuerdo a la maduración de los granos de café.
- Café maduro promedio en el lote: se debe precisar la cantidad de café listo para recolección que hay en los lotes. Esto se sabrá con los ajustes de los pronósticos de producción realizados en el segundo paso de la metodología.
- Pendiente de inclinación promedio del lote a recolectar: de acuerdo a la pendiente de inclinación promedio del lote, el rendimiento de los recolectores varía de esta manera: al pasar de una pendiente entre el 101 % y el 200 % a mayor del 200 %, el rendimiento se disminuye en 2,25 Kg/hora; y al pasar de una pendiente entre el 101 % y 200 % al 20 % y 100 %, el rendimiento se incrementa en 3,4 Kg/hora (esto se pudo observar en el trabajo de campo realizado).
- Condiciones climáticas: se tendrá en cuenta para la disminución de horas laborales, cuando haya época de invierno y no sea posible realizar la jornada laboral ordinaria.
- Personal de recolección: se definirá la cantidad ideal de trabajadores para la recolección del café, con un rendimiento promedio de los trabajadores (13,67 kilogramos/hora - Esta será la variable dependiente).

Con el fin de definir la cantidad de personal óptimo para realizar la recolección del café maduro en una semana (5 días) en una finca cafetera, se toma como entrada por cada lote, lo siguiente:

$C_{\{m\}}$ Café maduro promedio en el lote.

$P_{\{i\}}$ Pendiente de inclinación promedio del lote, esta puede ser:

- ✓ Mayor al 200 %
- ✓ Entre el 101 % y el 200 %
- ✓ Entre 20 % al 100 %

Así mismo, se calcula por cada lote con base en $P_{\{i\}}$ el efecto $E_{\{r\}}$ que tendrá la pendiente de inclinación del terreno, en el rendimiento de los recolectores (tabla 24).

Tabla 24. Efecto $E_{\{r\}}$ que tendrá la pendiente de inclinación del terreno, en el rendimiento de los recolectores.

Pendiente	Efecto $E_{\{r\}}$
Mayor al 200 %	-2,25
Entre 101 % y el 200 %	0
Entre el 20 % al 100 %	3,4

Fuente: Elaboración propia.

Además, se toma como entrada el porcentaje $P_{\{c\}}$ de disminución de horas laborales de acuerdo al clima.

De esta manera, el número de recolectores, está dado por:

$$R = \text{sum}\left(\frac{C_{mj}}{13.67 + E_{\{rj\}}}\right) / (40 * (1 - \frac{P_{\{c\}}}{100})) \quad (\text{Ec } 16)$$

Donde,

R = número de recolectores.

C_{mj} = café maduro promedio para el lote j dado.

$E_{\{rj\}}$ = efecto que tiene la pendiente en el rendimiento de los recolectores.

$P_{\{c\}}$ = disminución de horas laborales por el estado del clima.

Para hacer este cálculo, se desarrolló una aplicación tanto web como de escritorio, usando el lenguaje de programación Javascript. Mediante un formulario se toma la información de los lotes a recolectar y con estos datos se calcula la cantidad de recolectores, usando la formula anterior (Ec 16).

El código fuente de la herramienta web para calcular la cantidad de personal necesario en un lote, puede ser encontrado en el siguiente enlace: <https://github.com/AR4Z/cafe-ui/blob/master/src/views/StaffCalculate.vue>. El código de la aplicación de escritorio para el sistema operativo Windows se puede encontrar en: <https://github.com/AR4Z/cafe-client/blob/master/vue/src/views/StaffCalculate.vue>.

La herramienta web para realizar el cálculo de la cantidad de personal, puede ser encontrada en el siguiente enlace: <http://coffee-unal.herokuapp.com/staffcalculate>.

2.3.3.2 Precio del kilogramo de café recolectado en cada lote

El propósito del presente apartado es definir el precio correcto que se debe pagar por un kilogramo de café recolectado en determinado lote. Para esto, se tienen en cuenta las siguientes variables:

1. Altura promedio de los árboles del lote a recolectar: en una altura superior a 1,70 metros, se debe pagar un 10 % más el kilogramo de café recolectado.
2. Cantidad de café maduro en un lote: entre menos café haya en los árboles en el lote a recolectar, más se debe pagar el kilogramo de café recolectado. De esta manera:
 - Bueno: el kilogramo de café recolectado se paga en el precio del piso.
 - Regular: el kilogramo de café recolectado se paga en el precio del piso más entre un 10 % a un 20 % de incremento.
 - Malo: el kilogramo de café recolectado se paga en el precio del piso más entre un 40 % a un 50 % de incremento.
 - Muy malo: el kilogramo de café recolectado se paga en el precio del piso más entre un 60 % a un 120 % de incremento.
3. Distancia entre el lote y el centro de acopio: cuando el lote se encuentra a una distancia superior a 1.000 metros del centro de acopio, el valor se incrementa en 100 pesos por kilogramo recolectado.
4. Precio promedio que las fincas vecinas pagan por un kilogramo de café recolectado: este valor se tomará del precio promedio general que las fincas vecinas están pagando por un kilogramo de café recolectado.

5. Precio piso: es por el mínimo valor (precio del kilogramo de café maduro recolectado) que un recolector trabaja. Este monto servirá como restricción, ya que no será posible fijar un precio por debajo de este.
6. Precio que paga la finca por kilogramo de café recolectado en un lote: esta variable será la dependiente de las variables anteriores, en donde se definirá el precio que se pagará en cada lote de acuerdo a las características que se tengan.

De acuerdo a esto, para calcular el precio del kilogramo de café recolectado por cada uno de los lotes, se debe tomar por cada lote:

$A_{\{m\}}$ = altura promedio en metros de los árboles en el lote.

$C_{\{m\}}$ = cantidad de café maduro en el lote, ésta puede ser:

- Buena: El kilogramo de café recolectado se paga en el precio del piso.
- Regular: El kilogramo de café recolectado se paga en el precio del piso más entre un 10 % a un 20 % de incremento.
- Mala: El kilogramo de café recolectado, se paga en el precio del piso más entre un 40 % a un 50 % de incremento.
- Muy mala: El kilogramo de café recolectado, se paga en el precio del piso más entre un 60 % a un 120 % de incremento.

$D_{\{m\}}$: ¿La distancia del lote al centro de acopio es mayor a 1.000 metros? Si la respuesta es afirmativa, se hará un incremento de 100 pesos en el precio, en caso contrario, no se hará incremento.

P_p = precio promedio que las fincas vecinas pagan por un kilogramo de café maduro recolectado.

Piso = el mínimo valor del kilogramo de café recolectado por el que un recolector trabaja.

Dada la cantidad de café maduro promedio en el lote $C_{\{m\}}$, se determinará un incremento en el precio ($I_{c_{\{m\}}}$), usando la siguiente tabla (tabla 25):

Tabla 25. Cantidad de café maduro promedio en el lote, y el porcentaje de incremento en el precio.

Cantidad de café maduro	Rango porcentaje de incremento
Buena	0
Regular	10 % - 20 %
Malo	40 % - 50 %
Muy malo	60 % - 120 %

Fuente: Elaboración propia.

Se calculará el precio mínimo y máximo por cada lote, tomando la cota inferior y la cota superior.

Dependiendo de la altura de los árboles del lote, se determinará un incremento en el precio. Si la altura es mayor a 1,70 metros, se incrementará un 10 % del precio, en otro caso, el incremento para dicho lote será 0.

$$Ia_{\{m\}} = Pp * (10/100) \quad (\text{Ec } 17)$$

Donde,

$Ia_{\{m\}}$ = incremento en el precio del café para el lote m.

Pp = precio promedio que las fincas vecinas pagan por un kilogramo de café maduro recolectado.

Con estos datos y la siguiente formula (Ec 18), se calcula el precio de un kilogramo de café recolectado por cada lote.

$$P_{\{m\}} = Pp + Ia_{\{m\}} + Ic_{\{m\}} + D_{\{m\}} \quad (\text{Ec } 18)$$

Donde,

$P_{\{m\}}$ = precio final del kilogramo de café recolectado para el lote m.

Pp = precio promedio que las fincas vecinas pagan por un kilogramo de café maduro recolectado.

$Ia_{\{m\}}$ = incremento en el precio del kilogramo de café recolectado, por la altura de los árboles para el lote m.

$Ic_{\{m\}}$ = incremento en el precio del kilogramo de café recolectado, por la cantidad de café maduro en el lote m.

$D_{\{m\}}$ = incremento en el precio del kilogramo de café recolectado, por la distancia del lote m al centro de acopio.

Para hacer este cálculo, se desarrolló una aplicación tanto web como de escritorio, usando el lenguaje de programación Javascript. Mediante un formulario, se toma la información especificada anteriormente y, con estos datos, devolverá un

precio máximo y mínimo por cada uno de los lotes, usando la formula anterior (Ec 18).

Después de ser calculado el precio mínimo y máximo por cada lote, se le presenta al usuario la opción de ingresar la cantidad de café maduro por cada uno de los lotes, con el fin de calcular el valor total mínimo y máximo que podría costar la recolección.

Cálculo del valor total mínimo y máximo:

$$V_{\{t\}} = P_{\{m\}} * C_{\{m\}} \quad (\text{Ec 19})$$

Donde,

$V_{\{t\}}$ = valor total.

$P_{\{m\}}$ = precio mínimo o máximo de kilogramo de café recolectado.

$C_{\{m\}}$ = cantidad de kilogramos de café maduro promedio disponible en el lote.

El código fuente de la herramienta web para calcular el precio por kilogramo recolectado en un lote, puede ser encontrado en el siguiente enlace: <https://github.com/AR4Z/cafe-client/blob/master/vue/src/views/PriceCalculate.vue>. El código de la aplicación de escritorio para el sistema operativo Windows se puede encontrar en: <https://github.com/AR4Z/cafe-client/blob/master/vue/src/views/PriceCalculate.vue>.

La herramienta web para realizar el cálculo del precio del kilogramo de café recolectado en cierto lote puede ser encontrada en el siguiente enlace: <http://coffee-unal.herokuapp.com/pricecalculate>.

2.3.4 Asignación de personal

Una vez definida la cantidad de personal necesario para recolectar cada lote y el precio del kilogramo de café recolectado por lote, se procede a buscar las personas necesarias para realizar esta labor. Como se pudo observar en el trabajo de campo, una de las principales problemáticas es la escasez de recolectores de café, por esto se debe realizar la asignación del personal una vez se tengan disponibles las personas en la finca, con el fin de ajustar a la realidad el proceso.

Al día lunes de cada semana, ya se sabe con qué personal se cuenta para realizar la recolección de café maduro de esa semana, en ese momento es donde se hace uso de la herramienta de asignación de personal, descrita anteriormente en el capítulo de “*modelación de la herramienta seleccionada*”.

La aplicación web para la asignación de personal se encuentra en: <http://coffee-unal.herokuapp.com/assignment>.

Por último, el instalador de la aplicación de escritorio para el sistema operativo Windows se puede encontrar en: <https://mega.nz/#!M8oRUArY!hqjyecCDCuL8Hd6Vtbxe2JAaTivS-U6Wjj2dp2YKJnk> (este instalador contiene tanto el botón para realizar la asignación de personal, como los del programa maestro).

2.3.5 Ejemplo de aplicación de la metodología propuesta

Con el fin de ilustrar mejor cómo se aplica la metodología planteada, a continuación se realizará un caso hipotético, en el cual se podrá observar cómo y cuándo se emplea el aplicativo web desarrollado.

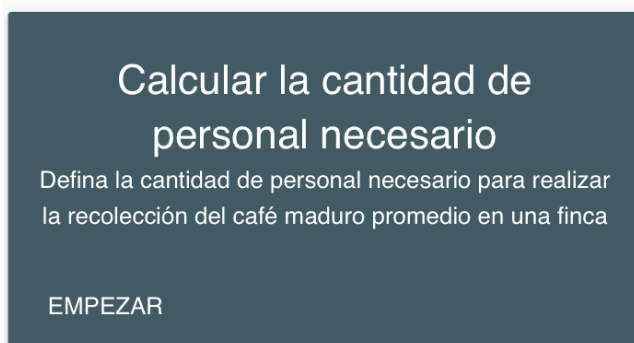
A fin de esto, se va suponer una finca cafetera compuesta por 2 lotes en producción, los cuales después de realizar el paso uno y dos de la presente metodología, se sabe que cuentan con la siguiente cantidad de café listo para recolección:

Lote 1: 2.500 kg

Lote 2: 3.500 kg

Para efectos del presente ejemplo, se considera que el café maduro de estos dos lotes debe ser recolectado en su totalidad. De esta manera, para iniciar, se hará uso del primer botón del aplicativo web, llamado “*Calcular la cantidad de personal necesario*” (figura 32).

Figura 32. Botón para calcular la cantidad de personal necesario en el aplicativo web.



Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Con el fin de calcular la cantidad de personal necesario para la recolección del café maduro, es necesario no solo saber los kilogramos listos para recolección por

lote, sino también, las pendientes de inclinación del terreno en cada lote y la predicción de las condiciones climática de la semana que se planea recolectar. De esta manera en el presente ejemplo, se tiene que el lote 1, tiene una pendiente superior al 200 % y el lote 2, una pendiente entre el 101 % y el 200 %. Adicional a esto, se estima que habrá una reducción del 5 % de la jornada laboral, debido a lluvias pronosticada en esta semana.

Con los datos de cada lote, se hace uso del aplicativo web, en donde se ingresa la información como se observa en la figura 33.

Figura 33. Información del ejemplo ingresada en el aplicativo web para calcular la cantidad de personal necesario.

Ingrese la información de los lotes

Café maduro promedio
2500

Pendiente de inclinación
 mayor al 200%
 101% - 200%
 20% - 100%

Café maduro promedio
3500

Pendiente de inclinación
 mayor al 200%
 101% - 200%
 20% - 100%

AÑADIR LOTE +

% de disminución de horas laborales de acuerdo al clima
5

CALCULAR LIMPIAR

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Posterior a esto, se hace clic en el botón “*CALCULAR*” y en la parte inferior del aplicativo, aparece la cantidad de personal que sugiere la herramienta contratar (figura 34).

Figura 34. Cantidad de personal a contratar sugerido por el aplicativo web.

Café maduro promedio
2500

Pendiente de inclinación

- mayor al 200%
- 101% - 200%
- 20% - 100%

Café maduro promedio
3500

Pendiente de inclinación

- mayor al 200%
- 101% - 200%
- 20% - 100%

AÑADIR LOTE +

% de disminución de horas laborales de acuerdo al clima
5

CALCULAR LIMPIAR

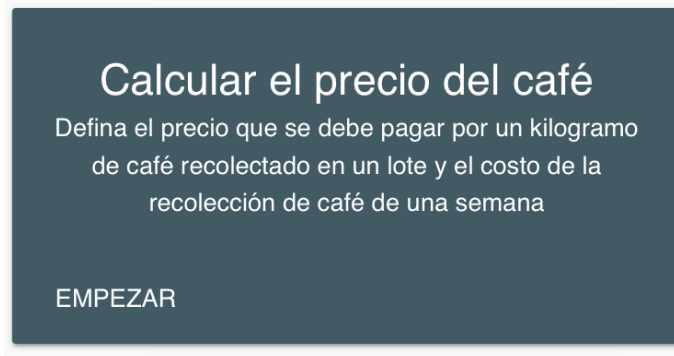
Necesita 12 personas

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Como se observa en la figura 34, el aplicativo web sugiere que se contraten 12 personas para realizar la recolección del café maduro de estos dos lotes.

Seguido de esto, se debe saber cuanto es el precio por kilogramo de café maduro recolectado en cada lote, para esto se hará uso del botón dos del aplicativo (figura 35).

Figura 35. Botón para calcular el precio que se debe pagar por un kilogramo de café maduro recolectado en el aplicativo web.



Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Para calcular el precio que se debe pagar por kilogramo de café recolectado, se debe saber por cada lote, la altura promedio de los árboles, la cantidad de café maduro y si el lote se encuentra a más de 1.000 metros del centro de acopio, adicional a esto, se debe tener el precio promedio que las fincas vecinas están pagando el kilogramo recolectado y el precio piso. De esta manera, para el presente ejemplo, se suponen los siguientes datos:

- Lote 1: la altura promedio de los árboles es de 1,50 metros, tiene una cantidad de café buena y no se encuentra a más de 1.000 metros del centro de acopio.
- Lote 2: la altura promedio de los árboles es de 1,60 metros, tiene una cantidad de café regular y no se encuentra a más de 1.000 metros del centro de acopio.
- El precio promedio que las fincas vecinas están pagando por el kilogramo recolectado es de \$ 500 pesos, y el precio piso es de \$ 450 pesos.

Esta información se debe ingresar al aplicativo web, con el fin de calcular el precio que se debe pagar por kilogramo recolectado en cada lote, como se observa en la figura 36.

Figura 36. Información del ejemplo ingresada al aplicativo web con el fin de calcular el precio por kilogramo de café recolectado en cada lote.

Altura promedio de los árboles en metros
1,50

Cantidad de café maduro
 Buena
 Regular
 Mala
 Muy mala

Distancia del lote al centro de acopio mayor a 1000

Altura promedio de los árboles en metros
1,60

Cantidad de café maduro
 Buena
 Regular
 Mala
 Muy mala

Distancia del lote al centro de acopio mayor a 1000

Precio promedio que las fincas vecinas pagan por un kg de café recolectado
500

Piso
450

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Una vez ingresada la información, se hace clic en “*Aceptar*” y los resultados brindados por el aplicativo web, se pueden observar en la figura 37.

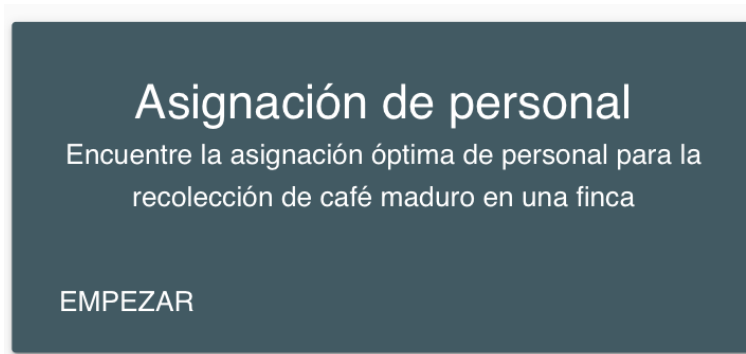
Figura 37. Precio que se debe pagar por kilogramo de café recolectado sugerido por el aplicativo web.

Lote	Precio mínimo por kg	Precio máximo por kg
1	500	500
2	545	590

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Posterior a esto, y para efectos del presente ejemplo, se hará la suposición que solo se lograron conseguir 10 de las 12 personas que sugirió el aplicativo, de estas, 2 son de alto rendimiento, 5 de medio rendimiento y 3 de bajo rendimiento. Con esta información se procede hacer uso del tercer botón del aplicativo web (figura 38), con el fin de asignar óptimamente el personal disponible, de tal manera que se logre recolectar la totalidad de café maduro.

Figura 38. Botón para realizar la asignación de personal disponible en el aplicativo web.



Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

En este botón, inicialmente se ingresa la información de los lotes, como se puede ver en la figura 39, luego de esto, se ingresa la información de los recolectores de café, de la manera que se indica en la figura 40.

Figura 39. Información de los lotes del ejemplo ingresada al aplicativo web con el fin de realizar la asignación de personal.

Información de lotes

Kg de café 2500	Pendiente de inclinación <input checked="" type="radio"/> mayor al 200% <input type="radio"/> 101% - 200% <input type="radio"/> 20% - 100%
Kg de café 3500	Pendiente de inclinación <input type="radio"/> mayor al 200% <input checked="" type="radio"/> 101% - 200% <input type="radio"/> 20% - 100%

AÑADIR LOTE +

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

Figura 40. Información del personal del ejemplo ingresada al aplicativo web con el fin de realizar la asignación de personal.

Información de recolectores

Número de recolectores 2	Rendimiento <input checked="" type="radio"/> Alto rendimiento <input type="radio"/> Medio rendimiento <input type="radio"/> Bajo rendimiento	<input checked="" type="checkbox"/> Grupo
Número de recolectores 5	Rendimiento <input type="radio"/> Alto rendimiento <input checked="" type="radio"/> Medio rendimiento <input type="radio"/> Bajo rendimiento	<input checked="" type="checkbox"/> Grupo
Número de recolectores 3	Rendimiento <input type="radio"/> Alto rendimiento <input type="radio"/> Medio rendimiento <input checked="" type="radio"/> Bajo rendimiento	<input checked="" type="checkbox"/> Grupo

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

De esta manera y una vez ingresada la información mostrada, se hace clic en “*Calcular*”, para obtener la asignación de personal sugerida por el aplicativo web (figura 41).

Figura 41. Asignación de personal sugerida por el aplicativo web.

Recolector / Lotes	Lote 1	Lote 2
Recolector 1	20 horas	19 horas
Recolector 2	33 horas	7 horas
Recolector 3	19 horas	20 horas
Recolector 4	7 horas	32 horas
Recolector 5	26 horas	13 horas
Recolector 6	25 horas	14 horas
Recolector 7	3 horas	37 horas
Recolector 8	9 horas	30 horas
Recolector 9	23 horas	16 horas
Recolector 10	18 horas	21 horas

Fuente: Obtenido de la herramienta diseñada.

De esta manera, y con toda la información brindada por el aplicativo, se procederá a realizar la asignación sugerida, para lograr la recolección total del café maduro en los dos lotes.

3 Validación de la metodología para la programación de la recolección manual de café en zonas con pendiente de inclinación superior a 20 %

Para este capítulo se realizó un análisis de la literatura identificada previamente en el marco teórico, con el fin de detectar métodos de validación que podrían ser aplicados a la presente investigación. De los 27 artículos identificados en la revisión de literatura en el Centro Nacional de Investigaciones de Café, se concluye que en los 7 artículos referentes a la mano de obra y pendiente de inclinación del terreno, no aplican ningún método de validación, ya que son estudios que lo que realizan son caracterizaciones o documentaciones del proceso. Por otro lado, en las 20 investigaciones enfocadas en el desarrollado de herramientas o métodos para mejorar la recolección del grano de café, el proceso de validación es muy similar, el cual consiste en comparar los kilogramos por hora que cada operario recolecta actualmente y los que recolecta con la aplicación de la nueva herramienta o método. Este proceso de validación no es aplicable para el actual trabajo, debido a que el objetivo no consiste en mejorar la cantidad de kilogramos por hora de un recolector.

Así mismo, se realizó el análisis de los artículos identificados como muy relevantes (tabla 2), para indagar que tipos de validaciones se utilizaban en estas investigaciones. Se pudo concluir que en estos estudios, el principal método de validación se la comparación del estado actual y los resultados obtenidos con el nuevo método que propone cada autor, de esta manera, cada una de estas investigaciones compara su objetivo principal, antes y después de la aplicación de la investigación desarrollada (Corner y Foulds, 2005; Ferrer et al., 2008; Ooster, Bontsema, van Henten y Hemming, 2013; Ooster, Bontsema, van Henten y Hemming, 2015). Adicional a este tipo de validación, se encuentra la comparación de heurísticas o herramientas de optimización, para saber cual da mejores resultados (Wijngaard, 1988; Corner y Foulds, 2005; Ferrer et al., 2008; Arnaout y Maatouk, 2010). Por otra parte, se hallan algunas validaciones realizadas por medio de la simulación (Guan, Nakamura, Shikanai y Okazaki, 2008; Ooster, Bontsema, van Henten y Hemming, 2015; Wishon, et al., 2015).

La aplicación de este tipo de validaciones encontradas en las investigaciones anteriores, no darían buenos resultados para el presente trabajo, ya que el cultivo de café cambia sus características de una semana a otra, por lo que no se puede comparar un antes y un después con diferencias de tiempo, pues no sería bajo las mismas condiciones. Adicional a esto, no se realiza la comparación de diferentes herramientas de optimización, porque solo se desarrolló una. Por último, no se aplica la simulación en esta validación, pues

se pretende llevar la metodología a la vida real por medio de 4 casos de estudio. Por estas razones, se plantea la siguiente validación:

El proceso de validación, se realiza por medio de la aplicación de la metodología en la finca cafetera “La Popa” del municipio de Manizales en el Departamento de Caldas, Colombia. Para esto, se seleccionó el mes de mayo del 2019, ya que es un mes en el cual, según los registros de floraciones, se tendrá buena producción de café. Las características de la finca seleccionada son las siguientes:

La finca “La Popa”, es una finca cafetera ubicada en la vereda el Guineo, en el municipio de Manizales del Departamento de Caldas, Colombia, cuenta con una extensión total de 28 hectáreas; actualmente posee 11 lotes productivos de café, los cuales tienen las siguientes características (tabla 26):

Tabla 26. Lotes productivos de café, en la finca “La Popa”, con sus características.

Lote	Hectáreas	Árboles en el lote	Pendiente de inclinación promedio del lote
Lote 1 - casa vieja	4,060	29.000	101 % - 200 %
Lote 2 - Hormiguero bajo	1,540	11.000	101 % - 200 %
Lote 3 - El charco	1,820	13.000	101 % - 200 %
Lote 4 - Pavas	0,784	5.600	Superior al 200 %
Lote 5 - La popa	1,148	8.200	101 % - 200 %
Lote 6 - Carretera arriba	0,784	5.600	Superior al 200 %
Lote 7 - Guacas	1,218	8.700	101 % - 200 %
Lote 8 - Hormiguero Alto	1,890	13.500	101 % - 200 %
Lote 9 - Picada	1,820	13.000	Superior al 200 %
Lote 10 - El plan	0,840	6.000	20 % - 100 %
Lote 11 - Monte abajo	2,282	16.300	Superior al 200 %

Fuente: Elaboración propia.

Con la especificaciones de cada lote de la finca (tabla 26), se procede a aplicar los 4 pasos propuestos en la metodología (figura 31), de la siguiente manera:

3.1 Pronóstico inicial

Para el pronóstico inicial de producción, como se determinó en el capítulo anterior, se hará uso de los registros de floraciones, por lo que, teniendo en cuenta que la producción de café se dará a las 32 semanas del registro de floración, se toman en esta validación las siguientes semanas:

- Del 24 al 28 de septiembre del 2018 (Producción del 6 al 10 de mayo): Registro de floración bueno para los siguientes lotes:
Lote 1 - casa vieja
Lote 2 - Hormiguero bajo
Lote 3 - El charco
Lote 4 - Pavas
- Del 1 al 5 de octubre del 2018 (Producción del 13 al 17 de mayo): Registro de floración muy bueno para los siguientes lotes:
Lote 5 - La popa
Lote 6 - Carretera arriba
Lote 7 - Guacas
- Del 8 al 12 de octubre del 2018 (Producción del 20 al 24 de mayo): Registro de floración bueno para los siguientes lotes:
Lote 8 - Hormiguero Alto
Lote 9 - Picada
Lote 10 - El plan
- Del 15 al 19 de Octubre del 2018 (Producción del 27 al 31 de mayo): Registro de floración regular para los siguientes lotes:
Lote 11 - Monte abajo
Lote 4 - Pavas

3.2 Ajuste de pronóstico

Con el fin de realizar el ajuste del pronóstico de producción, se realizará el muestreo en campo propuesto en el capítulo anterior. Conforme con esto, se seleccionaron los días viernes antes de cada semana de recolección, para que sea lo más ajustado posible. Así mismo, el muestreo se realizará por lote independiente, por lo que la cantidad de árboles seleccionados será proporcional a la extensión del lote, partiendo de la base que se deben seleccionar 30 árboles por hectárea. El patrón que se seguirá para seleccionar los árboles, es en zig – zag, que es el que más se ha utilizado en la finca elegida. Según todas estas especificaciones los ajustes de los pronósticos de producción se pueden observar en la tabla 27:

Tabla 27. Ajustes de los pronósticos de producción.

Fecha	Producción	Lote	Hectáreas	Árboles en el lote	Árboles seleccionados para el muestreo	Café recolectado (kg)	Promedio de café maduro por árbol (gr)	Cantidad de café maduro en el lote (kg)
03/05/2019	Del 6 al 10 de mayo del 2019	Lote 1 - casa vieja	4,060	29.000	122	15	122,95	3.566
03/05/2019	Del 6 al 10 de mayo del 2019	Lote 2 - Hormiguero bajo	1,540	11.000	46	6,3	136,96	1.507
03/05/2019	Del 6 al 10 de mayo del 2019	Lote 3 - El charco	1,820	13.000	55	30	545,45	7.091
03/05/2019	Del 6 al 10 de mayo del 2019	Lote 4 - Pavas	0,784	5.600	24	21	875	4.900
10/05/2019	Del 13 al 17 de mayo del 2019	Lote 5 - La popa	1,148	8.200	34	16,5	485,29	3.979
10/05/2019	Del 13 al 17 de mayo del 2019	Lote 6 - Carretera arriba	0,784	5.600	24	14	583,33	3.267
10/05/2019	Del 13 al 17 de mayo del 2019	Lote 7 - Guacas	1,218	8.700	37	19	513,51	4.468
17/05/2019	Del 20 al 24 de Mayo del 2019	Lote 8 - Hormiguero Alto	1,890	3.500	57	15	263,16	3.553
17/05/2019	Del 20 al 24 de Mayo del 2019	Lote 9 - Picada	1,820	13.000	55	25	454,55	5.909
17/05/2019	Del 20 al 24 de Mayo del 2019	Lote 10 - El plan	0,840	6.000	25	6,2	248	1.488
24/05/2019	Del 27 al 31 de Mayo del 2019	Lote 11 - Monte abajo	2,282	16.300	68	16,5	242,65	3.955
24/05/2019	Del 27 al 31 de Mayo del 2019	Lote 4 - Pavas	0,784	5.600	24	5,5	229,17	1.283

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Programa maestro

Una vez ajustado el pronóstico de producción en cada lote, se procede a definir la cantidad estimada de recolectores que se necesitan y el costo por kilogramo recolectado de café en cada lote. Para la finca “La Popa” en específico, se tiene una particularidad, que la programación de los lotes y la consecución de los recolectores se hace por agregado independiente. Esto quiere decir que cada agregado es responsable de unos lotes

específicos y así mismo es responsable de conseguir las personas para recolectar el café de esos lotes. Debido a esto, se realizarán procesos independientes para cada agregado, con el fin de ajustar la metodología a las particularidades de la finca “*La Popa*”.

3.3.1 Cantidad de personal necesario por lote

La aplicación desarrollada en el capítulo anterior tiene la capacidad de definir la cantidad de personal necesario en cada lote. Para la actual validación y con el fin de realizar el ejercicio lo más ajustado posible a la realidad, se realizará este paso de tal manera que se pueda definir la cantidad de personal necesario por agregado, como se observa en la tabla 28:

Tabla 28. Cantidad de personal necesario por agregado.

Semana de recolección	Disminución horas laborales por lluvias (%)	Agregado	lote	Café maduro promedio (kg)	Pendiente de inclinación (%)	Personas necesarias
Del 6 al 10 de mayo del 2019	5	1	Lote 1 (casa vieja)	3.566	101 - 200	10
Del 6 al 10 de mayo del 2019	5	1	Lote 2 (Hormiguero bajo)	1.507	101 - 200	
Del 6 al 10 de mayo del 2019	5	2	Lote 3 (El charco)	7.091	101 - 200	25
Del 6 al 10 de mayo del 2019	5	2	Lote 4 (Pavas)	4.900	Superior al 200	
Del 13 al 17 de Mayo del 2019	5	1	Lote 5 (La Popa)	3.979	101 - 200	24
Del 13 al 17 de Mayo del 2019	5	1	Lote 6 (Carretera arriba)	3.267	Superior al 200	
Del 13 al 17 de Mayo del 2019	5	1	lote 7 (Guacas):	4.468	101 - 200	
Del 20 al 24 de Mayo del 2019	5	1	lote 8 (Hormiguero alto)	3.553	101 - 200	7
Del 20 al 24 de Mayo del 2019	5	2	Lote 9 (Picada)	5.909	Superior al 200	16
Del 20 al 24 de Mayo del 2019	5	2	Lote 10 (El plan)	1.488	20 - 100	
Del 27 al 31 de Mayo del 2019	5	1	Lote 11 (Monte abajo)	3.955	Superior al 200	12
Del 27 al 31 de Mayo del 2019	5	1	Lote 4 (Pavas)	1.283	Superior al 200	

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Precio del kilogramo de café recolectado en cada lote

Una vez definida la cantidad personal necesario para realizar la recolección de café maduro, se debe determinar el precio por kilogramo de café recolectado que se va apagar en cada lote. De acuerdo con esto, se hace uso de la segunda parte de la aplicación descrita en el capítulo anterior. Los resultados obtenidos son los siguientes:

3.3.2.1 Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 6 al 10 de mayo del 2019

Para esta semana se tiene un precio promedio en las fincas vecinas de \$ 450 pesos por kilogramos de café recolectado y el piso, que es por lo mínimo que trabajan los recolectores, está en \$ 450 pesos.

Tabla 29. Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 6 al 10 de mayo del 2019.

Lote	Altura promedio de los árboles (metros)	Cantidad de café maduro	Distancia superior a 1.000 metros al centro de acopio	Precio del kilogramo de café maduro recolectado
Lote 1 (casa vieja)	1,60	Malo	No	\$ 630 pesos
Lote 2 (Hormiguero bajo)	2,20	Malo	No	\$ 680 pesos
Lote 3 (El charco)	1,60	Bueno	No	\$ 450 pesos
Lote 4 (Pavas)	1,60	Bueno	No	\$ 450 pesos

Fuente: Elaboración propia.

Al fijar el precio del kilogramo de café recolectado en estos cuatro lotes por medio de la aplicación desarrollada, se pudo observar que si no se hubiera tenido la ayuda de esta herramienta, se incurriría en un precio superior en el kilogramo recolectado en los lotes 1 y 2, ya que el administrador hubiera fijado los precios de ambos lotes en \$ 700 pesos el kilogramo. Debido a esto, en el lote 1 se redujo el costo de la recolección en un 10 % (\$ 249.620 pesos) y en el lote 2 un 2,8 % (\$ 30.140 pesos).

3.3.2.2 Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 13 al 17 de mayo del 2019

Para esta semana se tiene un precio promedio en las fincas vecinas de \$ 450 pesos por kilogramos de café recolectado y el piso, que es por lo mínimo que trabajan los recolectores, está en \$ 450 pesos.

Tabla 30. Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 13 al 17 de mayo del 2019.

Lote	Altura promedio de los árboles (metros)	Cantidad de café maduro	Distancia superior a 1.000 metros al centro de acopio	Precio del kilogramo de café maduro recolectado
Lote 5 (La Popa)	2,00	Bueno	No	\$ 500 pesos
Lote 6 (Carretera arriba)	1,70	Bueno	No	\$ 490 pesos
lote 7 (Guacas)	1,60	Bueno	No	\$ 450 pesos

Fuente: Elaboración propia.

En estos tres lotes hubiera sucedido algo similar a la semana anterior, ya que según la percepción del administrador, los tres lotes debían tener el precio por kilogramo recolectado en \$ 500 pesos. La aplicación mostró que según todas las variables de los lotes, el lote 5 sí debía tener un precio de \$ 500 pesos el kilogramo, pero en los lotes 6 y 7 debía ser menor, por lo que en el lote 6 se redujo del valor del kilogramo de café recolectado en un 2 % (\$ 32.670 pesos) y en el lote 7 de 10 % (\$ 223.400 pesos).

3.3.2.3 Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 20 al 24 de mayo del 2019

Para esta semana se tiene un precio promedio en las fincas vecinas de \$ 500 pesos por kilogramos de café recolectado y el piso, que es por lo mínimo que trabajan los recolectores, está en \$ 450 pesos.

Tabla 31. Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 20 al 24 de mayo del 2019.

Lote	Altura promedio de los árboles (metros)	Cantidad de café maduro	Distancia superior a 1.000 metros al centro de acopio	Precio del kilogramo de café maduro recolectado
lote 8 (Hormiguero alto)	1,00	Regular	No	\$ 550 pesos
Lote 9 (Picada)	2,50	Bueno	No	\$ 550 pesos
Lote 10 (El plan)	2,00	Regular	No	\$ 600 pesos

Fuente: Elaboración propia.

En esta semana de recolección, los precios que arrojó la aplicación fueron muy similares a los que el administrador pensaba fijar en cada lote; la única variación ocurrió en el lote 9, en donde el precio que hubiera establecido sería de \$ 600 pesos el kilogramo de café recolectado. Con esta variación, el ahorro en esta semana de recolección por determinar correctamente los precios del kilogramo de café maduro recolectado es de 8,3 % (\$ 295.450 pesos).

3.3.2.4 Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 27 al 31 de mayo del 2019

Para esta semana se tiene un precio promedio en las fincas vecinas de \$ 500 pesos por kilogramos de café recolectado y el piso, que es por lo mínimo que trabajan los recolectores, está en \$ 450 pesos.

Tabla 32. Precio del kilogramo de café recolectado, en los lotes a recolectar en la semana del 27 al 31 de mayo del 2019.

Lote	Altura promedio de los árboles (metros)	Cantidad de café maduro	Distancia superior a 1.000 metros al centro de acopio	Precio del kilogramo de café maduro recolectado
Lote 11 (Monte abajo)	2,50	Regular	No	\$ 630 pesos
Lote 4 (Pavas)	1,60	Regular	No	\$ 590 pesos

Fuente: Elaboración propia.

En estos dos lotes, la variación entre el precio que arrojó la aplicación y el que el administrador determinó, fue muy poca. En el lote 11 el administrador sugirió un precio de \$ 650 pesos y en el lote 4 un precio de \$ 600 pesos. Con estos valores, el ahorro por fijar los precios de acuerdo a como la aplicación determinó, fue de 3 % (\$ 79.100 pesos) en el lote 11 y de 1,7 % (\$ 12.830 pesos) en el lote 4.

3.4 Asignación de personal

Con los tres primeros pasos de la metodología propuesta se logra obtener la cantidad de café maduro promedio en un lote a recolectar, la cantidad de personal que se necesita para recolectar el café maduro de los lotes seleccionados y el precio por kilogramo de café maduro recolectado en un lote. De esta manera, se tiene lo más ajustada posible la información de una semana de recolección de café en la finca “La Popa”. Posterior a esto, con la información obtenida, cada agregado podrá conseguir el personal que se le especificó y sabrá a cuánto se les pagará el kilogramo de café maduro recolectado, dependiendo del lote asignado.

Según lo observado, uno de los principales problemas del sector cafetero es la escasez de personal para realizar el proceso de recolección de café, por lo que es posible que los agregados no puedan conseguir la cantidad de personal especificada en el punto anterior. Debido a esto, se aplicará la tercera parte de la aplicación descrita en el capítulo anterior, con el fin de asignar lo más eficientemente el personal conseguido por cada agregado. Para esto, se tendrá en cuenta el rendimiento de cada trabajador de la siguiente manera:

3.4.1 Asignación de personal, de la semana del 6 al 10 de mayo del 2019

- **Agregado 1:**

Lotes a recolectar: lote 1 (casa vieja) y lote 2 (Hormiguero bajo).

Lote 1 (casa vieja): La cantidad de café maduro promedio es de 3.566 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es de 101 % - 200 %.

Lote 2 (Hormiguero bajo): La cantidad de café maduro promedio es de 1.507 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es de 101 % - 200 %.

Cantidad de personal a conseguir: 10 recolectores

Personal conseguido: 10 recolectores (2 de alto rendimiento, 6 de medio y 2 de bajo)

La asignación de personal sugerida por el programa desarrollado se puede observar en el anexo 4.

Con la asignación de personal observada en el anexo 4 se pudo llevar a cabo la recolección de café maduro a cabalidad en los lotes 1 y 2, en la semana del 6 al 10 de mayo del 2019. No se presentaron contratiempos importantes y la aplicación de esta asignación sugerida fue fácil y práctica al momento de implementar. Adicional a esto, se pudo cumplir con el requisito horario, en donde ningún trabajador excedió las 8 horas diarias en su jornada laboral. En ciertas asignaciones, la herramienta determinó solo 39 horas a la semana en algunos recolectores, pero se observó que en realidad esa hora que quedaban libres se utilizó para la recolección de algunos kilogramos de café adicionales que se habían madurado durante esa semana. La cantidad de café real que se recolectó en esta semana en el lote 1 fue de 3.690 kilogramos y en el lote 2 fue de 1.555 kilogramos de café maduro.

- **Agregado 2:**

Lotes a recolectar: lote 3 (El charco) y lote 4 (Pavas).

Lote 3 (El charco): La cantidad de café maduro promedio es de 7.091 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es de 101 % - 200 %.

Lote 4 (Pavas): La cantidad de café maduro promedio es de 4.900 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es superior al 200 %.

Cantidad de personal a conseguir: 25 recolectores

Personal conseguido: 23 recolectores (4 de alto rendimiento, 15 de medio y 4 de bajo)

La asignación de personal sugerida por el programa desarrollado se puede observar en el anexo 5.

Para el agregado 2, en la semana del 6 al 10 de mayo, también se realizó la asignación de personal por medio de la herramienta desarrollada, como se observa en el anexo 5. Con esta asignación sugerida se logró cumplir con la recolección total del café maduro de los lotes 3 y 4, a pesar que solo se lograron conseguir 23 recolectores, sabiendo que la aplicación había sugerido 25. De aquí parte la importancia de una buena asignación de personal cuando no se logra adquirir la cantidad de personal necesario para llevar a cabo la recolección de café maduro de una semana. Así mismo, se logró cumplir con los horarios laborales y la cantidad de café maduro recolectado en el lote 3 fue de 7.309 kilogramos y en el lote 4 fue de 5.010 kilogramos.

3.4.2 Asignación de personal, de la semana del 13 al 17 de mayo del 2019

- **Agregado 1:**

Lotes a recolectar: lote 5 (La Popa), lote 6 (Carretera arriba) y lote 7 (Guacas).

Lote 5 (La Popa): La cantidad de café maduro promedio es de 3.979 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es de 101 % - 200 %.

Lote 6 (Carretera arriba): La cantidad de café maduro promedio es de 3.267 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es superior al 200 %.

Lote 7 (Guacas): La cantidad de café maduro promedio es de 4.468 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es de 101 % - 200 %.

Cantidad de personal a conseguir: 24 recolectores

Personal conseguido: 23 recolectores (4 de alto rendimiento, 15 de medio y 4 de bajo)

La asignación de personal sugerida por el programa desarrollado se puede observar en el anexo 6.

En esta semana de recolección solo se tenía un agregado disponible para esta labor, por lo que se realizó la asignación de personal para los tres lotes con el grupo de trabajadores de este agregado. La asignación sugerida por la herramienta se puede observar en el anexo 6. De esta manera, se logró dar cumplimiento a pesar que se tenía un trabajador menos a lo sugerido inicialmente. Así, como en la semana anterior, se logra dar cumplimiento a la jornada laboral, y el café maduro obtenido del lote 5 fue de 4.158 kilogramos, del lote 6 fue de 3.525 kilogramos y del lote 7 fue de 4.589 kilogramos.

3.4.3 Asignación de personal, de la semana del 20 al 24 de mayo del 2019

- **Agregado 1:**

Lote a recolectar: lote 8 (Hormiguero alto).

Lote 8 (Hormiguero alto): La cantidad de café maduro promedio es de 3.553 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es de 101 % - 200 %.

Cantidad de personal a conseguir: 7 recolectores

Personal conseguido: 7 recolectores (1 de alto rendimiento, 5 de medio y 1 de bajo)

La asignación de personal sugerida por el programa desarrollado se puede observar en el anexo 7.

Para el agregado 1, en la semana del 20 al 24 de mayo, no era necesaria la aplicación de la herramienta desarrollada, ya que solo tenía un lote asignado para recolección, por lo que, con la sugerencia inicial en el programa maestro, se cumpliría con la recolección del café maduro en este lote. Se quiso realizar la asignación de personal por medio de la herramienta (anexo 7), con el fin de corroborar que con el personal disponible era posible alcanzar el objetivo propuesto y, efectivamente así fue. Se logró recolectar la totalidad del café maduro del lote 8 (3.778 kilogramos de café maduro), cumpliendo la jornada laboral de los 7 recolectores.

- **Agregado 2:**

Lotes a recolectar: lote 9 (Picada) y lote 10 (El plan).

Lote 9 (Picada): La cantidad de café maduro promedio es de 5.909 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es superior al 200 %.

Lote 10 (El plan): La cantidad de café maduro promedio es de 1.488 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es de 20 % - 100 %.

Cantidad de personal a conseguir: 16 recolectores

Personal conseguido: 14 recolectores (2 de alto rendimiento, 9 de medio y 3 de bajo)

La asignación de personal sugerida por el programa desarrollado se puede observar en el anexo 8.

Para el agregado 2, en la semana del 20 al 24 de mayo, se aplicó la herramienta desarrollada y la asignación de personal sugerida se observa en el anexo 8. La sugerencia inicial en el programa maestro era conseguir 16 recolectores, pero solo se logró tener 14 recolectores al día lunes. Gracias a una buena asignación realizada por la herramienta, se logró cumplir con la recolección total del café maduro de estos lotes. En esta semana se tuvo un inconveniente con el recolector número 9, que después de realizar la recolección en el lote 1, por motivos personales no pudo seguir trabajando, por lo que quedaron 3 horas sin asignación; para compensar estas horas faltantes se le incrementó 1 hora en el lote 2 a los recolectores 10, 11 y 12, quienes solo tenían 39 horas asignadas, y de esta manera se compensó el faltante de esas 3 horas de ese trabajador. Así mismo, se lograron recolectar 6.022 kilogramos de café maduro en el lote 9 y 1.525 kilogramos del lote 10, cumpliendo con las jornadas laborales especificadas.

3.4.4 Asignación de personal, de la semana del 27 al 31 de mayo del 2019

- **Agregado 1:**

Lotes a recolectar: lote 11 (Monte abajo) y lote 4 (Pavas).

Lote 11 (Monte abajo): La cantidad de café maduro promedio es de 3.955 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es superior al 200 %.

Lote 4 (Pavas): La cantidad de café maduro promedio es de 1.283 kilogramos y la pendiente de inclinación promedio es superior al 200 %.

Cantidad de personal a conseguir: 12 recolectores

Personal conseguido: 11 recolectores (2 de alto rendimiento, 8 de medio y 1 de bajo)

La asignación de personal sugerida por el programa desarrollado se puede observar en el anexo 9.

En esta semana solo se contaba nuevamente con un agregado para realizar las labores de recolección de café maduro, por esto se realizó la asignación de personal únicamente con este grupo de trabajadores. La sugerencia inicial del programa maestro era conseguir 12 recolectores, pero en esta semana solo se contó con 11 recolectores. La asignación que arrojó la herramienta se puede observar en el anexo 9. En esta semana no hubo contratiempos, fue fácil de realizar la asignación de personal y se cumplieron a cabalidad los horarios laborales sugeridos. El café maduro obtenido del lote 11 fue 4.064 kilogramos y del lote 4 fue 1.381 kilogramos.

3.5 Discusión de resultados

En la validación de la metodología para la programación de la recolección manual de café durante todo el mes de mayo del 2019, se logró observar que proporciona una adecuada programación de las actividades de la recolección de café en Colombia, brindando no solo información acerca de la cantidad de personal necesario, sino también sobre el precio a pagar por kilogramo de café recolectado. Se observa que tanto el pronóstico inicial de producción como el ajuste del mismo, son vitales al momento de aplicar la metodología completa. Estos pronósticos no solo ayudaron a la correcta aplicación de las dos últimas fases de la metodología, sino que también aportaron a la programación de otras actividades de la finca, como fue la fertilización; lo que nos da a entender que comenzar a realizar programaciones y planeaciones al interior de una finca cafetera ayudará a la organización adecuada de varias de las actividades necesarias para el cultivo.

Uno de los puntos principales que se detectó en esta validación y que se hizo más evidente con la aplicación de la herramienta, es que así los caficultores tengan años de experiencia calculando empíricamente cuánto café hay en un lote, no va a ser tan exacto como se calcula con la metodología propuesta. Esta precisión en el cálculo de la cantidad de café en un lote es lo que principalmente genera una programación adecuada de todo el proceso de recolección.

Se pudo observar que aunque era la primera vez que se aplicaba la metodología en campo, tiene un lenguaje de fácil entendimiento para los caficultores, lo que agilizó la programación al interior de la finca. Adicional a esto y como se mencionó en los puntos anteriores, se comparó cómo el administrador de la finca hubiera realizado la fijación del precio por kilogramo de café recolectado en un lote, con lo sugerido por el aplicativo y el ahorro total en este mes que se realizó la validación fue de \$ 923.210 pesos colombianos, como se detalla en la tabla 33.

Tabla 33. Comparativo entre el precio que fijó el administrador de la finca y el que arrojó la herramienta de programación por cada kilogramo de café recolectado y la diferencia en pesos colombianos.

Lote	Semana de recolección	Precio del administrador	Precio de la herramienta	Diferencia en %	Cantidad de café (kg)	Ahorro en pesos
Lote 1	6 al 10 de mayo	\$ 700 por kg	\$ 630 por kg	10	3.566	\$ 249.620
Lote 2	6 al 10 de mayo	\$ 700 por kg	\$ 680 por kg	2,8	1.507	\$ 30.140
Lote 3	6 al 10 de mayo	\$ 450 por kg	\$ 450 por kg	0	7.091	\$ 0
Lote 4	6 al 10 de mayo	\$ 450 por kg	\$ 450 por kg	0	4.900	\$ 0
Lote 5	13 al 17 de mayo	\$ 500 por kg	\$ 500 por kg	0	3.979	\$ 0
Lote 6	13 al 17 de mayo	\$ 500 por kg	\$ 490 por kg	2	3.267	\$ 32.670
Lote 7	13 al 17 de mayo	\$ 500 por kg	\$ 450 por kg	10	4.468	\$ 223.400
Lote 8	20 al 24 de mayo	\$ 550 por kg	\$ 550 por kg	0	3.553	\$ 0
Lote 9	20 al 24 de mayo	\$ 600 por kg	\$ 550 por kg	8,3	5.909	\$ 295.450
Lote 10	20 al 24 de mayo	\$ 600 por kg	\$ 600 por kg	0	1.488	\$ 0
Lote 11	27 al 31 de mayo	\$ 650 por kg	\$ 630 por kg	3	3.955	\$ 79.100
Lote 4	27 al 31 de mayo	\$ 600 por kg	\$ 590 por kg	1,7	1.283	\$ 12.830
Total						\$ 923.210

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 33, en cinco de los datos de precios calculados hubo coincidencia entre el cálculo del administrador y el de la herramienta; para los 7 lotes restantes se logró realizar un ajuste en el valor que se iba a pagar por kilogramo de café recolectado de acuerdo a las variables previamente definidas, generando un ahorro de \$ 923.210 pesos colombianos en el mes de mayo en el proceso de recolección.

En el cálculo de cuántas personas se necesitan en una semana de recolección, el aplicativo estimó correctamente el número de personas a contratar, ya que se logró una asignación correcta, a pesar de no contar siempre con el total del personal calculado en el programa maestro (tabla 34).

Tabla 34. Cantidad de café maduro estimado por lote, cantidad de café maduro recolectado por lote y la diferencia.

Lote	Semana de recolección	Cantidad de café estimada para recolección (kg)	Cantidad de café recolectado (kg)	Diferencia (kg)
Lote 1	6 al 10 de mayo	3.566	3.690	124
Lote 2	6 al 10 de mayo	1.507	1.555	48
Lote 3	6 al 10 de mayo	7.091	7.309	218
Lote 4	6 al 10 de mayo	4.900	5.010	110
Lote 5	13 al 17 de mayo	3.979	4.158	179
Lote 6	13 al 17 de mayo	3.267	3.525	258
Lote 7	13 al 17 de mayo	4.468	4.589	121
Lote 8	20 al 24 de mayo	3.553	3.778	225
Lote 9	20 al 24 de mayo	5.909	6.022	113
Lote 10	20 al 24 de mayo	1.488	1.525	37
Lote 11	27 al 31 de mayo	3.955	4.064	109
Lote 4	27 al 31 de mayo	1.283	1.381	98

Fuente: Elaboración propia.

Como se detalla en la tabla 34, en cada lote se logra la recolección total del café maduro que se estimó con el ajuste del pronóstico, más algunos kilogramos extras en cada lote; esto se da debido a que el café diariamente se madura y aunque se estime la cantidad de café maduro lo más cerca de la recolección, a medida que avanza la semana algunos granos se irán madurando; pero con la asignación sugerida por la herramienta se logra cumplir con el objetivo propuesto.

Adicional a lo ya mencionado, al recolectar la totalidad del café maduro (tabla 34) en la semana presupuestada, se está garantizando que el fruto de café no va a incurrir en problemas de calidad, ya que no sobrepasa los 8 días después de su maduración. Por último, se observó que esta metodología para la programación de la recolección manual de café provee no solo información necesaria para esta actividad específica, sino que está brindando al caficultor datos reales de su finca con el fin de realizar cualquier actividad que desee programar.

De esta manera, se impactó directamente en cuatro de los errores que se detectaron en las entrevistas con los cafeteros, que más afectaban la recolección manual de café, como eran, el cálculo erróneo del precio a pagar por kilogramo recolectado, mucho personal contratado, poco personal contratado y demoras para la recolección.

Es importante mencionar que según el alcance que se tiene en la actual investigación, solo se aplicó la metodología propuesta en una finca cafetera, y aunque se lograron realizar cuatro programaciones durante un mes, no es suficiente para generalizar los resultados a todas las fincas cafeteras de

Colombia. Sin embargo cabe resaltar que los resultados obtenidos en este estudio de caso fueron satisfactorios y suficientes para demostrar el impacto que tiene la metodología propuesta en el proceso de recolección manual de café.

3.6 Conclusiones parciales

Como conclusiones parciales de este capítulo, se puede decir que para los pronósticos iniciales de producción, los caficultores colombianos se encuentran familiarizados con el proceso. Adicional a esto, tomar el inicio de la metodología propuesta desde este punto, ayudó a tener una visión a mediano plazo para la planeación, no solo de la recolección del café, sino de todas las actividades de la finca, generando unos correctos resultados.

Ahora bien, el ajuste del pronóstico de producción sí fue una actividad completamente nueva para los caficultores. Se pudo detectar que este punto de la metodología propuesta fue fundamental a la hora de realizar toda la programación, ya que al tener conocimiento de la cantidad de café en un lote se pudo calcular la cantidad de personal necesario para recolección y el precio que se debe pagar por kilogramo de café recolectado en cada lote, acertadamente. Este punto en específico ayudó a todos los caficultores a tener mayor conocimiento de su cultivo y poder tomar decisiones más apropiadas.

En cuanto al programa maestro de producción, la aplicación desarrollada brindó la información que se necesitaba en cada momento con el fin de tomar decisiones, tanto para el cálculo óptimo de personal necesario en una semana de recolección, como para la fijación del precio por kilogramo de café recolectado que se debía pagar en cada lote. De este punto se concluye, que se logró la reducción de \$ 923.210 pesos colombianos. Adicional a esto, se eliminó la incertidumbre de cuánto personal se necesita en una semana de recolección, debido a que la herramienta desarrollada brinda la información exacta de la cantidad de recursos humanos necesarios.

Por último, en la asignación de personal se observó que, aunque no se consiguiera la cantidad de personal sugerida en el programa maestro, la herramienta desarrollada logra realizar una asignación que cumpla con la cantidad de kilogramos que se deben recolectar en cada uno de los lotes, teniendo en cuenta la cantidad de personal disponible, el rendimiento de cada recolector y las características de cada lote, incluyendo los horarios laborales fijados y los días propuestos para la recolección del café maduro.

4 Conclusiones finales

La recolección manual de café en Colombia es lo que más impacta los costos de producción de este fruto. Una metodología para la programación de la recolección manual de café impacta directamente los costos de producción, la organización de actividades, la disminución de errores y la calidad del fruto, esto resulta primordial por la relevancia que el sector cafetero tiene aún en la economía colombiana. En la actualidad, los procesos de producción de café pergamino seco son empíricos y a juicio de los administradores de las fincas.

Se eligió el programa maestro como etapa en la que se debía desarrollar la metodología a proponer, con muy buenos resultados, teniendo en cuenta las características de horizonte temporal y las decisiones en las cuales se enfoca, y a partir de la cual se facilita desarrollar, en una siguiente fase, la asignación de personal, todo esto se definió a partir de la revisión de literatura y el desarrollo del marco teórico. Se pudo definir que las metaheurísticas eran una opción adecuada de programación para las características del actual problema, por medio de la revisión de literatura enfocada a las herramientas de programación, que se desarrollo en el marco teórico - referencial de la investigación.

Adicional a esto, se identificaron y ajustaron las variables detectadas en campo correctamente, para este punto ayudó la identificación de las variables utilizadas en los diferentes artículos analizados en la literatura con el fin de tener una visión global de los agroecosistemas. Se identificaron las diferentes escalas de rendimiento por medio de las características principales de las personas que realizan el proceso de recolección manual de café. Así mismo, se adoptaron como límites de la programación la duración de las jornadas laborales, con base en la normatividad vigente en el país.

Se seleccionaron como variables relevantes en la programación de las actividades de recolección manual de café en condiciones de pendiente superior al 20 %, las siguientes: condiciones climáticas, cantidad de lotes a recolectar, número de árboles por lote, promedio de café maduro por árbol, altura promedio de los árboles del lote a recolectar, pendiente de inclinación del terreno, precio promedio que las fincas vecinas pagan por un kilogramo de café recolectado, personal de recolección, café maduro promedio en un lote, precio que paga la finca por kilogramo de café recolectado en un lote y los costos de la recolección manual de café; a partir de la revisión de literatura y el trabajo de campo desarrollados en la primera etapa de la metodología de investigación propuesta.

En la etapa dos de la metodología de la investigación, se desarrolló la herramienta para la asignación de personal, la cual garantiza la recolección total del café maduro en cada lote. De acuerdo con esto, se seleccionó un

panel de expertos en herramientas de programación y, después de las entrevistas realizadas a los 7 profesores, se concluyó que el algoritmo genético era la metaheurística más adecuada a fin de resolver el problema planteado. Posteriormente se realizó la parametrización de las variables seleccionadas y se modeló la herramienta para la asignación de personal.

En el primer paso de la metodología propuesta se logró tener a mediano plazo la estimación de la cosecha y la definición de la época de mayor producción, por medio de un pronóstico inicial de producción. En el segundo paso se logra obtener un dato real y exacto de la cantidad de kilogramos de café a recolectar en cada lote, con un ajuste al pronóstico inicial, sirviendo como insumo para una correcta programación de las actividades.

En el paso tres se estimó la cantidad de personal necesario para una semana de recolección, esta información se obtiene con la aplicación de la herramienta desarrollada, eliminando la incertidumbre de cuánto personal contratar. Así mismo, el aplicativo brindó el precio que se debe pagar por un kilogramo de café maduro recolectado, eliminando el empirismo con el que se fija este precio y dando un valor adecuado para el kilogramo de café de acuerdo a las variables que se detectaron, generando ahorros en los costos de la recolección de este fruto.

La asignación de personal se realizó en el cuarto paso, en el cual se aplicó un algoritmo genético con el fin de asignar el personal disponible. De esta manera, el algoritmo desarrollado logra una asignación que garantiza la recolección total de los frutos maduros, teniendo en cuenta la cantidad de personal disponible, el rendimiento de cada recolector, las características de cada lote, los horarios laborales y los días propuestos para la recolección del café maduro.

Para la validación de la metodología propuesta, se realizó la aplicación en una finca cafetera del Departamento de Caldas, Colombia. En donde se emplearon los cuatro pasos expuestos en cuatro casos de estudio. Los resultados obtenidos en la validación de la metodología fueron satisfactorios para la actual investigación, ya que se logró la reducción del costo de la recolección manual de café por medio de una correcta fijación del precio del kilogramo de café recolectado, la estimación adecuada de cuanto personal contratar, una óptima asignación del personal, la recolección total del café maduro en cada lote y garantizar las condiciones de calidad del producto.

Por último, se consiguió mantener la calidad del grano de café, ya que al ser recolectado el café maduro durante los 5 días que se fijan en la programación, no hay alteraciones en la calidad del fruto y se logra conservar las características de calidad. De esta manera, se concluye que la metodología propuesta logra cumplir con los objetivos definidos y valida la hipótesis de investigación planteada.

5 Futuras líneas de investigación y recomendaciones

1. Para darle más aplicabilidad a la metodología desarrollada, se recomienda investigar la recolección de café en otros países, ya que en la actual tesis doctoral se realizó una investigación del proceso de recolección de café en Costa Rica y se puede inferir que, aunque el proceso tenga grandes variaciones, la metodología propuesta puede ser adaptada fácilmente a necesidades propias de programación en la recolección manual de café en otros países. Adicional a esto, sería interesante analizar cómo se podría adaptar la metodología a otros cultivos agrícolas. Los principales resultados del trabajo de campo que se llevo a cabo en Costa Rica, se pueden ver a continuación:

Se visitaron 11 fincas cafeteras de diferentes zonas del país (en el anexo 9 se puede ver la información general de las fincas visitadas). Con estas visitas se pudo concluir que la metodología propuesta en la figura 31 se puede aplicar a la recolección manual de café en Costa Rica, si se realizan los siguiente cambios:

- Para la primera fase de la metodología se propuso un registro de floraciones con el fin de tener un pronóstico inicial de producción. Aunque en Costa Rica conocen el método para realizar este proceso, en la mayoría de fincas no se hace, por lo que lo primero que se recomienda es realizar este registro de floraciones.
- Para la segunda etapa de la metodología se desarrolló un ajuste al pronóstico inicial por medio de un muestreo en campo, con el fin de saber cuánta producción de café va a haber semana a semana. Actualmente en Costa Rica tienen una metodología para calcular la cantidad de café que se va a producir, pero este cálculo solo pronostica la cantidad de café total de la cosecha y no se tiene conocimiento de en qué semana qué frutos se deban recolectar; por lo que este ajuste al pronóstico inicial se recomienda realizarse semana a semana según se propuso en la actual metodología. La variación principal en este punto, sería el cambio en la forma en que se mide el café, ya que en Colombia actualmente se realiza la medición en todo el proceso del café en kilogramos, pero en Costa Rica realizan la medición en volumen, utilizando medidas como la cajuela (5 litros) y la fanega (20 cajuelas o 100 litros), por lo que si se siguieran utilizando estas medidas, el ajuste del pronóstico se realizaría en fanegas por lote.
- Para el tercer paso de la metodología propuesta se define la cantidad de personal necesario en una semana de recolección y el precio del kilogramo de café recolectado. Para la primera parte, que

es la definición de la cantidad de personal necesario, aplicaría de una manera óptima la metodología propuesta, ya que al tener la cantidad de fanegas que se esperan recolectar por lote semana a semana, solo se dividiría en el rendimiento promedio de un recolector, así como se realiza actualmente en la metodología propuesta en este trabajo, solo que convirtiendo las unidades de peso a volumen. Para la segunda parte, que es la definición del precio del kilogramo de café recolectado, se tendrían que hacer unos ajustes en la unidad de medida, ya que en Costa Rica les pagan a los recolectores de café en cajuelas (5 litros). En cuanto a las variables que se incluyeron en la actual metodología también habría que realizar varios ajustes, ya que en el trabajo de campo que se realizó en Costa Rica, solo se detectaron las variables de: Precio puesto por el Gobierno (este correspondería al precio de las fincas vecinas), precio por el que trabaja el recolector (este correspondería al precio piso) y cantidad de café en el lote.

- En la última fase de la metodología, que es la asignación de personal, habría que realizar ajustes en cuanto a las variables definidas en el punto anterior y en las medidas (convertir de peso a volumen). En la actualidad, en Costa Rica la mayoría de fincas no realizan esta asignación, solo comienzan la recolección de café desde un extremo de la finca y van realizando la labor en orden, sin tener en cuenta el estado de maduración de los frutos, por lo que para aplicar este paso los caficultores costarricenses tendrían que estar dispuestos a realizar la recolección simultánea en diferentes lotes.

Si bien para realizar una ágil aplicación de la metodología propuesta en esta tesis doctoral en Costa Rica se realizaría la modificación de la herramienta desarrollada, principalmente ajustando las variables detectadas y cambiando la forma en que miden el café (convertir de peso a volumen), se recomienda realizar las medidas en peso, es decir pasar a usar los kilogramos en el proceso, ya que es mucho más ágil y es una medida internacional que facilitaría no solo la aplicación de esta metodología, sino de otras herramientas que se han desarrollado en el sector. Cabe mencionar que utilizar la medida de volumen genera actividades adicionales en todo el proceso de la producción de café. Por ejemplo en el pago de los recolectores, al pagarles por cajuela (5 litros), deben posterior a la recolección medir todo su café recolectado en esta medida específica (figura 42).

Figura 42. Proceso de medir el café recolectado por un trabajador en cajuelas.



Fuente: Foto tomada de la finca “*La Canoa*”, Santo Domingo, Costa Rica.

Como última recomendación, se sugiere que los árboles de café de cada lote de las fincas cafeteras tengan las mismas características, es decir, las podas que se realicen en los lotes sean uniformes, ya que en algunas fincas costarricenses practican las podas selectivas (consiste en podar solo algunos árboles) y las podas por surcos (consiste en podar solo algunos surcos), lo que dificulta organizar labores y pronosticar la producción de café en un lote.

2. Por otra parte, y como futura línea de investigación adicional, se considera la adopción de esta metodología propuesta en la presente tesis con miras a aplicarla en otros procesos dentro de los trabajos agrícolas manuales, tal como la asignación de personal para la fertilización de los arboles de café.
3. Como línea de investigación complementaria, se propone el análisis de tecnologías para la estimación de la cosecha, con el fin de eliminar el muestreo en campo. Actualmente, están desarrollando tecnologías que por medio de drones identifican el color del fruto, lo que serviría para estimar la cantidad de cosecha de un lote, mucho más rápido. Así mismo, se podría identificar otro tipo de método para el pronóstico inicial, en donde se realice un registro de floraciones cuantitativo, el cual daría un dato más acertado a la realidad y no tan sujeto al conocimiento del encargado de la finca cafetera.
4. Adicional a esto y, aunque la herramienta seleccionada para la asignación de personal es eficiente según los objetivos propuestos, vale la pena

analizar y desarrollar otra metaheurística de las que fueron propuestas por los expertos entrevistados y observar si otros tipos de herramientas de programación pueden ser aplicables y eficientes para el actual problema.

5. A fin de ajustar más la metodología, se propone analizar las variables: edad del cultivo y la variedad sembrada, con el propósito de identificar como afectan estos aspectos en la programación de la recolección manual de café, y si incluirlos mejoraría los resultados expuestos.
6. Por otro lado, se recomienda la aplicación de la metodología propuesta a más fincas cafeteras de Colombia, ya que no solo serviría para tener unos resultados más generalizados, sino que retroalimentaría toda la investigación, con el fin de detectar algunas variables adicionales que puedan ser incorporadas o realizarles algunos cambios pertinentes a fin de lograr mayor flexibilidad en la metodología.
7. Como recomendación general, se sugiere aplicar la metodología propuesta según las necesidades de la finca, ya que la herramienta que se desarrolló brinda la facilidad de adaptarse a cada requerimiento particular; como por ejemplo, poder programar para la finca total o para agregados independientes, así mismo da la posibilidad de ingresar los lotes independientemente o realizarlo en conjunto.

6 Divulgación de resultados

La divulgación de resultados de la presente tesis doctoral se realizó mediante dos formas principalmente: la presentación de artículos científicos y la realización de ponencias nacionales e internacionales. Los artículos desarrollados se observan con detalle en la tabla 35 y las ponencias realizadas en la tabla 36.

Tabla 35. Artículos desarrollados en el actual trabajo investigativo.

Artículo	Revista	Clasificación	Estado
Algoritmos aplicados en la programación de las cadenas de suministros para minimizar costos. Revisión de literatura.	INGENIARE ISSN 1909-2458	C	Publicado
Variables que Influyen en la Programación de la Recolección Manual de Café en Zonas con Pendiente de Inclinación Superior a 20 %.	SEMILLEROS ISSN 2343-6395	No indexada	Publicado
Programación o planeación de actividades o recursos en la agricultura. Una revisión de literatura.	REVISTA EIA ISSN 1794-1237	A2	Publicado
Characterization of Colombian manual coffee harvesting as key input for operations and resources planning and scheduling.	AGRONOMÍA COLOMBIANA ISSN 0120-9965	B	Presentado
Metodología para la programación de la recolección manual de café con pendiente de inclinación superior al 20 %.	Por definir	Por definir	En elaboración

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 36. Ponencias realizadas en el actual trabajo investigativo.

Ponencia	Evento
Variables que Influyen en la Programación de la Recolección Manual de Café en Zonas con Pendiente de Inclinación Superior a 20 %.	X Simposio Internacional de Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias. Oberá, Argentina. Septiembre 27, 28 y 29 – 2017.
Programación o planeación de actividades o recursos en la agricultura. Una revisión de literatura.	IV Coloquio de Investigación Posgrado Ingeniería Industrial. Manizales, Colombia. Octubre 25 y 26 – 2017.
Programación o planeación de actividades o recursos en la agricultura. Una revisión de literatura.	Congreso Internacional Industria y Organizaciones – CIIO, Industria y Logística para el Desarrollo. Bogotá, Colombia. Agosto 02 y 03 – 2018.
How the variables related with coffee growing are affected by the slope and size of farms.	Production and Operations Management Society (POMS). Granada, Spain. October 22, 23 and 24 - 2018.
Asignación del recurso humano en la recolección manual de café, por medio de un algoritmo genético.	VI Congreso Internacional, Industria, Organizaciones y Logística – CIIO. Cartagena, Colombia. Agosto 22 y 23 – 2019.
Metodología para la programación de la recolección manual de café en Colombia. ¿Cómo se podría implementar en Costa Rica?	Conferencia presentada al Ministerio de Agricultura de Costa Rica, a la Universidad Nacional de Costa Rica y a Icafe. Heredia, Costa Rica. Noviembre 4 – 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Adicional a lo ya mencionado, se tiene como producto académico una tesis de pregrado en Ingeniería Industrial, del estudiante Ricardo Arcial Vélez.

7 Bibliografía

1. Abrahão, E., y Hirakawa, A. R. (Septiembre de 2018). Complex Task Ontology Conceptual Modelling: Towards the Development of the Agriculture Operations Task Ontology. *10th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management, IC3K 2018*, 2, 287-294. Conferencia llevada a cabo en Sevilla, España.
2. Acosta A., R., Oliveros T., C.E., Ramírez G., C.A., y Sanz U., J.R. (2007). Recolección de frutos de café caídos al suelo. *Cenicafé*, 57(4), 312-319. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
3. Álvarez V., J.A., Oliveros T., C.E., y Ramírez G., C.A. (2004). Evaluación de dos sistemas para el manejo de mallas en la cosecha manual del café. *Cenicafé*, 55(2), 130-135. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
4. Araque S., H., Oliveros T., C.E., Sanz U., J.R., y Ramírez G., C.A. (2006). Desempeño de vibradores portátiles del tallo en la cosecha del café. *Cenicafé*, 56(4), 339-347. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
5. Arnaout, J. P. M., y Maatouk, M. (2010). Optimization of quality and operational costs through improved scheduling of harvest operations. *International Transactions in Operational Research*, 17(5), 595-605. Doi: 10.1111/j.1475-3995.2009.00740.x
6. Arnold, J.R. T., y Chapman S. N. (2001). Introduction to Materials Management, 4ª ed., New Jersey, United States of America: Prentice-Hall, Inc.
7. Batista, B. M., y Glover, F. (2006). Introducción a la Búsqueda Tabú. *Rect@, Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 35, 1-36. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/profile/>
8. Batista, M. B. M., Pérez, J. A. M., y Vega, J. M. M., (2003). Metaheurísticas: Una visión global. *Inteligencia artificial: Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 7(19), 7-28. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/>
9. Beaudoin, D., Frayret, J., y Lebel, L. (2014). Hierarchical forest management with anticipation: an application to tactical–operational planning integration. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(8), 2198-221. Doi: 10.1139/X08-055

10. Bing, X., Fulin, W., Jiquan, W., y Shengxue, Z. (2017). Establishment and verification of labor demand estimation model in planting industry. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(6), 86-93. Doi: 10.25165/ijabe.20171006.3094
11. Brack, C. L., y McLarin, M. (2017). Strategic forest planning and operational decisions under uncertainty. *Australian Forestry*, 80(2), 69-77. Doi: <https://doi.org/10.1080/00049158.2017.1316444>
12. Brener, J. (2016). Elements Of Non Probabilistic Seminar. CASRO's great series of webinars. Recuperado de: <http://www.researchscape.com/>
13. Bueno, E. (1993). *Dirección Estratégica de la Empresa. Metodología, técnicas y casos*, 4ª ed., Madrid, España: Pirámide.
14. Buffa, E. S., y Sarin R. K. (1987). *Modern Production/ Operations Management*, 8ª ed., New York, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
15. Burke, E. K., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Özcan, E., y Woodward, J. R. (2010). A classification of hyper-heuristic approaches. *In Handbook of metaheuristics*, 146, 449-468. Doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_15
16. Carvajal, J., Aristizábal, I., Oliveros, C. y Mejía, J., (2011). Colorimetría del Fruto de Café (*Coffea arabica* L.) Durante su Desarrollo y Maduración. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 64(2), 6229-6240. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co>.
17. Castañeda B., J.A., Montoya R., E.C., Oliveros T., C.E., y Velez Z., J.C. (2014). Evaluación de un método para la recolección de café en terrenos de alta pendiente. *Cenicafé*, 62(1),32-47. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
18. Castrillón, O.D., Giraldo, J.A., y Sarache, W.A. (2009). Solución de un problema Job Shop con un agente inteligente. *Ingeniería y Ciencia*, 5(10), 75-92. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/835/83512335004.pdf>
19. Castrillón, O.D., Giraldo, J.A., y Sarache, W.A. (2009). Técnicas de programación de la producción. Aplicación en ambientes job shop, Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia.
20. Chankong, V., y Haimes, Y. Y. (1983). *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*, New York, Estados Unidos: Elsevier-North Holland.

21. Chapman, S. N. (2006). *Planeación y control de la producción*, 1ª ed., Naucalpan de Juárez, México: PEARSON Educación.
22. Chase, R. B., y Aquilano, N. J. (1995). *Dirección y Administración de la producción y de las operaciones*, México D.F., México: IRWIN
23. Chase, R.B., y Jacobs, F.R. (2014). *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES, Producción y cadena de suministro*, México D.F., México: MacGraw-Hill/Education
24. Chase, R.B., Jacobs, F.R., y Aquilano, N. J. (2006). *Operations management for competitive advantage*, 10ª ed., New York, United States of America: MacGraw-Hill/Irwin.
25. Chiavenato, I. (2007). *Administración de recursos humanos. El capital humano de las organizaciones*, 8ª ed., México D.F., México: McGraw-Hill, Interamericana.
26. Colomi, A., Dorigo, M., y Maniezzo, V. (1991). Distributed Optimization by Ant Colonies. In: Varela, F. y Bourgine, P., Eds., *Proceedings of the European Conference on Artificial Life, ECAL'91*, Paris, Francia: Elsevier Publishing.
27. Corner, J. L., y Foulds, L. R. (2005). Scheduling the Harvesting Operations of a Forest Block: A Case Study. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 22(03), 377-390. Doi: 10.1142/S0217595905000674
28. Cunha, J. P., Silva, F. M. D., Andrade, E. T. D., y Carvalho, L. C. (2016). Modeling of operational performance parameters applied in mechanized harvest of coffee. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(10), 946-952. Doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n10p946-952
29. Das, I., y Dennis, J. (1998). Normal-boundary intersection: A new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. *SIAM J. Optimization*, 8(3), 631-657. Doi: 10.1137/S1052623496307510
30. Davis, M.M., Aquilano, N.J., y Chase, R.B. (2001). *Fundamentos de Dirección de Operaciones*, 3ª ed., Madrid, España: MacGraw-Hill/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.U.
31. De Lima, R.B., Aparicio, P.D., Caraciolo Ferreira, R.L., Da Silva, W.C., Guedes, M.C., De Oliveire, C.P., Silva da Silva, D.A., y Bernardina Batista, A.P. (2014). Volumetry and classification of production capacity for *Mora paraensis* (Ducke) in Amapa estuary. *SCIENTIA FORESTALIS*, 42(101), 141-154. Recuperado de: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143196200>

32. Deb, K. (2001). *Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
33. Deb, K., y Agrawal, R. B. (1995). Simulated binary crossover for continuous search space. *Complex Syst*, 9,115–148. Doi: 10.1.1.26.8485
34. Deb, K., y Agrawal, S. (1999). A niched-penalty approach for constraint handling in genetic algorithms, *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms (ICANNGA-99)*, 235–243, Springer-Verlag.
35. Deb, K., y Jain, H. (2014). An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 18(4), 577–601. Doi:10.1109/tevc.2013.2281535
36. Dinero. (22 de Noviembre de 2018). Caficultore podrán ser más rentables con nueva máquina derribadora de café. *Dinero*. Recuperado de <https://www.dinero.com>
37. Domínguez Machuca, J. A., Álvarez Gil, M.J., García Gonzáles, S., Domínguez Machuca, M.A., y Ruíz Jiménez, A. (1995). *Dirección de operaciones: aspectos estratégicos en la producción y los servicios*, Madrid, España: McGraw-Hill.
38. Domínguez Machuca, J. A, García Gonzáles, S., Domínguez Machuca, M.A., Ruíz Jiménez, A., y Álvarez Gil, M.J. (1995). *Dirección de operaciones: aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, Madrid, España: McGraw-Hill.
39. Dowsland, K.A., y Adenso-Díaz, B. (2003). Heuristic design and fundamentals of the Simulated Annealing. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 7(019), 93-102. Recuperado de: <http://www.aepia.org/revista>
40. Duque O., H. (2005). Caracterización socioeconómica de la mano de obra empleada en la cosecha de café, en cuatro municipios de Caldas. *Cenicafé*, 55(4), 302-316. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
41. Duque O., H., y Cháves C., B. (2003). Probabilidad de retorno de la mano de obra para la recolección de café en la zona central de Caldas. *Cenicafé (Colombia)* v. 54 (2) , 162-178. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
42. Duque O., H., y Dussán, L. C. (2004). Productividad de la mano de obra en la cosecha de café en cuatro municipios de la región cafetera central de

Caldas. *Cenicafé (Colombia)* v. 55 (3), 246-258. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>

43. Eakin, H., Bojórquez-Tapia, L. A., Diaz, R. M., Castellanos, E., y Hagggar, J. (2011). Adaptive capacity and social-environmental change: theoretical and operational modeling of smallholder coffee systems response in Mesoamerican Pacific Rim. *Environmental management*, 47(3), 352-367. Doi: 10.1007/s00267-010-9603-2
44. Essence of Coffee. (26 de Septiembre de 2016). Brasil: el gigante del café, Radiografía del mayor productor de café del mundo. *Essence of Coffee*. Recuperado de <http://www.essenceofcoffee.net>
45. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2019). *¿Qué hace único al café de Colombia? Al Grano*. (32). Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado de <https://www.federaciondecafeteros.org/>
46. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2019). *Informe de gestión 2018*. Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado de <https://www.federaciondecafeteros.org/>
47. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2016). *Informe de Gestión 2016 - Comité Departamental de Cafeteros de Caldas*. Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado de: <http://www.recintodelpensamiento.com/>
48. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2015). *¿Qué hace único al café de Colombia? Al Grano*. (32). Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado de <https://www.federaciondecafeteros.org/>
49. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2014). *Informe de Comités Departamentales*. Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado de <https://www.federaciondecafeteros.org/>
50. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2010 - 2014). *Nuestro Café*. Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado de <https://www.federaciondecafeteros.org/>
51. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2010). *Café de Colombia*. Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado de <http://www.cafedecolombia.com/>
52. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2001). *Indicadores de rendimiento de la caficultura*. Colombia: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Recuperado de <http://biblioteca.cenicafe.org/>

53. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1993). Categorías de zonas por pendiente. *Cenicafé*, Información interna. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
54. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (1993). Boletín informativo sobre la broca de café. *Cenicafé*, 5. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
55. Fernández, E., Avella, L., y Fernández, M. (2003). *Estrategia de producción*, Madrid, España: McGraw-Hill.
56. Ferrer, J. C., Mac Cawley, A., Maturana, S., Toloza, S., y Vera, J. (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations. *International Journal of Production Economics*, 112(2), 985-999. Doi: 10.1016/j.ijpe.2007.05.020
57. Fogarty, D. W., Hoffmann, T. R., y Stonebraker P. W. (1989). *Production and Operations Management*, Cincinnati, United States of America: South-Western Publishing Co.
58. Fórum Cultural del Café. (2018). El café de Vietnam. *Fórum Cultural del Café*. Recuperado de <https://www.revistaforumcafe.com/vietnam>
59. Foulds, L. R., y Wilson, J. M. (2005). Scheduling operations for the harvesting of renewable resources. *Journal of food engineering*, 70(3), 281-292, Doi: 10.1016/j.jfoodeng.2003.12.009
60. Foulds, L. R., y Zhao, X. D. (2007). A Decision Support System for sustainable maize harvesting operations scheduling. *International Journal of Business Information Systems*, 2(4), 372-391. Doi: 10.1504/IJBIS.2007.012541
61. Fu, E., Fang, Y., y Horn, B. (2018). Smart city: Evaluation of intelligent agents. *4th International Conference on Universal Village (UV)*. Doi: 10.1109/UV.2018.8709307
62. Gaither, N. y Frazier, G. (2000). *Administración de la producción y operaciones*. 8ª ed., México, D.F., México: International Thomson Editores.
63. Gallego, R. A., Escobar, A. H. y Romero, R. A. (2006). *Técnicas de Optimización Combinatorial*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 19-77.
64. García U., F., Oliveros T., C.E., Álvarez M., F., y Aristizabal T., I.D. (2003). Desarrollo de un sistema de acople eficiente y de bajo daño mecánico para

- los vibradores inerciales del tallo del cafeto. *Cenicafé* , 54(2), 97-109. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
65. Gautam, S., LeBel, L., y Beaudoin, D. (2017). A hierarchical planning system to assess the impact of operational-level flexibility on long-term wood supply. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(4), 424-432. Doi: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0264>
 66. Glover, F., y Laguna, M. (1997). *Tabu Search*, Boston, Estados Unidos: Kluwer Academic Publishers.
 67. Gobierno de Caldas. (2016). Caldas Territorio de Oportunidades, Plan Departamental de Desarrollo. Recuperado de <http://www.gobernaciondecaldas.gov.co/>
 68. Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston, Estados Unidos: Addison-Wesley.
 69. Greeff, G., y Ghoshal, R. (2004). *E-Manufacturing and Supply Chain Management*, Oxford, Inglaterra: Elsevier.
 70. Guan, S., Nakamura, M., Shikanai, T., y Okazaki, T. (2008). Hybrid Petri nets modeling for farm work flow. *Computers and electronics in agriculture*, 62(2), 149-158. Doi: 10.1016/j.compag.2007.12.006
 71. Hanke, J.E., y Reitsh, A.G. (1996). *Pronósticos en los negocios*. 5ª ed., Naucalpan de Juárez, México: PEARSON Educación.
 72. Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior; a neuropsychological theory*. New York: Wiley.
 73. Heizer, J. y Render, B. (2015). *Dirección de la Producción y de Operaciones: Decisiones Tácticas*. 11ª ed., Madrid, España: PEARSON Educación.
 74. Hill, A., y Hill, T. (2012). *Operations Management*. 3ª ed., Basingstoke, Inglaterra: Palgrave Macmillan.
 75. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. 2ª ed., University of Michigan Press, Ann Arbor.
 76. International Coffee Organization. (2019). *Country data in the global coffee trade*. Londres: International Coffee Organization. Recuperado de <http://www.ico.org/>
 77. Isaza G., L.E., Montoya R., E.C., Velez Z., J.C., y Oliveros T., C.E. (2007). Evaluación de la concentración de los frutos maduros de café empleando

- técnicas no selectivas de recolección manual. *Cenicafé*, 57(4), 274-287. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
78. Jebari, K., Madiafi, M., y Elmoujahid, A. (2014). Solving Poisson Equation by Genetic Algorithms. *International Journal of Computer Applications*, 83(5), 1-6. Doi:10.5120/14441-2597
 79. Kirkpatrick, S., Gelatt Jr., C.D., y Vecchi, M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220 (4598), 671-80. Doi: 10.1126/science.220.4598.671
 80. Kothari, C.R. (2004). *Research methology, Methods and Techniques*. Nueva Delhi. India. New Age International Publishers.
 81. Krajewski, L.J., Malhotra, M.K., y Ritzman, L.P. (2016). *Operations Management: Processes and Supply Chains*, 11ª ed., Harlow, Inglaterra: PEARSON Educación.
 82. Kramer, O. (2017). *Genetic Algorithms. In: Genetic Algorithm Essentials. Studies in Computational Intelligence*, vol. 679. Springer.
 83. Larrañeta, J.C., Onieva, L., y Lozano, S. (1995). *Métodos modernos de gestión de la producción*, Madrid, España: Alianza Editorial, S.A.
 84. Lohr, S. L. (2010). *Sampling: Design and analysis*. Boston, USA: Brooks/Cole.
 85. Londoño H., D., Oliveros T., C. E., y Moreno S., M. A. (2002). Desarrollo de una herramienta manual para asistir la recolección de café en Colombia. *Cenicafé*, 53(2), 93-105. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
 86. López D., D.C., Montoya R., E.C., Isaza G., L.E., y Oliveros T., C.E. (2007). Contribución de los componentes del método mejorado de cosecha en el desempeño operativo de los recolectores de café. *Cenicafé*, 57(3), 187-197. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
 87. López F., H.A., Oliveros T., C.E., y Ramírez G., C.A. (2007). Disminución del costo unitario de la cosecha de café con el empleo de un método de recolección manual asistido. *Cenicafé*, 57(4), 262-273. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
 88. López F., H.A., Ramírez G., C.A., Oliveros T., C.E., y Sanz U., J.R. (2009). Aroandes una tecnología para la cosecha manual de café con alta calidad. *Cenicafé*, 59(4), 283-294. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>

89. López F., H.A., Roa M., G., y Parra C., A. (2007). Evaluación del equipo Aroandes un prototipo para la cosecha manual asistida de café. *Cenicafé*, 57(3),208-219. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
90. Martínez R., R.A., Montoya R., E.C., Vélez Z., J.C., y Oliveros T., C.E. (2005). Estudio de tiempos y movimientos de la recolección manual del café en condiciones de alta pendiente. *Cenicafé*, 56(1), 50-66. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
91. McCarthy, J. (1956). Dartmouth Summer Research Conference on Artificial Intelligence. *Dartmouth College*.
92. McCulloch, W. S., y Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115-133. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02478259>
93. Ministerio del Trabajo. (1951). Código Sustantivo del Trabajo. Ministerio del Trabajo. Recuperado de <http://www.mintrabajo.gov.co/normatividad/leyes-y-decretos-ley/codigo-sustantivo-del-trabajo>
94. Michalewicz, Z. (1992). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, New York, Estados Unidos: Springer-Verlag.
95. Miranda González, F.J., Rubio Lacoba, S., Chamorro Mera, A., y Bañegil Palacios, T. M. (2006). *Manual de Dirección de Operaciones*, Madrid, España: Thomson Editores.
96. Monett, D., y Burkhard, H. D. (2004). Problemas Inversos, Técnicas Evolutivas y Agentes Inteligentes: Estrechando las Fronteras. *RASI*, 1(1), 29-34. Recuperado de https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/27954860/monettthans-dieter04.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1538165062&Signature=DLUs6LW6IAp1tIDGadTfYFnST8%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DProblemas_Inversos_Tecnicas_Evolutivas_y.pdf
97. Navarra, P.L., y Martínez., J.A. (2006). *Agentes inteligentes en la búsqueda y recuperación de información*. 2ª ed., Barcelona, España: Editorial planeta.
98. Oliveros T., C.E., Álvarez V., J.A., Ramírez G., C.A., Sanz U., J.R., Moreno C., E.L., y Peñuela M., A.E. (2013). Cosecha manual de café utilizando mallas plásticas. *Cenicafé*, Avances Técnicos No. 354, 8. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>

99. Oliveros T., C.E., Medina R., R.D., y Tibaduiza V., C.A. (2015). Evaluación de un dispositivo manual en la recolección de frutos de café caídos al suelo. *Cenicafé*, 65(2), 33-41. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
100. Oliveros T., C.E., Ramírez G., C.A., Buenaventura A., J.D., y Sanz U., J.R. (2015). Diseño y evaluación de una herramienta para agilizar la cosecha manual del café. *Cenicafé*, 56(1), 37-49. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
101. Ooster, A., Bontsema, J., van Henten, E. J., y Hemming, S. (2013). Sensitivity analysis of a stochastic discrete event simulation model of harvest operations in a static rose cultivation system. *Biosystems engineering*, 116(4), 457-469. Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2013.10.009
102. Ooster, A., Bontsema, J., van Henten, E. J., y Hemming, S. (2015). Model-based analysis of skill oriented labour management in a multi-operations and multi-worker static cut rose cultivation system. *Biosystems Engineering*, 135, 87-102. Doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.04.014
103. Padilla-Navarro, C., González-Reyna, S. E., Aguilera-Gonzalez, G., Ortega-Yepey, M., Bombela-Jiménez, S., Rangel-Huerta, M., y Ramírez, C. L. (2017). Algoritmos genéticos aplicados a la optimización de características en la clasificación de arritmias cardíacas utilizando los clasificadores KNN y naive Bayes. *Research in Computing Science*, 134, 55-68. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/95e9/9dc090fbc378bbfec1b52336ff64d80c5244.pdf>
104. Palencia López, F.O., Olivero Tascón, C.E., y Álvarez Mejía, F. (2002). Cosecha manual de café con asistencia neumática. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 55(1), 1385-1393. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/>
105. Pardo, G., Riravololona, M., y Munier-Jolain, N. M. (2010). Using a farming system model to evaluate cropping system prototypes: Are labour constraints and economic performances hampering the adoption of Integrated Weed Management?. *European Journal of Agronomy*, 33(1), 24-32. Doi: 10.1016/j.eja.2010.02.003
106. Ramírez G., C.A., Buenaventura A., J.D., Oliveros T., C.E. y Sanz U., J.R. (2014). Equipo para la recolección manual de café Canguaro 2M: Experiencia de investigación participativa. Manizales. *Cenicafé*, Avances Técnicos No. 438, 8. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
107. Ramírez G., C.A., Oliveros T., C.E., Sanz U., J.R., Acosta A., R., y Buenaventura A., J.D. (2006). Desgranador mecánico portátil para la cosecha del café Descafé. *Cenicafé*, 57(2), 122-131. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>

108. Render, B. y Heizer, J. (2014). *Principios de Administración de Operaciones*. 9ª ed., Naucalpan de Juárez, México: PEARSON Educación.
109. Resop, J.P., Fleisher, D.H., Timlin, D.J., y Reddy, V.R. (2014). Biophysical Constraints to Potential Production Capacity of Potato across the US Eastern Seaboard Region. *AGRONOMY JOURNAL*, 106(1), 43-56. Doi: 10.2134/agronj2013.0277
110. Robledo, J. (2005). Diseños de Muestreo (II). *Nure Investigación*, 12, 1-7. Recuperado de: <http://www.nureinvestigacion.es/>
111. Robles-Algarín, C.A. (2011). Optimización por colonia de hormigas: aplicaciones y tendencias. *Ing. Solidar*, 6(10-11), 83-89. Recuperado de: <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/article/view/454>
112. Russell, S. J., y Norvig, P. (2004). *Inteligencia Artificial: un enfoque moderno*. Printice Hall. México. Segunda edición.
113. Schwefel, H-P. (1987). 'Collective phenomena in evolutionary systems', in Checkland, P. and Kiss, I. (Eds.): Problems of Constancy and Change – the Complementarity of Systems Approaches to Complexity. *International Society for General System Research*, 1025–1033. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/216301411_Collective_phenomena_in_evolutionary_systems
114. Shepherd, A.W. (2001). Interpretación y Uso de la Información de Mercados. Italia: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Recuperado de <http://www.fao.org>
115. Skinner, W. (1969). Manufacturing - Missing Link in Corporate Strategy. *Harvard Business Review*.
116. Skinner, W. (1974). The focused factory. *Harvard Business Review*. (113-121).
117. Sopegno, A., Busato, P., Berruto, R., y Romanelli, T. L. (2016). A cost prediction model for machine operation in multi-field production systems. *Scientia Agricola*, 73(5), 397-405. Doi: 10.1590/0103-9016-2015-0304
118. Steven, A., Cerdeño, D. G., y Robles, S. (2018). The Power of Genetic Algorithms: what remains of the pMSSM?, *arXiv:1805.03615v1*, 1-40. Recuperado de: <https://arxiv.org/pdf/1805.03615.pdf>
119. Thangavadivelu, S., y Colvin, T. S. (1997) Fuzzy-Logic-Based Decision Support System for Scheduling Tillage Operations. *Engineering Applications*

of *Artificial Intelligence*, 10 (5), 463-472. Doi:
[http://dx.doi.org/10.1016/S0952-1976\(97\)00023-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0952-1976(97)00023-7)

120. Trochim, W. (2006). Nonprobability Sampling. Research Methods Knowledge Base. Recuperado de: <https://www.socialresearchmethods.net/>
121. Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 433-460. Doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6710-5_3
122. Universidad de Antioquia. (2016). Muestreos no probabilísticos. Recuperado de: <http://aprendeonline.udea.edu.co/>
123. Van Wyk, S. P., y Hattingh, H. S. (1964). Labour Planning of a Diversified Farm on the Transvaal Highveld. *Agrekon*, 3(1), 20-31. Doi: 10.1080/03031853.1964.9524453
124. Vélez Z., J.C., Montoya R., E.C., y Oliveros T., C.E. (1999). Estudio de tiempos y movimientos para el mejoramiento de la cosecha manual del café. *Cenicafé*, Boletín Técnico No. 21, 91. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
125. Villegas B., M. J., Montoya R., E.C., Velez Z., J.C., y Oliveros T., C.E. (2005). Desempeño de los recolectores de café según la altura de la plantación. *Cenicafé*, 56(1),19-36. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
126. Vollmann, T.E., Berry, W.L., Whybark, D.C., y Jacobs, F.R. (2005). *Manufacturing Planning & Control Systems for Supply Chain Management*. 5ª ed., New York, United States of America: MacGraw-Hill.
127. Walker, H. D., y Preiss, S. W. (1988). Operational Planning Using Mixed Integer Programming. *The Forestry Chronicle*, 64(6), 485 – 488. Doi: <https://doi.org/10.5558/tfc64485-6>
128. Wallis G., J. A., Montoya R., E.C., Velez Z., J.C., y Oliveros T., C.E. (2004). Calidad y eficacia de dos métodos no selectivos de recolección manual de café *Coffea arabica*. *Cenicafé*, 55(1),45-51. Recuperado de: <http://biblioteca.cenicafe.org/>
129. Weintraub, A., y Romero, C. (2006). Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: a review and comparison. *Interfaces*, 36(5), 446-457. Doi: 10.1287/inte.1060.0222
130. Wijngaard, P. J. (1988). A heuristic for scheduling problems, especially for scheduling farm operations. *European journal of operational research*, 37(1), 127-135. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(88\)90287-1](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(88)90287-1)

131. Wishon, C., Villalobos, J. R., Mason, N., Flores, H., y Lujan, G. (2015). Use of MIP for planning temporary immigrant farm labor force. *International Journal of Production Economics*, 170, 25-33. Doi: 10.1016/j.ijpe.2015.09.004
132. Wu, C., Zhao, J., Wang, J., Zhou, L., y Cai, Y. (2015). Model and system for cotton-picker operation scheduling. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2015*, 6, 4574-4580. Doi: 10.13031/aim.20152190305
133. Zitzler, E., y Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), 257–271. Doi: 10.1109/4235.797969

8 Glosario

Agregado: Se hace referencia a la persona que lidera un grupo de recolectores de café, en su mayoría el agregado cuenta con casa independiente dentro de la finca cafetera y se encarga de la supervisión de los recolectores a cargo.

Caras: Cuando se habla de una cara del árbol de café, se refiere a un solo lado, en la recolección de café se hace mención a la recolección por caras, la cual consiste en primero tomar todo el café de un lado de los árboles de todo el surco y posteriormente, realizar la recolección de la otra cara.

Coco: Recipiente en su mayoría de plástico, que se utiliza para la recolección del grano de café.

Coffea arabica: Es una especie cultivada para la producción de café.

Estopas o costal: Se hace referencia a sacos, que en su mayoría en las fincas cafeteras se utilizan para empacar el café ya sea en grano fresco o seco, pueden venir de diferentes materiales, pero los más utilizados en el café fresco son los de poliéster y para el café seco son de cabuya.

Lote: Es una porción de terreno que puede ser utilizada de diferentes formas, para el caso de las fincas cafeteras de Colombia, en su mayoría están compuestas por varios lotes sembrados en café, los cuales tienen diferentes características de siembra.

Rolos: Movimiento que se realiza sobre el árbol de café en el momento de la recolección. Cuando se habla de que la recolección se realiza en rolo, se refiere a que el recolector toma todo el café de un árbol, dándole la vuelta completa, antes de seguir con el siguiente.

Serpentín o banderín: Es un método de recolección de café el cual usa una bandera con el fin de indicar el siguiente surco de café que está libre para ser recolectado, y de esta manera los operarios saben a qué surco dirigirse una vez terminado el anterior.

Surco: Se hace referencia a una línea de café sembrado, esto quiere decir que es la hilera de árboles de punta a punta del lote, demarcados por la densidad de siembra.

Zoqueo: Es la poda completa del árbol de café, solo se deja algunos centímetros de tronco.

9 Anexos

9.1 Anexo 1. Tipos de muestreo no probabilístico.

Autores como Brener (2016), Kothari (2004), Robledo (2005) y Trochim (2006), describen los tipos de muestreo no probabilístico de la siguiente manera:

- Muestreo deliberado por conveniencia: Se hace una selección de elementos particulares que permitan representar la población basados en la facilidad de acceso.
- Muestreo deliberado por juicio: Se seleccionan los elementos que se consideran representativos basados en el juicio del investigador y el tipo de investigación a realizar.
- Muestreo por cuotas: Se realiza a criterio del investigador, y se realiza por estratos donde el tamaño de cada estrato es proporcional al tamaño del estrato en la población.
- Muestreo por moda: Se realiza el muestreo al caso más típico (la moda) por conocimiento de la población general.
- Muestreo experto: Se realiza a personas que son expertas en determinada área, como un panel de expertos, con la ventaja de que se tiene la experiencia en ciertos campos, sin embargo, los expertos podrían equivocarse en algunos datos o generar ciertos sesgos.
- Muestreo por cuotas no proporcional: Es menos restrictivo y se especifican el número mínimo de unidades que se quieren en cada estrato o categoría, asegurando que los grupos pequeños consultados son adecuadamente representativos.
- Muestreo bola de nieve: Se identifica alguien que cumpla con el criterio de inclusión en el estudio, y se le pregunta al sujeto que recomiende otros que cumplan el criterio, se suele hacer con poblaciones que son inaccesibles o difíciles de encontrar.
- Muestreo consecutivo: Se asimila al muestreo por conveniencia, la diferencia es que busca incluir todos los sujetos accesibles como parte de la muestra, y se considera la mejor muestra no probabilística, ya que permite hacer una muestra más representativa.

9.2 Anexo 2. Instrumento detallado para la recolección de datos en campo.

Fincas (se describen los aspectos generales de las fincas)

- Nombre de la Finca
- Nombre del encuestado
- Cargo del encuestado
- Número de hectáreas sembradas
- Ubicación
- Altitud
- Pendiente (%)
- Clima (°C)
- Variedad de café cultivado
- Cantidad de lotes
- Número de administradores
- Número de agregados
- (%) de humedad
- ¿Se hace registro de floraciones?
- ¿Se hace repase final de lotes?

Problemas (se identifica información relacionada con problemas generales del sector cafetero y se especifica sobre algunos encontrados en las fincas)

- ¿Cuáles de los siguientes problemas generales se ven en el sector cafetero?
- ¿Cuáles de los siguientes problemas relacionados con la recolección y la programación de la recolección de café ha visto en su finca?
- ¿Cómo podría mejorar la recolección y la programación de la recolección de café en la finca?
- De los siguientes problemas con recolectores, ¿cuáles ha tenido?
- ¿Cómo podría mejorar los problemas relacionados con los recolectores?
- ¿Qué equipos relacionados con la recolección de café usa actualmente?
- De los siguientes problemas ambientales, ¿Cuáles considera que afectan su finca?
- De las siguientes actividades, ¿Cuáles cree usted que mejorarían los problemas ambientales

Planeación (se recolecta información sobre la manera de planear la recolección de café, cantidad y asignación de mano de obra a contratar, cálculo del precio a pagar a los trabajadores, condiciones para recolectar y errores cometidos)

- De las siguientes actividades, ¿Cuáles realiza para planear la recolección de café?

- ¿Cómo selecciona a los recolectores?
- ¿De qué depende la cantidad de recolectores a contratar?
- ¿Cómo se asignan los surcos a los recolectores?
- ¿Cómo priorizan los lotes a ser recolectores?
- ¿Cómo se establece el precio a pagar por kilo recolectado?
- ¿Qué porcentaje de maduración deben tener los árboles de un lote para ser recolectados?
- ¿Qué errores ha cometido al programar la recolección de café?

Lotes (se recolecta información relacionada con el lote a analizar)

- Nombre del lote
- Número de hectáreas
- Cantidad de operarios
- Pendiente
- Número de cosecha
- Densidad de siembra (árboles/hectárea)
- zoqueos o podas hechas
- Altura promedio de árboles (cm)
- Tiempo transcurrido desde la floración
- Apreciación de la flora
- Número de pases realizados al año
- Distancia entre surcos (cm)
- Distancia entre árboles (cm)
- Precio pagado por Kg (\$)
- Observaciones

Operarios (información relacionada con los trabajadores y su manera de recolectar en el lote analizado)

- Nombre del operario
- Género
- Edad
- Años de experiencia
- Desplazamientos en el surco
- Movimientos en el árbol
- Movimiento en rama
- Cantidad recolectada por día en cosecha (rendimiento)
- ¿Cómo es la calidad del recolector (% de frutos verdes recolectados)?
- ¿Cómo son las pérdidas (número de frutos dejados en el suelo)?
- ¿Cómo es la eficacia (número de frutos dejados en el árbol)?

9.3 Anexo 3. Profesores expertos en herramientas de programación, con la información de sus estudios y la respuesta que dio cada uno en la entrevista realizada.

1. Profesor: ELKIN RODRÍGUEZ VELÁSQUEZ - Profesor Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Doctorado Old Dominion University

Ph.D. in Engineering Management

Enero de 2008 – Agosto de 2011

Título de la tesis: RANDOM KEYS GENETIC ALGORITHMS SCHEDULING AND RESCHEDULING SYSTEM FOR COMMON PRODUCTION SYSTEMS

Maestría/Magister UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN

Maestría En Ingeniería de Sistemas

Enero de 1998 - de 2000

Título de la tesis: SECUENCIACIÓN DE TRABAJO DE PLANTA MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

Pregrado/Universitario UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN

Ingeniería Industrial

Enero de 1989 - de 1997

Título de la tesis: ALGORITMOS SISTEMATIZADOS DE SECUENCIACIÓN DE PRODUCCIÓN

Respuesta: “Depende del tamaño del problema, si el tamaño máximo, es fácil de modelar y de dimensionar, aplicar la modelación entera o lineal, ya que son técnicas óptimas de programación, en donde se entregará la solución óptima. Si el problema es de tamaño pequeño intentar ingresarlo en un software, como wingo. Mirar la finca más grande a la que se pretende aplicar esta metodología. Si no alcanza en un solver, usar metaheurísticas, recomiendo que si el tamaño no es muy grande, se apliquen genéticos, esto depende mucho del tiempo que tengo para correrlo, porque si tengo muy poco tiempo, no alcanzo a tener la solución lista cuando se necesite”.

El profesor Elkin, recomienda Algoritmos genéticos, si se tiene el suficiente tiempo para correr el algoritmo, ya que el genético es más lento, si no se cuenta con el suficiente tiempo, recomienda usar otro. El profesor menciona que este algoritmo se puede usar fácilmente en problemas de asignación. Así mismo, el profesor se refiere a la búsqueda tabú, como una buena herramienta, si de pronto el algoritmo genético tarda mucho.

Por último, menciona que si se tiene alrededor de 800 trabajadores, muy seguramente se vaya por una herramienta metaheurística, y sugiere comparar dos herramientas, con el fin de ver resultados y tiempo de ejecución.

2. Profesor: JAIME ANTERO ARANGO MARÍN – Profesor titular del Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Doctorado UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE
MANIZALES

Doctorado en Ingeniería

Agosto de 2010 – Agosto de 2016

Título de la tesis: Mejora de tiempos de entrega en un Flow Shop híbrido flexible usando técnicas inteligentes. Aplicación a la industria de tejidos técnicos.

Maestría/Magister UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
maestría en investigación operativa y estadística

Mayo de 2006 – Octubre de 2009

Título de la tesis: Determinación de la mezcla óptima de productos para la compañía Textiles Omnes S. A.

Especialización UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE
MANIZALES

Especialización en Administración de Sistemas Informáticos

Febrero de 1995 – Febrero de 2000

Pregrado/Universitario UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
ingeniería industrial

Julio de 1979 – Junio de 1986

Título de la tesis: Diagnóstico de las Microempresas de Confecciones en la ciudad de Pereira.

Respuesta: “El problema que menciona, es de asignación generalizada, ya que se pueden tener más trabajadores que tareas o más tareas que trabajadores. Es importante mencionar, que al no ser estándar el lote de la finca, y al tener una variación en cuanto a las características de los trabajadores, esto afectará en los tiempos que se demora un trabajador en realizar la recolección. Se recomienda, realizar una clasificación “abc” de los trabajadores y asignar un rendimiento esperado en cada categoría. Este tipo de problema es no polinomial, es decir, que crecen exponencialmente la cantidad de soluciones, así como la complejidad, de acuerdo a la cantidad de lotes y número de trabajadores. Por esto, no se puede tomar como un problema lineal, es más, solo el hecho que es un problema de asignación, quiere decir que no es exacto, si no, que es binario, por lo que no se puede resolver con un método simplex. Otras herramientas como la de Branch and balance, puede ser una herramienta que de una buena solución a este problema, pero son muy ineficientes, se demoran mucho, por lo que no sirve para una programación semanales. De acuerdo a esto, los tipos de herramientas que aconsejo, son las metaheurística, ya que busca una solución más completa. Las metaheurísticas flexibles, son las que recomiendo, de

tipo algoritmo genético; en general, los algoritmos poblacionales o evolutivo serán una buena herramienta para este problema, porque se renueva en cada generación y dan muy buenas soluciones en tiempos óptimos. La Colonia de Hormigas, no la recomiendo porque es muy limitada en ruteo. Creo que la que mejor aplica para este problema es el algoritmo genético”.

3. Profesor: OMAR DANILO CASTRILLÓN GÓMEZ – Profesor titular del Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Doctorado UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA -
INTERNACIONAL

Bioingeniería con énfasis en Bioelectrónica

Febrero de 1999 - de 2004

Título de la tesis: Método para discriminación entre voces normas y disfuncionales, basado en la selección efectiva de parámetros acústicos de la voz. Aplicación en la población de la zona centro de Colombia.

Especialización UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

Educación Personalizada

Enero de 1998 - de 1998

Título de la tesis: Diseño de una reforma curricular para la Ingeniería telemática.

Especialización UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE
MANIZALES

Especialización En Alta Gerencia Con Énfasis en Calidad.

Enero de 1996 - de 1997

Título de la tesis: Costos de la No calidad.

Pregrado/Universitario UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MANIZALES
Ingeniería de Sistemas

Enero de 1988 - de 1993

Título de la tesis: Diseño de un Sistema para el almacenamiento y distribución del café en Colombia.

Respuesta: “ Recomiendo por facilidad de programación, el algoritmo aleatorio, que consiste en poner gente al azar, considerando todo las posibles soluciones y encontrando una óptima. Con esta herramienta se podrán sacar todas las posibilidades de costos para este problema. Además de esto, como lo había mencionado, es muy sencillo y fácil en el tema de la programación. El algoritmo genético, es otra herramienta que recomiendo para este problema, cuando se tenga más experiencia en programación. El Solver de Excel, es una herramienta que esta definida y valdría la pena mirarla, pero puede ser muy tedioso ingresar toda la información, por lo que sería compleja la aplicación de esta. En conclusión, recomiendo primero que todo, aprender Matlab, con el fin de realizar la programación en esta herramienta, posterior a esto,

aplicar un algoritmo aleatorio que es más sencillo y luego realizar un algoritmo genético, que sería la herramienta que creo mejor aplicaría para este problema”.

4. Profesor: SANTIAGO RUIZ HERRERA – Profesor titular del Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Doctorado UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE
MANIZALES

INGENIERÍA INDUSTRIAS Y ORGANIZACIONES

Enero de 2011 – Octubre de 2015

Título de la tesis: Metodología multiobjetivo basada en un comportamiento evolutivo para programar sistemas de producción Job Shop, aplicaciones en la industria metalmecánica.

Maestría/Magister UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y ESTADÍSTICA

Enero de 2008 – Diciembre de 2010

Título de la tesis: Aplicación de metaheurística multiobjetivo nsga-ii en sistema Job Shop para minimizar tiempo de proceso, controlar los costos de energía eléctrica y mitigar la accidentalidad laboral.

Especialización UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MANIZALES

Especialización En Salud Ocupacional

Enero de 1999 - de 2000

Pregrado/Universitario UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES

Ingeniería Industrial

Enero de 1988 - de 1994

Respuesta: “Yo recomiendo una metaheurística, si es un problema donde se quiere optimizar mas de una variables, como costos y tiempos de recolección, sugiero el algoritmo genético. Por otro lado, si el objetivo es optimizar una sola variable, el recocido simulado es una buena herramienta para este problema. También se puede utilizar un algoritmo genético con una característica especial, que sería, agregar uno o varios individuos migratorios de generación en generación, ya que esto puede dar unos saltos importantes en la consecución de la información en tiempos mas reducido”.

5. Profesor: JORGE IVÁN RÍOS PATIÑO – Director Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación, Universidad Tecnológica de Pereira.

Doctorado UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

DOCTORADO EN INFORMÁTICA

Enero de 1987

Maestría/Magister UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DEL CONOCIMIENTO
Enero de 1989 - de 1992
Maestría/Magister UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
MAESTRÍA EN INFORMÁTICA
Enero de 1985 - de 1988
Pregrado/Universitario UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
Enero de 1969 - de 1973
Pregrado/Universitario UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
Enero de 1973 - de 1976

Respuesta: “Yo recomiendo realizar registro fotográfico por medio de un dron para el ajuste del pronóstico de producción, en vez de aplicar el muestreo propuesto, con esta técnica se puede mirar si el lote necesita intervención. El problema planteado es un modelo de optimización matemática, con variables estocásticas y con varias restricciones. Según lo que veo sería un modelo de rendimiento de programación de tipo entero con variables discretas, por lo que sería un modelo mixto estocástico; para este tipo de problemas lo más recomendable es la aplicación de una metaheurística como el algoritmo genético, búsqueda tabú o colonia de hormigas.”

6. Profesor: ANTONIO HERNANDO ESCOBAR ZULUAGA, Profesor Titular Facultad de Tecnologías, Programa de Tecnología Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira.

Doctorado UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE
MESQUITA FILHO
Ingeniería Eléctrica
Septiembre de 2006 – Febrero de 2009
Título de la tesis: Análisis Crítico de Aspectos del Modelado Matemático del Planeamiento de la Expansión a Largo Plazo de Sistemas de Transmisión
Maestría/Magister UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Ingeniería Eléctrica
Enero de 1999 - de 2002
Título de la tesis: Planeamiento Dinámico de la Expansión de Sistemas de Transmisión Usando Algoritmos Combinatoriales
Pregrado/Universitario UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Ingeniería Eléctrica
Enero de 1981 - de 1988
Título de la tesis: Control óptimo en tiempo aplicado en el arranque de maquinas eléctricas de AC

Respuesta: “Según lo que me menciona, es un problema de asignación de personal, por las características planteadas lo más recomendable sería la aplicación de una metaheurística; la que mejor le funcionaría de acuerdo a las variables y restricciones que tiene el problema, sería el algoritmo genético de Chu – Beasley, ya que es un algoritmo muy eficiente. Yo lo plantearía por cada día de la semana y sumaría al final los 5 días; tendría en cuenta dentro del individuo, la cantidad de personas, la pendiente del lote, el lote con la cantidad de café y el surco de café, con esto sacaría la función objetivo que me arrojaría el total de kilogramos recolectados en un día. Adicional a esto, le pondría una penalidad, que sería a la cantidad de kilos que no se recogen en un surco, y de esta manera, miro al final los kilos que no se recogieron”.

7. Profesor: LUIS FERNANDO CASTILLO OSSA, Profesor titular del Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Doctorado Universidad De Salamanca

Doctorado Informática y Automática

Enero de 2002 - de 2008

Título de la tesis: Modelo de Socioconfiguración para Sistemas

Multiagente en dispositivos inalámbricos

Maestría/Magister Universidad De Salamanca

Desarrollo de Aplicaciones - Comercio Electrónico

Enero de 2004 - de 2005

Título de la tesis: W-Planner: Sistema Multiagente para dispositivos inalámbricos

Especialización Universidad De Salamanca

Desarrollo de Aplicaciones - Comercio Electrónico

Enero de 2003 - de 2004

Título de la tesis: Desarrollo de una arquitectura de comunicación entre agentes.

Pregrado/Universitario UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MANIZALES

Ingeniería de Sistemas

Enero de 1993 - de 1998

Título de la tesis: Sistema de Información, análisis y especificación de tendencias de pacientes en U.C.I con base en su función respiratoria.

Respuesta: “Miremos primero la técnica de programación, el problema que plantea es un problema de optimización, este se puede resolver con programación con restricciones, ya que puede tener restricciones de tiempo, personas, producción. Como es optimización, también puede emplear la programación dinámica, que se apoya en los principios de Bellman. Los algoritmos genéticos, son una muy buena opción siempre que se habla de optimizar, en general los algoritmos evolutivos son una buena técnica para este tipo de problemas. Cuando

se tengan mucho datos, se puede emplear el razonamientos basados en casos, es menos científico pero funciona bien cuando se tiene datos históricos. También, podría aplicar técnicas de machine learning, que son algoritmos de agrupamiento, cuando cuente con mucho detalle para hacer la clasificación. Además de esto, se podrían hacer comparaciones entre diferentes técnicas y sería muy bueno. Como herramienta, puedo recomendar Java, Python y Matlab”.

9.4 Anexo 4. Asignación de personal sugerida para el agregado 1, en la semana del 6 al 10 de mayo del 2019.

Recolector / Lotes	Lote 1	Lote 2
Recolector 1	27 horas	12 horas
Recolector 2	4 horas	36 horas
Recolector 3	33 horas	7 horas
Recolector 4	20 horas	19 horas
Recolector 5	19 horas	20 horas
Recolector 6	12 horas	27 horas
Recolector 7	10 horas	29 horas
Recolector 8	32 horas	8 horas
Recolector 9	31 horas	8 horas
Recolector 10	21 horas	18 horas

9.5 Anexo 5. Asignación de personal sugerida para el agregado 2, en la semana del 6 al 10 de mayo del 2019.

Recolector / Lotes	Lote 1	Lote 2
Recolector 1	34 horas	5 horas
Recolector 2	26 horas	13 horas
Recolector 3	5 horas	34 horas
Recolector 4	19 horas	20 horas
Recolector 5	39 horas	0 horas
Recolector 6	21 horas	18 horas
Recolector 7	10 horas	29 horas
Recolector 8	3 horas	36 horas
Recolector 9	32 horas	7 horas
Recolector 10	16 horas	23 horas
Recolector 11	12 horas	27 horas

Recolector 12	8 horas	32 horas
Recolector 13	11 horas	28 horas
Recolector 14	26 horas	13 horas
Recolector 15	10 horas	29 horas
Recolector 16	2 horas	37 horas
Recolector 17	10 horas	29 horas
Recolector 18	7 horas	32 horas
Recolector 19	2 horas	37 horas
Recolector 20	20 horas	19 horas
Recolector 21	28 horas	12 horas
Recolector 22	36 horas	3 horas
Recolector 23	17 horas	24 horas

9.6 Anexo 6. Asignación de personal sugerida para el agregado 1, en la semana del 13 al 17 de mayo del 2019.

Recolector / Lotes	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Recolector 1	14 horas	9 horas	17 horas
Recolector 2	0 horas	29 horas	10 horas
Recolector 3	26 horas	0 horas	13 horas
Recolector 4	14 horas	27 horas	0 horas
Recolector 5	14 horas	21 horas	4 horas
Recolector 6	0 horas	21 horas	18 horas
Recolector 7	1 horas	8 horas	29 horas
Recolector 8	28 horas	10 horas	1 horas
Recolector 9	18 horas	1 horas	19 horas
Recolector 10	10 horas	16 horas	12 horas
Recolector 11	10 horas	1 horas	28 horas
Recolector 12	17 horas	18 horas	3 horas
Recolector 13	6 horas	1 horas	31 horas
Recolector 14	15 horas	17 horas	10 horas
Recolector 15	18 horas	5 horas	16 horas
Recolector 16	6 horas	8 horas	24 horas
Recolector 17	20 horas	11 horas	8 horas
Recolector 18	0 horas	25 horas	14 horas
Recolector 19	1 horas	20 horas	17 horas
Recolector 20	24 horas	3 horas	13 horas
Recolector 21	2 horas	18 horas	19 horas
Recolector 22	0 horas	28 horas	12 horas
Recolector 23	3 horas	28 horas	7 horas

9.7 Anexo 7. Asignación de personal sugerida para el agregado 1, en la semana del 20 al 24 de mayo del 2019.

Recolector / Lotes	Lote 1
Recolector 1	40 horas
Recolector 2	40 horas
Recolector 3	40 horas
Recolector 4	40 horas
Recolector 5	40 horas
Recolector 6	40 horas
Recolector 7	40 horas

9.8 Anexo 8. Asignación de personal sugerida para el agregado 2, en la semana del 20 al 24 de mayo del 2019.

Recolector / Lotes	Lote 1	Lote 2
Recolector 1	36 horas	3 horas
Recolector 2	3 horas	36 horas
Recolector 3	35 horas	5 horas
Recolector 4	14 horas	25 horas
Recolector 5	22 horas	17 horas
Recolector 6	24 horas	15 horas
Recolector 7	2 horas	37 horas
Recolector 8	9 horas	30 horas
Recolector 9	36 horas	3 horas

Recolector 10	3 horas	36 horas
Recolector 11	11 horas	28 horas
Recolector 12	20 horas	19 horas
Recolector 13	28 horas	11 horas
Recolector 14	12 horas	27 horas

9.9 Anexo 9. Asignación de personal sugerida para el agregado 1, en la semana del 27 al 31 de mayo del 2019.

Recolector / Lotes	Lote 1	Lote 2
Recolector 1	36 horas	3 horas
Recolector 2	32 horas	7 horas
Recolector 3	13 horas	26 horas
Recolector 4	13 horas	26 horas
Recolector 5	30 horas	10 horas
Recolector 6	26 horas	13 horas
Recolector 7	6 horas	33 horas
Recolector 8	21 horas	18 horas
Recolector 9	11 horas	28 horas
Recolector 10	24 horas	17 horas
Recolector 11	29 horas	10 horas

9.10 Anexo 10. Información general de las fincas visitadas en el trabajo de campo en Costa Rica.

Nombre de la Finca	Ubicación	Hectáreas en café	Variedad de café sembrado	Número de lotes	Pendiente de inclinación promedio
Finca Experiment al Santa Lucía	Santa Lucía	5	Caturra, Catuai, Costa Rica 95, Obatá, Híbridos.	6	Todos los lotes entre el 10 % y el 20 %.
Maya Técnica	Coronado	18	Costa Rica 95, Obatá, Caturra.	5	Lote 1, 3 y 4: 10 %. Lote 2 y 5: 20 % -

S.A.					100 %.
Rancho Arizona	Santo Domingo	8	Obatá, Catuaí, Cativa, Caturra.	4	Todos los lotes en el 10 %.
Finca Icafe (Cicafe)	Barvas	7,1	Caturra, Catuaí, Costa Rica 95, Obatá, 19 variedades de Brasil.	Más de 20	Todos los lotes entre el 10 % y el 20 %.
Monte Alto	Los Santos, Santa María de Dota	35	Caturra, Catuaí, Villa Sarchí, Obatá, Cativa.	7	Lote 1 y 2: 10 %. Lote 3, 4 y 5: 100 % - 200 %. Lote 6 y 7: 20 % - 100 %.
Finca San Luis – La Canoa	Santo Domingo	38	Obatá, Caturra, Catuaí, Costa Rica 95.	6	Todos los lotes entre el 0 % y 10 %.
La Unión	San Isidro	20	Caturra, Catuaí, F1.	6	Lote 1, 2, y 3: 0 % - 10 %. Lote 4, 5 y 6: 20 % - 100 %.
Las Canoas	Turrubares	3,5	Catuaí, Obatá, Cativa.	4	Lote 1, 2 y 4: 100 % - 200 %. Lote 3: superior al 200 %.
El Laurel	Turrubares	2	Caturra y Catuaí	2	Lote 1: 20 % - 100 %. Lote 2: 100 % - 200 %.
Finca de Jeffre trejos	Turrubares	8	Caturra, Catuaí, Obatá.	5	Todos los lotes entre el 100 % - 200 %.
Finca de Nelson Ramírez	Santa Barvara	20	Híbridos, Obatá, Catuaí, Tupí, Caturra, Cativa.	30	Todos los lotes entre el 0 % - 20 %.