

ESTUDIO DE LA REDISTRIBUCIÓN DE PLANTA DE UNA EMPRESA
MANUFACTURERA DE CALZADO EN CUERO DE LA CIUDAD DE CALI

YULIAN MAURICIO ORTIZ BECERRA - CÓDIGO:201052148
LAURA CRISTINA VITERI GALLEGU - CÓDIGO:201052779

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PALMIRA
2015

ESTUDIO DE LA REDISTRIBUCIÓN DE PLANTA DE UNA EMPRESA
MANUFACTURERA DE CALZADO EN CUERO DE LA CIUDAD DE CALI

YULIAN MAURICIO ORTIZ BECERRA -CÓDIGO 201052148
LAURA CRISTINA VITERI GALLEG0 -CÓDIGO 201052779

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Industrial

DIRECTOR
Ing. RAÚL ANTONIO DIAZ PACHECO Msc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PALMIRA
2015

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Palmira, (día, mes, año)

DEDICADOTORIA

*A Dios que fue mi guía en el camino,
a mi madre que con su amor y apoyo incondicional
logró transformar los momentos difíciles y que junto
con mi padre, hermanos, abuelita, tío y demás familiares
me acompañaron durante todo el proceso y me brindaron
su ejemplo de trabajo y superación.
Dedico también este trabajo a Yulian por su
gran dedicación y esfuerzo depositado.*

Laura Cristina Viteri Gallego

*Dedico este trabajo en primer lugar a Dios quien ha brindado protección,
sabiduría, paciencia y me ha bendecido con logros y buenas personas
a mi alrededor, entre ellas mis padres, quienes se esforzaron
por regalarme esta etapa de mi vida, me han enseñado, guiado
y brindado lo requerido, en especial su amor,
se lo dedico también a mi familia por su apoyo y compañía.
Dedico especialmente este trabajo a Laura, por todo lo que vivimos en
esta etapa y por la meta que pretendemos alcanzar con este trabajo.
Gracias a todos los que me apoyaron y a aquellos
que ya no me pueden acompañar, siempre están en mi mente.*

Yulian Mauricio Ortiz Becerra

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer primero que todo a la Universidad del Valle que nos brindó los espacios, docentes y recursos necesarios para llegar a la última etapa de nuestra carrera profesional. Gracias a nuestro director el profesor Raúl Díaz por compartir sus conocimientos y por el acompañamiento brindado, de igual manera al profesor Juan Pablo Orejuela quien nos prestó muy generosamente su ayuda en la última fase del trabajo de grado.

Agradecemos a todos nuestros compañeros y amigos con los que compartimos esta etapa de la vida, por sus enseñanzas, por las experiencias y por los momentos que se pudieron compartir. A todos aquellos docentes que dejan una huella de conocimiento y a quienes trataron de mostrarnos lo más fielmente posible lo que puede llegar a hacer la Ingeniería en la vida afuera de la universidad. Agradecemos a la empresa Calzado Antonello, en especial a su gerente el Sr. Gustavo Correa, por su colaboración y tiempo dedicado para el desarrollo de nuestro trabajo.

Equipo de trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	19
2.1. OBJETIVO GENERAL	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. MARCO REFERENCIAL	20
3.1. DISTRIBUCIÓN DE PLANTA	20
3.2. TIPOS DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA	20
3.2.1. Distribución por proceso	20
3.2.2. Distribución por producto o en línea	20
3.2.3. Distribución por posición fija	20
3.2.4. Distribución por familias de productos	20
3.3. OBJETIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE PLANTA	21
3.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DISTRIBUCIÓN DE PLANTA	21
3.4.1. Los materiales	21
3.4.2. La maquinaria	21
3.4.3. La mano de obra	21
3.5. TÉCNICAS DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA	22
3.5.1. Systematic Layout Planning (SLP)	22
3.5.2. Problema de Asignación Cuadrática QAP	23
3.5.3. Método de aproximación de Vogel	24
3.6. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)	25
3.7. PRODUCCIÓN DE CALZADO	27
3.7.1. Guarnecido	27
4. INVESTIGACIONES REALIZADAS EN DISTRIBUCIÓN DE PLANTA	28
5. METODOLOGÍA	33
6. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA Y SUS PROCESOS	36
6.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO	36
6.2. MATERIALES E INSUMOS	40

6.3. MAQUINARIA Y EQUIPOS	41
6.4. SIPOC DE LA EMPRESA CALZADO ANTONELLO	43
6.5. DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA	46
7. ELECCIÓN DEL TIPO DE DISTRIBUCIÓN A SEGUIR	51
8. DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA	54
8.1. REQUERIMIENTOS DE ESPACIO	54
8.2. DELIMITACIONES DE ESPACIO ASIGNABLE	57
8.3. DETERMINACIÓN DE COSTOS DE DISTRIBUCIÓN	60
8.3.1. Factor de costo de distancia	60
8.3.2. Factor de costos de adecuación	67
8.4. ALTERNATIVA PROPUESTA MEDIANTE SLP	73
8.5. ALTERNATIVA PROPUESTA MEDIANTE PROBLEMA DE ASIGNACIÓN CUADRÁTICA QAP	79
8.6. ALTERNATIVA PROPUESTA POR EL METODO DE APROXIMACIÓN DE VOGEL.	87
9. ANÁLISIS Y RESULTADOS	91
9.1. MEDIDAS DE DESEMPEÑO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA	91
9.2. ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA MEDIANTE AHP	93
10. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – AHP	100
11. CONCLUSIONES	103
12. RECOMENDACIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	105
ANEXOS	109

TABLA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Procedimiento general del SLP.	22
Figura 2 Diagrama de flujo para la formulación de un nuevo modelo de calzado en la empresa.	38
Figura 3. Diagrama de operaciones para la elaboración de calzado en cuero masculino en la empresa.	39
Figura 4. Distribución actual local 1 - primer piso.	47
Figura 5. Distribución actual local 1 - segundo piso.	48
Figura 6. Distribución actual local 2 - primer piso.	49
Figura 7. Distribución actual local 2 - segundo piso.	50
Figura 8. Gráfica de Volumen vs. Sistemas de Producción.	52
Figura 9. Distribución de las localidades asignables en los primeros pisos.	58
Figura 10. Distribución de las localidades asignables en los segundos pisos.	59
Figura 11. Esquema para determinación de penalización.	63
Figura 12. Relación de Actividades entre departamentos.	75
Figura 13. Diagrama de relaciones de espacio.	76
Figura 14. Distribución de planta obtenida mediante el método SLP para Calzado Antonello.	78
Figura 15 Distribución de planta alternativa QAP1 para Calzado Antonello.	84
Figura 16. Distribución de planta alternativa QAP2 para Calzado Antonello.	85
Figura 17. Distribución de planta alternativa QAP3 para Calzado Antonello.	86
Figura 18. Resultados obtenidos en WINQSB por método de aproximación de Vogel.	89
Figura 19. Distribución obtenida por el método Vogel.	90
Figura 20. Diagrama de Jerarquías.	93
Figura 21. Distribución recomendada	98

TABLA DE ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1. Separación del proceso productivo que provoca un desplazamiento de 6,68 m entre locales.	15
Ilustración 2. Congestión y deficiente utilización del espacio.	15
Ilustración 3. Acumulación de producto en proceso entre áreas de trabajo.	16
Ilustración 4 Algunos materiales utilizados dentro de la elaboración de calzado en cuero. (Izquierda a derecha: cueros varios en bodega de materia prima, pegante Maxoll-cemento de contacto, tintes y elementos para acabado).	40
Ilustración 5. Ejemplo de archivo modelo en AMPL.	80
Ilustración 6. Escritura del método Vogel en AMPL.	88

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Medidas de desempeño para la distribución actual.	17
Tabla 2. Escala fundamental de calificaciones	25
Tabla 3. Índice Aleatorio RI	26
Tabla 4. Listado de máquinas y sus características	41
Tabla 5. Diagrama de Flujo de procesos de producción	44
Tabla 6. Listado de departamentos en la empresa	46
Tabla 7. Ventajas y Desventajas de la Distribución por proceso	53
Tabla 8. Definición de áreas mínimas.	56
Tabla 9. Localidades designadas y sus características.	57
Tabla 10. Flujos presentados entre departamentos.	61
Tabla 11. Penalidades de recorrido en escaleras (en metros).	64
Tabla 12. Costos por procesos por operario.	65
Tabla 13. Matriz de distancias con costos incluidos.	66
Tabla 14. Requerimientos de máquinas.	68
Tabla 15. Cotización de tomacorriente.	69
Tabla 16. Costos asociados con la realización de una derivación trifásica.	69
Tabla 17. Costos asociados con la instalación de una cometida de aire.	70
Tabla 18. Cotización de luminaria de 1700 Lux o Lm/m ² .	70
Tabla 19. Cantidad de luminarias requeridas para L2,L16 y L17.	70
Tabla 20. Costos asociados a la nivelación del suelo.	71
Tabla 21. Costos de movilización de maquinaria y mobiliario.	71
Tabla 22. Matriz de costos de adecuación.	72
Tabla 23. Calificación de cercanías	74
Tabla 24. Razones tras el valor de cercanía	74
Tabla 25. Tabla resumen obtenida por las 13 corridas en el programa AMPL	82
Tabla 26. Resumen de resultados obtenidos con QAP.	83
Tabla 27. Resultados obtenidos por el método Vogel.	89
Tabla 28. Medidas de desempeño para cada alternativa	92
Tabla 29. Resultados finales.	96
Tabla 30. Comparación de las medidas de desempeño.	97
Tabla 31. Análisis de sensibilidad 1.	100
Tabla 32. Análisis de sensibilidad 2.	101
Tabla 33. Análisis de sensibilidad 3.	102

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Matriz de flujos entre departamentos.	109
Anexo B. Matriz de distancias rectilíneas en metros.	110
Anexo C. Matriz de costos de recorrido para método Vogel.	111
Anexo D. Matrices de comparación entre pares de alternativas.	112
Anexo E. Verificación de consistencia de las seis medidas de desempeño.	114
Anexo F. Matriz de comparación entre criterios y verificación de consistencia.	115
Anexo G. Vectores prioridad a partir de escala natural	116
Anexo H. Vectores prioridad a partir de técnicas de normalización	117

INTRODUCCIÓN

El estudio de la distribución de planta en una empresa, es uno de los métodos para lograr mejoras en los procesos productivos a través de medidas como: tiempos de producción, distancia recorrida por los materiales, costos de producción, productividad, entre otras.¹ Teniendo en cuenta que la empresa en donde se va a realizar la investigación presenta problemas en cuanto a la utilización del espacio, acumulación de producto en proceso, congestión de algunas áreas de trabajo, deficientes condiciones de trabajo para los operarios y flujo ineficiente de los materiales, que en conjunto provocan un bajo rendimiento de la fábrica, desperdicio de material y tiempos excesivos de producción, se podría afirmar que redistribuir las instalaciones de la fábrica presenta una solución atractiva y principalmente de gestión en cuanto a la reacomodación de procesos, personas, máquinas y materiales que representaría una oportunidad para responder al constante cambio, a la innovación tecnológica y a la competitividad del sector².

Para redistribuir los procesos buscando disminuir las distancias recorridas y evitar contraflujos, en esta investigación se utilizará la Planificación Sistemática de la Distribución (Systematic Layout Planning - SLP) que es una herramienta útil para definir el rediseño de una planta, a través de una serie de pasos que definen el estado actual de la distribución, las limitaciones y la relación entre los departamentos. A partir de esto, se formulan las disposiciones alternas mediante diferentes metodologías y se evalúan a través de técnicas para la toma de decisiones.³⁻⁴

En este trabajo se presenta el estudio de la redistribución de planta de una empresa manufacturera de calzado en cuero ubicada en la ciudad de Cali-Valle del Cauca, que tiene como propósito evaluar distribuciones alternas, analizando seis medidas de desempeño (Ver sección 8.1) con el fin de incrementar la eficiencia de una distribución de planta, teniendo en cuenta que la elección de una de las alternativas corresponde a una propuesta dada por los autores y que la fase de implementación se encuentra fuera del alcance de este estudio.

¹ MAYA, Natalia. Rediseño de planta de la empresa OSAKA MOTORCYCLE PARTS LTDA. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. 2008.

² Ibid. p. 10.

³ NORANI, Amit. NURULZULAIHA, Suhadak y JOHARI, Norzarina. Using Simulation to Solve Facility Layout for Food Industry at XYZ Company. IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research (SHUSER). 2012.

⁴ MEJIA, Heidy y GALOFRE, Marjoire. Aplicación de software de simulación como herramienta en el rediseño de plantas de producción en empresas del sector de alimentos. 2008.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La distribución de planta es el plan, o el acto de planificar, el ordenamiento óptimo de las actividades industriales, incluyendo personal, equipo, almacenes, sistemas de mantenimiento de materiales, y todos los otros servicios anexos que sean necesarios para diseñar de la mejor manera posible la estructura que contenga estas actividades⁵.

Desde los años 1940 se empezó a tener un mayor interés en la distribución de una planta ya que la mayoría de los industriales fueron presionados a reorganizar sus sistemas productivos, debido a variaciones en los pedidos, el aumento de la calidad de los productos o la fabricación de productos diferentes y así suplir la demanda de bienes necesarios para la guerra y una vez finalizada este periodo volver a reorganizar para los tiempos de paz⁶.

Una de las áreas que sirve de apoyo en los procesos de redistribución de planta es la macroergonomía, donde a pesar de que su fundamentación data de 1967⁷, las investigaciones en los últimos años y en especial las que se han desarrollado en la industria manufacturera del calzado, han utilizado este concepto para ampliar el sentido de la relación hombre-máquina, identificando los aspectos que se deben tener en cuenta para la distribución y diseño de las plantas desde el punto de vista del bienestar del operario. Este tipo de metodología para la organización de planta, en donde se tienen en cuenta aspectos socio-técnicos del ambiente laboral y de los elementos que se utilizan en las fábricas, obtiene grandes beneficios en la reducción de costos, la salud de los trabajadores y la mejora de la productividad, puesto que se reducen gastos en tratamientos y costos relativos a urgencias médicas, se disminuyen los índices de inasistencia laboral y con una ubicación que tenga en cuenta el factor humano del operario se incrementa la motivación del trabajador para hacer las diferentes actividades⁸.

Sumado a este concepto las empresas en los últimos años han optado al momento de realizar planes de distribución en sus nuevas plantas o la redistribución de las existentes, aplicar técnicas participativas y democráticas,

⁵ SEGURA, Antonio. Layout Aplicación a un Despacho de Administración de Fincas. Trabajo de Fin de Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas.

⁶ MEJÍA, Heidy y GALOFRE, Marjorie. Aplicación de software de simulación como herramienta en el rediseño de plantas de producción en empresas del sector de alimentos, 2008.

⁷ MONTMOLLIN, Maurice. Les systemes hommes-machines - introduction à l'ergonomie. Paris. Presses Universitaires. 1967.

⁸ GUIMARAES, L.B.de M; RIBEIRO, J.L.D. y RENNER, J.S. Cost-benefit analysis of a socio-technical intervention in a Brazilian footwear. 2012.

como el desarrollo de grupos de consenso y talleres, en donde los operarios, quienes se enfrentan día a día a la movilidad y desarrollo de las diferentes actividades en el espacio que se diseña, aportan sus opiniones y diferentes pensamientos sobre cómo deberían estar organizadas las instalaciones donde van a laborar, encontrando de esta manera soluciones más óptimas en cuanto a la forma de reducir movimientos, incrementando el tiempo utilizable y por ende la productividad⁹.

Una mala distribución de planta puede afectar la productividad y el control de las actividades que hacen parte del proceso productivo, ya que la motivación del equipo de trabajo no es alta debido a las imposibilidades del lugar y las bajas condiciones del entorno, y a que se ven frustrados debido a las malas prácticas administrativas, en donde no existe una adaptación al cambio, este malestar se agudiza desde los costos principalmente por concepto de administración, mantenimiento y operación, ya que como desafío la empresa no solo debe trabajar con lo que tiene sino aumentar su productividad bajo las mismas limitaciones, que no se adquiere si no existe una buena gestión.¹⁰.

La empresa Calzado Persa Antonello ubicada en la ciudad de Cali-Valle del Cauca, produce calzado en cuero para hombre estilo clásico, elaborados principalmente bajo una actividad artesanal o de taller que utiliza en algunos de sus procesos maquinaria y herramientas que no están completamente automatizados. La empresa se encuentra ubicada en el centro de la ciudad, dividiendo su proceso de producción en dos locales; en el primero se realizan los procesos de diseño y de costura, que se le conoce como guarnecido y en el otro local que se encuentra comunicado internamente se realizan los procesos de acabado final, ésta situación genera dificultad con el manejo de materiales al tener que desplazarse 6,68 m, que es la distancia entre los locales (Ver Ilustración 1).

Debido a que la fábrica no tiene un canal de comunicación interno entre los dos locales, se debe usar la acera para pasar materiales y producto terminado, tanto de ida como de regreso hacia el local principal, para empacar el producto, almacenarlo y distribuirlo a los diferentes puntos de venta según los pedidos.

Para reforzar la necesidad de rediseñar la planta se identifican algunos síntomas que se muestran en las ilustraciones 1 a la 3.

⁹ GUIMARAES, L.B. *et al.* Worker evaluation of a macroergonomic intervention in a Brazilian footwear company, 2014.

¹⁰ TOMPKINS, James A. *et al.* Planeación de instalaciones 3a. ed. México D.F. International Thomson editores. 2006.

Ilustración 1. Separación del proceso productivo que provoca un desplazamiento de 6,68 m entre locales.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 2. Congestión y deficiente utilización del espacio.



Fuente: Elaboración propia.

En la ilustración 2 se puede apreciar la congestión que se presenta, debido al número de anaqueles, máquinas y puestos de trabajo asignados que dificulta el acceso y movimiento de los operarios en este caso en el área de fabricación de suelas. A pesar de que el espacio asignado para albergar cada uno de los departamentos presenta una utilización del espacio del 73,53%, existe el caso en que una misma actividad se desarrolla en dos lugares diferentes, tal es el caso del local de ventas, ya que tener dos localidades con esta misma función evita utilizar ese espacio de una mejor manera para mejorar el flujo del trabajo.

Ilustración 3. Acumulación de producto en proceso entre áreas de trabajo.



Fuente: Elaboración propia.

Los síntomas mencionados son algunos de los motivos para tomar la decisión de redistribuir la planta y su análisis y resolución comprende el inicio de cambios significativos para la organización.¹¹ La situación actual y su manejo afectan principalmente la productividad y eficiencia que tiene la fábrica, desperdicios de materiales, sobreproducción, deficiente utilización del espacio y de las máquinas y en especial la disponibilidad de estos trabajadores para desarrollar otro tipo de tareas. Estas problemáticas pueden ser tratadas desde un rediseño completo de la fábrica.

Para medir la dimensión del problema se caracteriza la situación actual mediante tres medidas de desempeño, de las seis que se van a evaluar posteriormente, debido a que el porcentaje de ahorro de la distribución y el número de cambios realizados no se pueden evaluar en la distribución actual, y el factor de comodidad

¹¹ MACHUCA, Jose A. *et al.* Dirección de operaciones. España. Mc GrawHill Interamericana de España. 1995. p. 276.

y seguridad solo se usa como un valor comparativo dentro del proceso del AHP.. En la tabla 1 se aprecian los resultados, que se obtuvieron a partir de los datos recolectados de la empresa, en cuanto a flujos y distancias entre las localidades que albergan los departamentos actualmente, valores que se pueden reflejar como costos generados por cada viaje del operario entre departamentos para totalizar un costo de la distribución.

Tabla 1. Medidas de desempeño para la distribución actual.

Distancia total recorrida (m)	Costo de la distribución (\$)	Utilización del espacio (%)
20.450,95	\$ 257.151,79	73,53%

Fuente: Autoría propia.

La primera medida de la tabla 1, distancia total recorrida se calcula con base en la fórmula:

$$\sum_{o=1}^n \sum_{m=1}^n \text{flujo entre departamentos } o \text{ y } p * \text{distancia entre localidades } m \text{ y } n \text{ (Ec. 1)}$$

Donde existe flujo entre los departamentos o y p cuando existen dos actividades interconectadas con paso de materiales, producto en proceso o terminado, dado como el número de viajes promedio en un mes realizados por el operario de la actividad (ver anexo A), valor que se multiplica por la distancia que debe recorrer el operario entre las localidades que albergan el par de departamentos (Ver Anexo B). Esto conforma el valor de la función objetivo que se busca minimizar en esta investigación de acuerdo a las metodologías QAP y Vogel que se evalúan en las secciones 8.5 y 8.6 y que de igual manera se pueden calcular a la distribución obtenida con el SLP en la sección 8.4 para comparar con la situación actual.

La sumatoria de todos los trayectos formados por el flujo de materiales constituye de esta manera la distancia total recorrida en metros que recorren en total los operarios inmersos en la actividad de producir una tarea de 21 pares de zapatos, ya que en la investigación cada corrida de producción se totalizo como una tarea con 21 unidades, que sin importar cuales sean las variaciones que contenga el modelo según su diseño debe recorrer 20.450,95 metros dentro de la fábrica para ser producido, pasando por los 15 departamentos que se describen en la sección 6.5. Estos departamentos son áreas macro en donde se realizan ciertas actividades de conformación del producto y donde a su vez las maquinas que albergan estos departamentos son las que pueden realizar ciertas diferenciaciones en los modelos, pero no necesariamente conforman otra ruta del producto dentro de la fábrica ya que por esta razón se definieron las áreas según los planos ubicados en la sección 6.5.

Para la segunda métrica se debe tener en cuenta que las distancias pueden ser traducidas como un costo en el que se incurre cuando el operario deba desplazarse, valor que se calcula según un costo promedio por minuto del operario (ver sección 8.3) según las actividades que se pagan al destajo y la jornada laboral, este valor es de \$188,61 pesos/min. De igual manera se estudió cual podría ser la velocidad promedio en la que los operarios pueden desplazarse con las canastas que albergan la tarea de producción en cada etapa, lo cual fue medido en la planta obteniendo un valor de 15 m/min. Ambos valores transforman las distancias en la matriz de distancias con costos incluidos (ver tabla 13 sección 8.3.1), esto al multiplicarse con los flujos que existan dentro del proceso de producción son los que determinan el costo de la distribución que se está evaluando.

El porcentaje de utilización del espacio asignado, es calculado como la proporción del área que ocupa cada departamento dentro de la localidad que es asignada, donde se debe tener en cuenta que aunque son 19 localidades que se habilitaron para el estudio, 4 de ellas quedaran sin asignar, es por esta razón que al indicador se le nombro utilización del espacio asignado, ya que el cálculo de área utilizada frente a área disponible solo se hace entre las áreas de las 15 localidades que si terminan albergando los 15 departamentos. Este porcentaje es relacionado con el factor de comodidad y seguridad de la distribución evaluado dentro del AHP debido a que entre menor sea este valor, se relaciona que se tendrá espacios más amplios dentro de las áreas de trabajo, evitando que exista congestión y que sea más notorio la acumulación de producto en proceso y elementos.

La distribución de planta para el desarrollo de este proyecto describirá las pautas necesarias para definir la acomodación más efectiva para las diferentes estaciones, máquinas, etapas, materiales, personas y procesos que se deben de tener en cuenta en el proceso productivo de la empresa. A partir del problema anteriormente descrito se pueden plantear las siguientes preguntas de investigación:

- 1) ¿Qué tipo de distribución debe seguir cada sección de la empresa; por producto, por proceso o por posición fija?
- 2) ¿Cuáles indicadores de desempeño se lograrían mejorar en la empresa a través de una nueva distribución de planta?
- 3) ¿Qué características se deben tener en cuenta para elegir una distribución de planta que maximice su desempeño?

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

2.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer una distribución de planta para una fábrica de calzado en cuero ubicada en la ciudad de Cali-Valle del Cauca, con el fin de mejorar indicadores de eficiencia de la distribución actual.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los procesos de negocio y operativos de la empresa para identificar los departamentos que se van a redistribuir.
- Determinar los tipos de distribución que se deben utilizar según las características de cada área de la empresa.
- Generar alternativas de distribución de planta a partir de diferentes metodologías, buscando medidas de desempeño comparables.
- Evaluar las alternativas mediante el proceso analítico jerárquico (AHP) con el fin de generar un escalafón según los criterios que beneficien la eficiencia de la distribución.

3. MARCO REFERENCIAL

Con el fin de conocer conceptos claves para la ejecución de este trabajo, dando cumplimiento a actividades relacionadas con el objetivo 2, se elaboró el siguiente marco referencial contemplando herramientas y técnicas de la distribución de planta que logran tratarse a lo largo de los siguientes capítulos.

3.1. DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

Es el arreglo o acomodación al interior de una organización ya sea existente o en proyecto, de materiales, procesos, máquinas, actividades auxiliares, servicios y personal, según las limitaciones físicas de la instalación.¹²⁻¹³

3.2. TIPOS DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

3.2.1. Distribución por proceso¹⁴: La distribución por proceso tiene lugar cuando todas las operaciones similares se agrupan formando departamentos, es decir, agruparlas según la actividad que desempeñen.

3.2.2. Distribución por producto o en línea¹⁴: La distribución por producto se caracteriza por disponer todos los elementos involucrados en el proceso según la trayectoria que siguen los materiales durante todo el proceso productivo. Es usual encontrarla en plantas con un alto nivel de producción.

3.2.3. Distribución por posición fija¹⁴: Este tipo de distribución consiste en llevar toda la maquinaria y herramientas necesarias durante el proceso de producción hacia donde esté el producto o material. Se utiliza generalmente cuando se trabaja con productos grandes y voluminosos.

3.2.4. Distribución por familias de productos¹⁵: La distribución por familias de productos consiste en agrupar piezas según el requerimiento de máquinas o herramientas, forma, manejo común, proceso productivo, requerimiento o composición de materiales, entre otros factores críticos, asignando máquinas y personas para la producción de cada familia.

¹²MUTHER, Richard. Distribución de planta 3ed. España: Editorial Hispano Europea, 1977. p.472.

¹³MEYERS, Fred E. y STEPHENS, Matthew P. Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales 3 ed. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2006. p. 528.

¹⁴TOMPKINS, James A. *et al.* Planeación de instalaciones 3a. ed. México D.F. International Thomson editores. 2006. p. 753.

¹⁵AGUIRRE, Manuel. Propuesta de Distribución de la Planta para la Fábrica de Calzado Rosana. Licenciado en Administración. Universidad Veracruzana. 2011.

3.3. OBJETIVOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

Cuando se busca rediseñar una planta existente, ésta debe perseguir los objetivos de la organización, generalmente se busca llegar a una distribución económica y eficiente y que al mismo tiempo sea segura para los trabajadores. Específicamente se puede decir que los objetivos de redistribuir una planta de producción son:

- Mejorar la supervisión del proceso
- Disminuir el riesgo del material o la calidad del producto
- Disminuir la congestión
- Eliminar las áreas ocupadas innecesariamente
- Elevar la seguridad y comodidad de los trabajadores¹⁶

3.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

El estudio de la distribución de planta en cualquier industria requiere un diagnóstico y análisis de aspectos que intervienen directamente en la determinación de la distribución más adecuada para la organización. Tres de los factores más importantes a tener en cuenta son:

3.4.1. Los materiales: Se debe analizar los tipos de materiales que intervienen en el proceso productivo, características generales y la forma en la que se transportan al interior de la fábrica. Además, se debe tener en cuenta el orden de las actividades, ya que esto dictará la secuencia de la ubicación de los procesos.

3.4.2. La maquinaria: Es necesario conocer las máquinas y herramientas que se necesitan en cada proceso, la cantidad, el tipo, su función y el espacio requerido para cada una. Esta información es útil al momento de definir los espacios designados para cada una de las áreas.

3.4.3. La mano de obra¹⁷: El personal de la organización es parte fundamental en el diseño de una distribución de planta, se deben brindar espacios seguros y confortables para desarrollar las actividades. Determinar el número de operarios que hacen parte de cada proceso, así como también caracterizar las áreas que comparten personal, son parte del estudio de la distribución de planta.

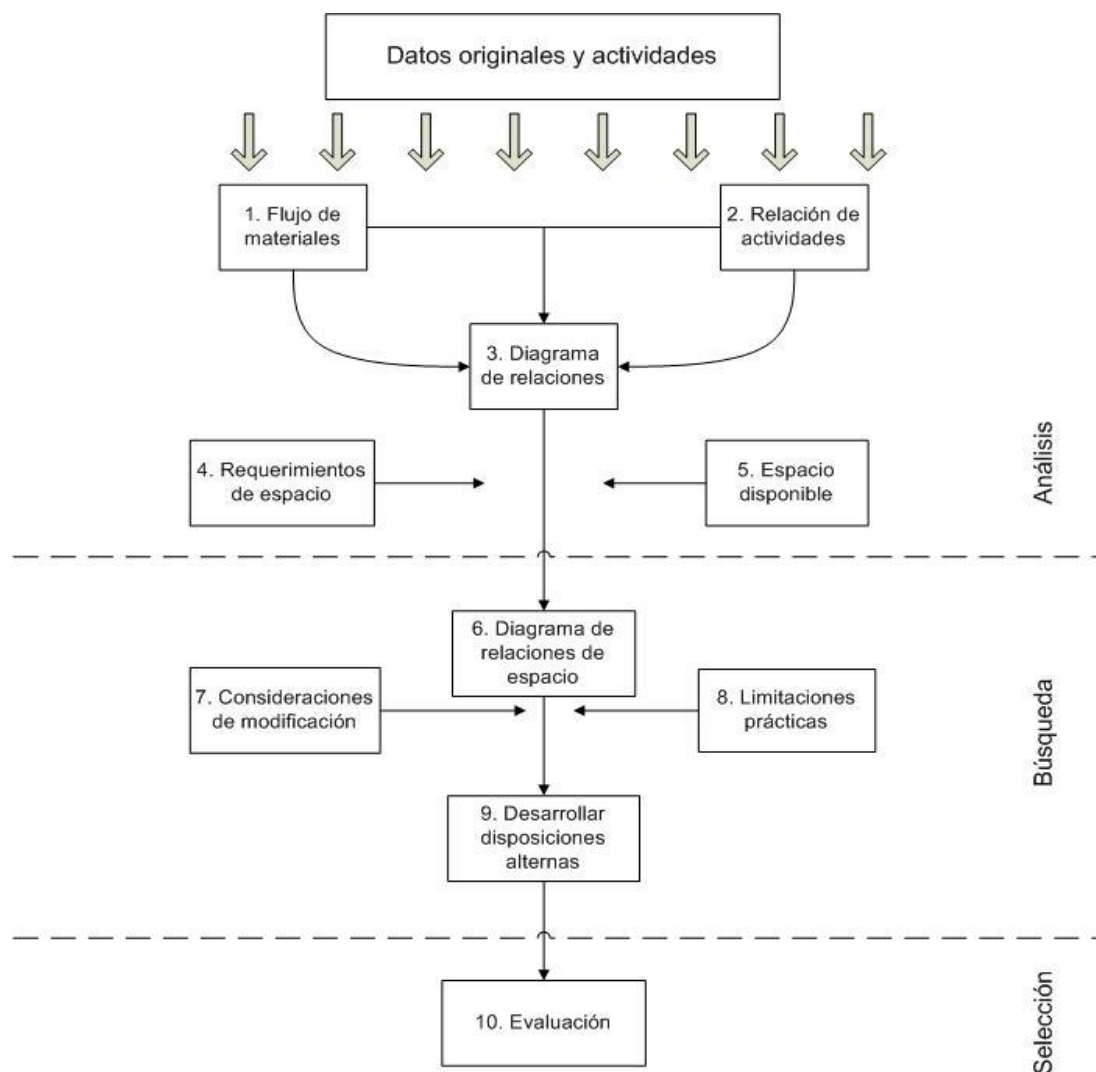
¹⁶ MACHUCA, Jose A. *et al.* Dirección de operaciones. España. Mc GrawHill Interamericana de España. 1995. p. 277.

¹⁷ *Ibid.* p. 279.

3.5. TÉCNICAS DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

3.5.1. Systematic Layout Planning (SLP): Es una metodología planteada por Richard Muther, en el que se propone un procedimiento para determinar la disposición de la planta a través de los datos originales de la disposición actual y la relación que existe entre las actividades, se efectúa un análisis del flujo de materiales (tabla desde-hacia) y un análisis de la relación de actividades (tabla de relación de actividades). En la figura 1 se presenta el esquema del procedimiento de la planificación sistemática de la distribución:

Figura 1. Procedimiento general del SLP.



Tomado y Adaptado de: TOMPKINS, James A. *et al.* Planeación de instalaciones 3a. ed. México D.F. International Thomson editores. 2006. p.306.

3.5.2. Problema de Asignación Cuadrática QAP: Es un modelo formulado por Koopmans y Beckam (1957)¹⁸ que minimiza el costo asociado a la distancia recorrida por los materiales, asignando o instalaciones en m localizaciones. El modelo utiliza como datos de entrada los flujos y las distancias entre los departamentos. Propone como función objetivo y restricciones lo siguiente:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{h=1}^n \sum_{l=1}^n C_{ompn} X_{om} X_{pn} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde: C_{ompn} representa el costo asociado a mover elementos que interactúan entre los departamentos o y p , dada su ubicación en las localidades m y n .

X_{om} : Representa a la variable binaria que asigna el departamento o a la localidad m .

X_{pn} : Representa la variable binaria que asigna el departamento p a la localidad n .

Sujeto a:

$$\sum_{o=1}^n X_{om} = 1 \quad \forall m = 1, \dots, n \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\sum_{m=1}^n X_{om} = 1 \quad \forall o = 1, \dots, n \quad (\text{Ec. 4})$$

$$X_{om} = (0, 1) \text{ para todas las } o \text{ y } m$$

La ecuación 3 representa que cada departamento o debe estar asignado a una localidad m y la ecuación 4 representa que toda localidad debe albergar un solo departamento.

A pesar que el Problema de Asignación Cuadrática plantea la anterior función objetivo, en la mayoría de problemas de distribución de planta se suele expresar el costo como un producto de los flujos y las distancias entre los departamentos. Quedando su estructura como:¹⁹

¹⁸ TOMPKINS, James A. *et al.* Planeación de instalaciones 3a. ed. México D.F. International Thomson editores. 2006. p. 545.

¹⁹ SALAZAR, Andres F. *et al.* Propuesta de Distribución en Planta bietapa en ambientes de manufactura flexible mediante el proceso analítico jerárquico. En: Revista EIA. 2010. p. 161-175.

$$\text{Minimizar } z \sum_{o=1}^N \sum_{p=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N f_{op} d_{mn} X_{om} X_{pn} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde f_{op} representa el flujo de materiales o producto entre los departamentos o y p dado por un número de veces que en promedio se ejerza un recorrido, y d_{mn} representa la distancia a recorrer entre las localidades m y n que albergan a los departamentos en cuestión. Las variables X_{om} y X_{pn} representa la asignación al igual que en la ecuación 2.

El modelo actúa buscando que cada departamento que entre en estudio sea asignada a una localidad que presente mayor cercanía al departamento con el que posee flujo o interacción, generando el menor valor posible a la sumatoria que se genera en las ecuaciones Ec. 2 y 5, de esta manera se comparan entre sí todas las posibles sumatorias que se resulten de conectar el flujo entre los departamentos o y p al recorrer distancias entre las localidades m y n .

Este modelo de asignación es considerado como un NPL-duro, debido a que por su naturaleza combinatoria, es capaz de evaluar de forma matricial todas las posibles combinaciones de asignación, de modo que la búsqueda de costo mínimo de recorrido sea más óptima que utilizando las heurísticas y modelos de asignación convencionales, además de esto es aplicable a otras problemáticas como asignación de recursos, problemas de ahorro, diseño de circuitos, entre otros.

3.5.3. Método de aproximación de Vogel: Esta heurística es considerada una versión mejorada del método de costo mínimo, ya que llega a soluciones más cercanas al óptimo inicial, debido a que genera una solución a partir de un mayor número de iteraciones. Este método es considerado principalmente para la resolución de problemas de transporte, aunque su variación para los problemas de asignación parte de la asunción de demandas y capacidades iguales a 1, para que la variable de asignación X_{ij} designe el par ordenado con menor costo según una matriz comparativa entre elementos asignables y locaciones donde se puedan asignar.

Este método asigna el costo unitario a través de la penalización de filas y columnas, identificando la penalización máxima y asignando recursos al par ordenado (fila, columna) que obtenga este puntaje, si existen empates este se

define arbitrariamente, y se continua a la siguiente iteración, hasta que demanda y oferta sean iguales a cero.²⁰

3.6. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

Es una de las técnicas multicriterio más utilizadas para la toma de decisiones introducida por Thomas Saaty a finales de los 70's, para resolver problemas complejos involucrando criterios tanto cualitativos como cuantitativos, ha sido ampliamente utilizado en diferentes sectores y ambientes de trabajo. Este método se basa en calificaciones entre pares que designan la prioridad entre criterios y entre alternativas según cada criterio. Su desarrollo consiste en una serie de ocho pasos básicos, llegando al final a una jerarquización con prioridades que refleja la preferencia global para cada una de las alternativas.^{21,22}

En la tabla 2 se encuentra la tabla de escalas numéricas a tener en cuenta en cualquier problema de toma de decisiones que se desee solucionar mediante el Proceso Analítico Jerárquico – AHP.

Tabla 2. Escala fundamental de calificaciones

ESCALA DE VALORACIÓN	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	Mucha más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	Un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica.
9	Importancia extrema de un elemento frente a otro	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.

Tomado de: SAATY, Thomas. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research. 1990. p. 9-26.

²⁰ TAHA, Hamdy A.. Investigación de operaciones 9a. ed. México D.F. Pearson Educación. 2012. p. 190.

²¹ BERUMEN, Sergio y LLAMAZARES, Francisco. La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. Cuadernos de Administración, Pontificia Universidad Javeriana. 2007. p. 65-87.

²² ROCHE, Hugo y VEJO, Constantino. Métodos cuantitativos aplicados a la administración. Material de Apoyo Análisis Multicriterio. p. 4-23.

Los valores 2, 4, 6 y 8 corresponden a calificaciones intermedias entre una calificación y otra y las cifras decimales se utilizan para casos más sofisticados o que requieran de un análisis más riguroso.

La consistencia de las calificaciones se mide con la razón de consistencia (CR), un $CR < 10\%$ se considera aceptable, este valor se calcula según la ecuación 6:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde CI corresponde al índice de consistencia y n es el número de criterios que se están analizando. Después de obtener el valor de CI se puede pasar a calcular el resultado de la razón de consistencia CR, según la ecuación 7.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde el índice aleatorio RI, por sus siglas en inglés, corresponde a valores estándares según el total de alternativas, éstos valores se muestran en la tabla 3.²³

Tabla 3. Índice Aleatorio RI

Total de alternativas	Índice aleatorio RI
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49

Fuente: OREJUELA, Juan Pablo y OSORIO, Juan Carlos. El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. En: Scientia et Technica Año XIV, No 39. 2008. p. 247-258.

Siguiendo los pasos propuestos por el AHP y los fundamentos y valores estandarizados se obtiene la decisión final según el objetivo general del análisis.

²³ MORENO, José María. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. Universidad de Zaragoza. s.a.

3.7. PRODUCCIÓN DE CALZADO

3.7.1. Guarnecido: El proceso de guarnecido es donde se unen todas las piezas de cuero que dan forma a la parte externa del zapato, también llamada capellada, estas son unidas mediante procesos de costura y pegado con materiales como cemento de contacto o pegamentos a base de agua, como es en el caso de la empresa donde se realizara el proyecto. En este proceso también se requiere del uso de martillo, cuchilla y algunas otras herramientas punzantes para poder desbastar parte del material y lograr una unión de las piezas más refinado.²⁴

3.7.2. Pago al destajo: Es una forma de pago comúnmente utilizada en la producción de calzado artesanal, que consiste en pagar a los operarios según el número de pares de calzado que hayan procesado al final de una jornada determinada.

²⁴DÍAZ HERRERA, Jhonatan. 2012. Automatización del proceso de corte en una empresa de calzado. Ingeniería Industrial, Universidad San Buenaventura Seccional Cali. Cali: Tesis de grado para título de Ingeniería Industrial-Universidad de San Buenaventura, 2012. pág. 101.

4. INVESTIGACIONES REALIZADAS EN DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

El rediseño de las instalaciones de una planta manufacturera ha evolucionado desde la organización y distribución empírica de las máquinas, el flujo de materiales y las estaciones de trabajo por parte de los mismos arquitectos a una planificación basada en la recolección de datos relevantes para medir el desempeño de la planta, el flujo de materiales, las etapas del proceso y construir la relación de actividades y máquinas, basándose en el uso de la modelación matemática y de la simulación como herramienta para visualizar la propuesta de distribución frente al diseño de la instalación actual²⁵.

Para que una empresa se mantenga eficiente y eficaz, sus instalaciones deben adaptarse a cambios en los volúmenes de producción, cambios tecnológicos o la inserción de nuevos productos teniendo en cuenta que la distribución de planta tiene un gran impacto sobre los costos globales, ya que planteando un layout adecuado desde el inicio se pueden reducir los costos totales de funcionamiento en un 50%²⁶, para lograr el rediseño de las instalaciones actualmente se continúan utilizando técnicas como el Systematic Layout Planning (SLP) desarrollado por Muther (1976)²⁷ que es una de las técnicas más exitosas y útiles para configurar una nueva distribución de las empresas. Para utilizar SLP se debe contar con algunos datos de entrada como el flujo de materiales, la relación de actividades, el diagrama de relación, los requisitos y disponibilidad del espacio y las restricciones que pueda tener la instalación²⁸, con el fin de definir el estado actual de la empresa y determinar cuáles son las condiciones sobre las cuales se pueden desarrollar disposiciones alternas, ésta técnica generalmente va acompañada de la simulación para evaluar las diferentes alternativas y comparar las medidas de desempeño entre el estado actual y cada una de las opciones. Algunos artículos que presentan la utilización del SLP tienen como característica lo siguiente:

En la distribución actual de una panadería se identificaron problemas en el proceso productivo como largas distancias entre las estaciones de trabajo, falta de organización, trabajo en proceso en el corredor principal, entre otros, al evaluar los principios de distribución de planta que no se cumplían, dado estas irregularidades

²⁵ MEJÍA, Heidy y GALOFRE, Marjorie. Aplicación de software de simulación como herramienta en el rediseño de plantas de producción en empresas del sector de alimentos, 2008. pág. 40.

²⁶ OROZCO, E. E. y CERVERA, J. E. Diseño y Distribución de Instalaciones Industriales apoyado en el uso de la Simulación de Procesos. En: Investig.innov.ing. Vol. 1 No1. 2013. p. 6-12.

²⁷ NORANI, Amit. NURULZULAIHA, Suhadak y JOHARI, Norzarina. Using Simulation to Solve Facility Layout for Food Industry at XYZ Company. En: IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research (SHUSER). 2012.

²⁸ AJIT, Pal y MANDERAS, Yilma. Production Floor Layout Using Systematic Layout Planning in Can Manufacturing Company. En: IEEE Explore. 2013.

se hizo necesario rediseñar la distribución de las instalaciones basándose en SLP, utilizando diagramas de flujo que evidenciaron la relación entre las actividades y simular por medio del software ARENA la distribución actual y la propuesta (que disminuyó las distancias recorridas y los tiempos de espera entre cada estación de trabajo) y así observar de una manera dinámica su diferencia²⁹.

Se estudiaron varias propuestas de diseño de las instalaciones sobre una planta de alimentos denominada XYZ Company utilizando un caso de estudio para comparar cada una y seleccionar la que proporcionaba mejores medidas de desempeño, utilizando el Systematic Layout Planning (SLP) para entender el proceso de producción actual y el flujo de materiales y trabajadores y a partir de esto simular la propuesta de distribución mediante el software ARENA, el estudio arrojó una propuesta que mejora los indicadores de desempeño de la empresa, reduciendo solo un área del proceso y obteniendo así reducción en mano de obra y costos, pero ampliando la productividad conjunta. Este es un estudio valioso puesto que muestra la importancia de utilizar esta técnica dentro del diseño de las instalaciones³⁰.

Singh e Yilma (2013)³¹ enfocaron su estudio en una empresa productora de envases donde utilizaron la metodología de SLP con el fin de plantear alternativas que resolvieran el problema de distribución de planta desde los aspectos de la distancia que recorren los materiales, el tiempo total de desplazamiento y costo total de manejo buscando minimizar la distancia que deben recorrer entre cada par de máquinas, después de desarrollar detalladamente los pasos que propone el SLP, se plantean dos alternativas de distribución las cuales se analizaron en términos de los tres aspectos anteriormente mencionados se obtuvo que la alternativa dos redujo en un 31% los costos totales de manejo de materiales.

Otra técnica utilizada es la disposición de los elementos de la planta basándose en el concepto de celdas de manufactura, donde lo que se busca es agrupar las piezas, materiales, herramientas requeridas y/o etapas de procesamiento, formando familias de productos que tengan un manejo, almacenamiento y requerimientos de control similares³². Esta técnica permite realizar distribuciones

²⁹MEJÍA, Heidy; GALOFRE, Marjorie. Aplicación de software de simulación como herramienta en el rediseño de plantas de producción en empresas del sector de alimentos, 2008. p. 39-45.

³⁰NORANI, Amit. NURULZULAIHA, Suhadak y JOHARI, Norzarina. Using Simulation to Solve Facility Layout for Food Industry at XYZ Company. En: IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research (SHUSER). 2012. p. 647-652.

³¹Tomado de SINGH, Ajit Pal y MANDERAS, Yilma. Production Floor Layout Using Systematic Layout Planning in Can Manufacturing Company. En: IEEE Explore. 2013. p. 822-828.

³²TOMPKINS, James A. *et al.* Planeación de instalaciones 3a. ed. México D.F. International Thomson editores. 2006.

de planta flexibles, que son capaces de adaptarse a las variabilidades de la demanda, debido a que al ubicar diferentes grupos de procesos, celdas, en el momento en que se requiera producir mayor cantidad de producto como respuesta a la demanda, se pueden desviar las secuencias de producción a otras celdas o maquinas similares, debido a que en este tipo de distribuciones es permisible el flujo de materiales y partes tanto de forma interna como de forma interdepartamental³³. La distribución enfocada hacia la formación de celdas de manufactura está relacionada con la modelación matemática, debido a que mediante el uso del Quadratic Assignment Problem (QAP), los procesos analíticos jerárquicos (AHP); Quartic Assignment Problem (QrAP); entre otros algoritmos y modelación en donde principalmente se busca determinar la forma en la que se asignan tareas y/o partes a las diferentes máquinas que existen en el proceso puesto que cada uno de los grupos o celdas que se conforman deben garantizar que exista una menor distancia total recorrida por las partes y un menor costo en manejo del material³⁴. Algunos artículos que han planteado la resolución del problema de la distribución de planta mediante estos métodos han sido los siguientes:

Al combinar las metodologías de QAP y AHP, investigadores de la Universidad de Chongqing en China, propusieron el Método Cuadrático de distribución de Instalaciones (QFLM de sus siglas en ingles) para desarrollar la distribución de las unidades en un sistema de manufactura compleja, en donde se permitirá ubicar unidades independientes y dependientes, con la finalidad de permitir aún más la interacción entre unidades simples y agrupadas a lo largo de las líneas de procesos, para determinar las soluciones factibles al modelamiento propuesto utilizaron heurísticas como la colonia de hormigas y el método del centroide para calcular las localizaciones probables de las unidades³⁵.

Investigadores brasileiros plantearon dos criterios importantes para la asignación de máquinas y materiales requeridos en el proceso productivo de una industria de acero, en donde principalmente se estudiaron dos metodologías, la centralización de los procesos y la distribución basada en celdas de tecnología aplicada, ambos comparados mediante los criterios de disminución de tiempo de procesamiento de los dispositivos de transporte, mejoramiento de la capacidad de producción y disminución de los tiempos de alistamiento; verifica la importancia de trabajar o

³³BENJAAFAR, Saifallah y SHEIKZADEH. Mehdi. Design of Flexible Layouts for Manufacturing Systems. En: IEEE Explore. Abril,1996,. p. 852-857.

³⁴TOMPKINS, James A. *et al.* Planeación de instalaciones 3a. ed. México D.F. International Thomson editores. 2006.

³⁵YOULING, Chen, *et al.* Research on optimization method for facilities layout of complex. En: IEEE Explore. 2009. p. 827–831.

cumplir con los requerimientos de una línea de producción agrupando por familias o productos similares³⁶.

Investigadores Iraníes de la Universidad de Manzandaran y el centro de investigación de telecomunicaciones de Irán³⁷ realizaron un estudio donde además de incluir formulación de una distribución por celdas, agregaron aspectos como la producción multiperiodo, el ruteo de procesos alternos, las distribuciones y el flujo intra-celular, la reconfiguración del sistema, las maquinas duplicadas y la división en lotes, con el fin de formular un ejemplo de programación lineal que buscara minimizar los costos totales del manejo de materiales y la cantidad de desplazamientos necesarios, incluyendo movimientos hacia atrás y hacia adelante con el fin de hacer modelos de distribución completamente flexibles para analizar si se logra cubrir o no una demanda propuesta tras incluir la mayor cantidad de parámetros que pueda se puedan llegar a conocer.

En los últimos años y en especial en ejemplos relacionados con la industria manufacturera de calzado, la distribución de planta ha sido enfocada a la participación socio-técnica, es decir, a la inclusión del personal dentro de las decisiones que se tomen en cuenta para la ubicación de áreas de proceso, maquinas, equipos, estaciones de trabajo y materiales, este concepto también conocido como macroergonomía³⁸ además de brindar un mejor bienestar y confort a los operarios en las instalaciones, mejora el desempeño de todo el sistema, incrementa la productividad y mejora el panorama de costo-beneficio en las organizaciones que los aplican, ya que al tener en cuenta las opiniones de los operarios que desarrollaran las actividades en las instalaciones, pueden reducir el número de máquinas y áreas que pueden llegar a ser innecesarias.

Tal es el caso del análisis costo-beneficio que se realizó a una compañía brasilera de calzado, en donde se obtuvo una mejora en la distribución basado en muestreo de las opiniones de 100 trabajadores con respecto factores iluminación, comodidad, movimientos, entre otros, y posteriormente se evaluó los costos de las condiciones actuales de funcionamiento, y en los factores donde existían mayores falencias se realizó el costeo de la intervención para el mejoramiento, aunque esto repercute en inversión, el beneficio demostrado de este tipo de estudios es mayor, ya que con mejores condiciones de los lugares de trabajo se obtienen reducciones

³⁶ CAMARGO, María E. *et al.* Study of the layout of a steel manufacturing industry. En: 40th International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE). 2010. p. 1-3.

³⁷ Tomado de MAHDAVI, Iraj. *et al.* Designing a mathematical model for intra-cell layout of dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and system reconfiguration. En: IEEE Explore. 2010. p. 1-6.

³⁸ MONTMOLLIN, Maurice. Les systemes hommes-machines - introduction à l'ergonomie. Paris. Presses Universitaires. 1967.

significativas en la cantidad de inasistencias, citas médicas y accidentes, por lo que en última instancia se mantiene una productividad y no existen deducciones en el tiempo de producción de la empresa a falta de operarios³⁹.

Los mismos investigadores para el presente año realizaron un estudio en donde se evaluó integralmente a los trabajadores de la misma compañía brasilera, basados en el análisis macroergonómico del trabajo (MA en sus siglas en inglés), en donde mediante la metodología planteada por Guimarães(1999), se evalúan problemas de diseño y se plantean apreciaciones y soluciones que los mismos trabajadores desarrollan en foros y reuniones programadas, en este tipo de técnica se plantea crear comités de ergonomía en las compañías con el fin de tener más formalizada las ideas que planteen los trabajadores y tener un canal directo con los directivos para ser tomados en cuenta, como resultado de este tipo de encuentros se obtiene la lista de elementos de ergonomía demandados (EDI- Ergonomic demand ítems) en donde factores físicos como ruido, iluminación, temperatura, y demás factores que pueden llegar a afectar los lugares de trabajo son tomados en cuenta, y son medidos antes y después de que se implementen las mejoras que se realizan o se planean realizar⁴⁰.

³⁹ GUIMARAES, L.B.de M.; RIBEIRO, J.L.D. y Renner, J.S. Cost-benefit analysis of a socio-technical intervention in a Brazilian footwear. En: Applied Ergonomics, Vol. 43, Issue 5. 2012. p. 948-957.

⁴⁰ GUIMARAES, L.B. de M.; *et al.* Worker evaluation of a macroergonomic intervention in a Brazilian footwear company. En: Applied Ergonomics, Vol. 45, Issue 4. 2014. p. 923-935.

5. METODOLOGÍA

Dentro del estudio a realizar se debe definir en primera instancia el estado actual, teniendo como precedente contextualizar a calzado Antonello dentro de sus procesos de venta, capacidad productiva, número de almacenes y a su vez caracterizando máquinas, materiales y actividades del proceso productivo, con el fin de cumplir con el primer objetivo específico. Teniendo en cuenta la distribución actual se deben reubicar quince departamentos de la empresa, que no incluyen áreas como: pasillos, escaleras, cocineta, oficinas administrativas y servicios generales, ya que estas áreas no tienen relación directa con el proceso productivo y por ende no generan un flujo con otros departamentos. Estos quince departamentos se deben ubicar en diecinueve localidades disponibles para asignar teniendo en cuenta las diferentes metodologías a desarrollar para la generación de alternativas.

La caracterización de un volumen de ventas y una capacidad productiva dada por la producción de tareas u órdenes de producción bajo pedido lleva a ubicar la empresa dentro del cuadrante apropiado en la gráfica de volumen versus sistema de producción, permitiendo debatir que tipo de distribución es el más favorable para cada área o para la empresa en general, para tener presente el segundo objetivo dentro de la generación y evaluación de alternativas.

Para la definición de alternativas de distribución, es decir el objetivo específico número 3, se van a utilizar varios métodos. El primero de ellos es la aplicación del Systematic Layout Planning SLP donde siguiendo su estructura para tener en cuenta las limitaciones y los recursos disponibles se va a proponer una distribución de la planta según las necesidades de cercanía entre los departamentos.

El segundo método a utilizar es la modelación matemática, mediante la estructuración de una alternativa basada en el problema de asignación cuadrático QAP, que es una herramienta muy utilizada para resolver el problema de distribución de planta, teniendo como datos claves los flujos y las distancias entre departamentos, a las cuales se les asignara un costo por unidad de distancia, para de esta manera obtener la matriz de distancias con costos incluidos. Este procedimiento será considerado como metodología principal, motivo por el cual se planea desarrollar varios análisis y restricciones, para poder generar varias alternativas analizando los resultados de diferentes escenarios a la distribución actual. El modelo QAP será escrito en AMPL y se desarrollará con la consola AMPL y se corroboraran los resultados con los arrojados por el servidor NEOS.

Teniendo en cuenta que el problema tratado puede ser visto como un problema de asignación, se evaluará también el uso de una heurística, que en este caso será el método de aproximación de Vogel, en el cuál al requerir como datos de entrada una matriz que relacione un costo asignado al par ordenado de departamento “o” a localidad “m”, se requerirá que los parámetros estudiados sean cuadrados, es decir que exista el mismo número de departamentos y localidades. Esta metodología estará desarrollada también en lenguaje AMPL y se utilizara el software WINQSB para poder corroborar la respuesta y generar el grafico de asignación.

Como cuarto paso, la definición de los datos para el estudio de alternativas a la distribución parte de la identificación de las diferentes localidades que pueden ser asignables y esta manera calcular las distancias que pueden ser recorridas y que se contabilizaran según los departamentos que se asignen a cada localidad y el flujo de materiales que existan entre un par de departamentos. También se identifica según las localidades que sean asignadas y según el departamento que alberguen definir el área utilizable que está siendo aprovechada.

Cada alternativa está definida también por un costo de adecuación, que estará definido por los costos que se deban incurrir por movilizar un departamento a una localidad que la pueda albergar, teniendo en cuenta costos de adecuación eléctrica, costos de instalación de cometidas de aire, ya que algunas máquinas así lo requiere, adecuación de luminarias y de piso para poder que un departamento pueda operar adecuadamente, y unos costos fijos que se calculan por el movimiento de máquina y elementos que hacen parte de cada célula de trabajo.

De manera puntual, se tienen seis (6) criterios o indicadores que se escogieron para el estudio de la redistribución y serán utilizados para facilitar la comparación entre alternativas, los cuales son: porcentaje de ahorro obtenido, distancia total recorrida por materiales, producto en proceso y producto terminado, porcentaje de utilización de espacio asignado, seguridad y comodidad de los trabajadores, numero de cambios realizados y costo de adecuación de la alternativa. Estos criterios se obtuvieron mediante la revisión de literatura de acuerdo a los criterios relevantes a tenerse en cuenta para diseñar una planta eficiente y de estos se eligieron los más importantes para el caso estudio según el gerente de la fábrica.⁴¹

⁴¹ AL-HAWARI, Tarek, MUMANI, Ahmad y MOMANI, Amer. Application of the Analytic Network Process to facility layout. En: Journal of Manufacturing System. 2014. p. 488-497.

Como una última etapa, después de tener los resultados de las medidas de desempeño para cada alternativa, se pasa a la evaluación de las mismas para cumplir con el último objetivo específico. Puesto que las alternativas a estudiar provienen de enfoques o fundamentos distintos, los resultados de asignación obtenidos se deben comparar mediante las métricas definidas, que en este caso se calcularán con los datos definidos para la metodología base, el QAP, teniendo así un costo de alternativa comparable, el costo de adecuación de cada alternativa y los porcentajes de ahorro que refleja cada alternativa estudiada en función de flujos y distancias como se quiere apreciar en el estudio, para esto se va a hacer uso de la técnica multicriterio conocida como Proceso Analítico Jerárquico AHP para tomar la decisión final acerca de la distribución más conveniente para la empresa, teniendo en cuenta los criterios definidos y calificando de cuatro formas diferentes para realizar un estudio más completo (Ver la sección 9.2).

6. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA Y SUS PROCESOS

La empresa Calzado Antonello tiene una trayectoria de 35 años en el mercado produciendo calzado en cuero para hombre, dispone de su punto de fábrica en la ciudad de Cali y distribuye sus productos a diferentes ciudades del país como: Buga, Tuluá, Buenaventura, Medellín, Bucaramanga y Bogotá; tiene un total de ventas nacionales promedio anuales de 12.000 pares de calzado y que con un precio de venta promedio por par de \$110.000, se tienen ventas brutas anuales de \$1.320.000.000 de pesos.

La producción se lleva a cabo bajo pedido, es decir que se trabaja según las necesidades específicas de los puntos de venta, donde según el estudio realizado a la capacidad de cada departamento de la fábrica, se tiene un volumen de producción aproximado de 1092 pares mensuales, teniendo en cuenta los flujos y los tiempos de proceso que constituyen la fabricación de calzado. Su producción es netamente artesanal a excepción de algunos procesos que cuentan con la ayuda de maquinaria para facilitar su ejecución y proveer una mayor calidad al producto final.

6.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

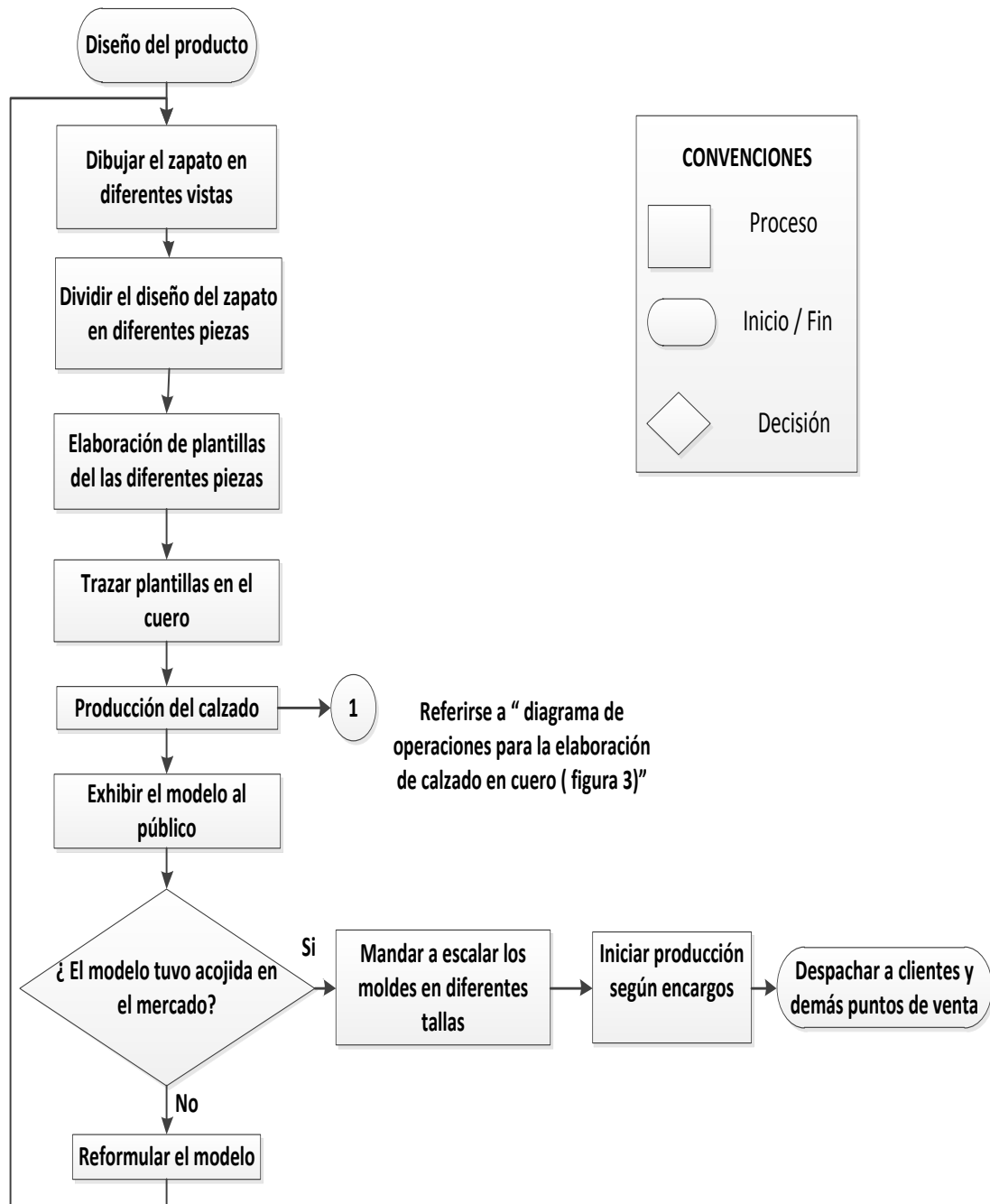
- **Diseño:** El proceso de elaboración del calzado empieza con el diseño del modelo del calzado, el cual se plasma en una hoja de cartulina en diferentes vistas, con base en esto se realiza el despiece, también en cartulina, esto se utiliza para hacer ya con el cuero, las diferentes partes del zapato, como la punta, talón, empeine, lengüeta, capellada, entresuela, tacón.
- **Corte:** Se trazan en el cuero, basados en el molde, cada una de las diferentes piezas que componen el zapato y de esta manera se recortan.
- **Desbaste:** En este proceso se disminuye el grosor de los bordes de las partes que se van a unir, esto con el fin de facilitar el proceso de costura de las piezas.
- **Guarnecido:** Se le conoce a los procesos de unión de las partes cortadas y desbastadas, ya sea por medio de pegantes o de la costura. En este caso con la ayuda de un pegante ecológico a base de agua se forma el forro y las partes que necesitan una mejor adhesión, como la capellada y las piezas exteriores se unen con cemento de contacto (bóxer) y para pegar el collarín del zapato se usa solución, seguido a esto pasa a las máquinas de coser, en donde se realizan los diferentes tipos de costuras, según la referencia, como

grabados, monogramas, “chiripeado”, perforados y demás estilos de decoración.

- **Montado:** Para dar forma de “pie” al material guarnecido, se utilizan hormas de pasta, que se adhieren mediante la máquina pegadora de cuñas y de puntas o de forma manual cuando el tipo de cuero no se puede pasar por las máquinas, luego de 5 horas se saca el material de la horma para pasar al proceso de pegado de suelas.
- **Pegado de Suelas:** En esta fase se introduce el zapato a un horno eléctrico por aproximadamente 5 a 8 minutos para eliminar arrugas del cuero y proveer un mejor acabado; luego de esto se ensambla la suela al nuevo armazón mediante la aplicación de Maxoll (pegante para suelas) y se introducen a un horno (que se encarga de activar el pegante) por aproximadamente 1 minuto. Transcurrido este tiempo, el zapato se pasa a una máquina de presión al vacío llamada “pegadora de bolsa” que se usa para retirar el aire que haya quedado entre la suela y el zapato. Posteriormente pasa a una prensa hidráulica para lograr un pegado más firme. Después se pasa al pegado del tacón mediante una máquina de prensado mecánico, que consiste en la colocación de puntillas en agujeros y se acciona la palanca para lograr una fijación definitiva.
- **Alistamiento final y empaque:** Finalmente, se pasa el calzado a la sección de alistamiento final y empaque, en donde se remueven restos de costuras y pegante, se realiza la limpieza y brillo al calzado con la ayuda de una pulidora a la que se le frota una piedra que permite que al pasar el zapato quede con un brillo especial y atractivo a la vista; se colocan los cordones (a los modelos que los llevan) y las plantillas con su respectiva marquilla y por último se empaca cada par de zapatos en una caja.

Los procedimientos para diseñar estilos nuevos de calzado y hacer seguimiento a su desempeño en el mercado, al igual que los procesos de elaboración se muestran en la Figura 2.

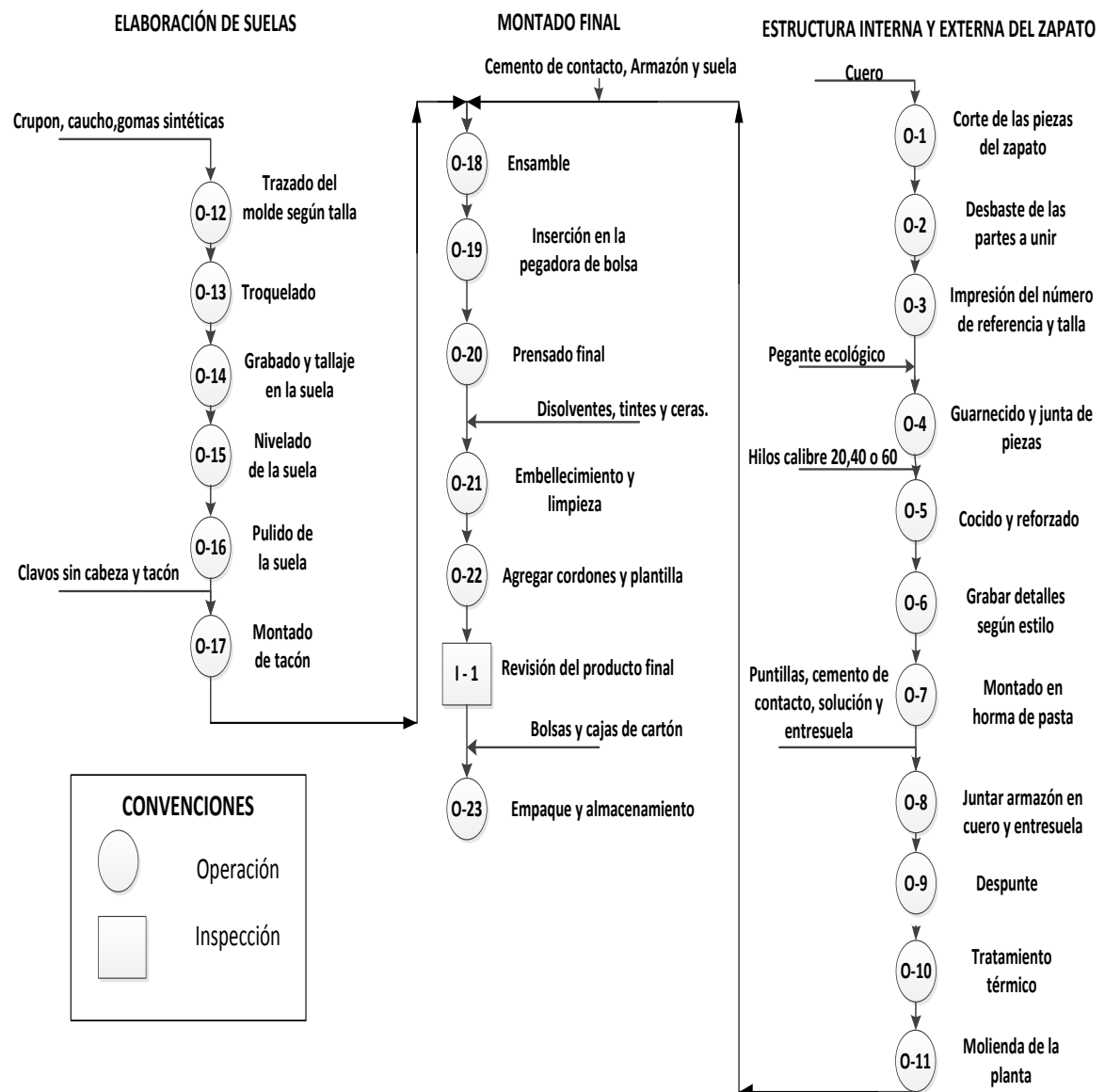
Figura 2 Diagrama de flujo para la formulación de un nuevo modelo de calzado en la empresa.



Fuente: Elaboración propia

Luego de ser aprobado un modelo pasa al proceso de elaboración, el cual se encuentra más detallado en la figura 3, donde se agregan todas las operaciones de forma secuencial para tres proceso macro identificados en la empresa, el primero la elaboración de suelas, el cual cuenta con producción interna y para clientes que solo requieren este producto como insumo para sus líneas de producción, el segundo proceso macro es el guarnecido o elaboración de las estructura interna y externa con el cuero y por último el montado final.

Figura 3. Diagrama de operaciones para la elaboración de calzado en cuero masculino en la empresa.



Fuente: Elaboración propia

6.2. MATERIALES E INSUMOS

Debido al tipo de actividad de la empresa el principal tipo de materia prima que se utiliza es el cuero, que proviene de las especies bovinas y es utilizado tanto en el armazón del zapato como en su suela. Los diferentes materiales e insumos (Ilustración 4) que se utilizan en el proceso son:

- Hilos de diferentes calibres: 20, 40 y 60.
- Cordones.
- Cuero.
- Cemento de contacto.
- Pegante ecológico.
- Solución.
- Maxoll: Pegante para la suela.
- Resortes.
- Puntillas.
- Hiladilla.
- Telas.
- Pigmentos para marquillas.
- Espumas.
- Plantillas.
- Ojales.
- Hormas en pasta.
- Cajas y bolsas para empaque.
- Tacones.

Ilustración 4 Algunos materiales utilizados dentro de la elaboración de calzado en cuero. (Izquierda a derecha: cueros varios en bodega de materia prima, pegante Maxoll-cemento de contacto, tintes y elementos para acabado).



Fuente: Elaboración propia.

6.3. MAQUINARIA Y EQUIPOS

A pesar de que la empresa se caracteriza por su trabajo artesanal, cuenta con maquinaria que facilita algunas actividades dentro del proceso de elaboración del calzado. La tabla 4 contiene maquinaria y equipos que están en la fábrica:

Tabla 4. Listado de máquinas y sus características

ID	Máquina	Cantidad	Dimensiones Largo Ancho (m)		Área que ocupa la máquina (m2)	¿Requiere energía trifásica?	¿Requiere cometida de aire?	Departamento al que pertenece
1	Troqueladora de suelas	1	1,1	0,6	0,66	SI	SI	D2: Preformado suelas
2	Pulidora de Alistamiento	1	0,9	0,5	0,45	SI	SI	D4: Alistamiento y empaque
3	ECOJAB de guarnecido	1	0,91	0,53	0,4823	SI	SI	D6: Guarnecido
4	Venadora	1	1,1	0,47	0,517	SI	NO	
5	Referenciadoras Guarnecido	2	0,6	0,3	0,36	SI	SI	
6	Máquinas de coser Industriales	4	1,2	0,47	2,256	SI	NO	
7	Máquinas de coser planas	3	1,2	0,47	1,692	SI	NO	
8	Desbastadora (Formadora)	1	1,1	0,5	0,55	SI	NO	D10: Desbaste
9	Desbastadoras	3	1,2	0,4	1,44	SI	NO	
10	Prensa para puntillas	1	0,9	0,75	0,675	SI	SI	D11: Pulido de suelas
11	Asentadora de tacones	1	0,9	0,75	0,675	SI	SI	
12	Prefresadora	1	0,75	0,6	0,45	SI	NO	
13	Cajeadoras	2	0,9	0,75	1,35	SI	NO	
14	Pulidoras de pulido de suelas	2	1,3	1	2,6	SI	SI	
15	Cabina de pintura para suelas	1	1	0,8	0,8	SI	SI	
16	Perfiladora	1	1,3	1	1,3	SI	NO	D12: Grabado y nivelado de suelas
17	Pomasadora	1	1	0,4	0,4	SI	NO	
18	Niveladora de suelas	1	1,2	0,5	0,6	SI	SI	
19	Prensa hidráulica	1	1,5	0,7	1,05	SI	SI	
20	Referenciadora	1	1	0,4	0,4	SI	SI	
21	Calibradora	1	1,1	0,4	0,44	SI	NO	D13: Montado
22	Tunel terminado a vapor	1	0,9	0,7	0,63	SI	NO	
23	Cambriadora	1	0,6	0,4	0,24	SI	SI	
24	Pegadora de puntas	1	0,7	0,5	0,35	SI	SI	D14: Pegado
25	Horno de activación	1	0,6	0,5	0,3	SI	NO	
26	Pegadora de bolsa	1	1,7	0,6	1,02	SI	SI	D15: Plantillas
27	Máquinas de estampados	2	1,2	0,5	0,6	SI	NO	

Fuente: Elaboración propia.

La interacción entre los materiales e insumos, maquinaria y equipos, y los procesos descritos anteriormente en este documento, se ven reflejados en el SIPOC (ver sección 6.4) que se construyó para la empresa, y de esta manera condensar los aspectos que hacen posible el funcionamiento de la fábrica de calzado.

En este SIPOC se logran condensar algunas de las relaciones que sostiene calzado Antonello para poder suplir procesos de negocio de abastecimiento y distribución de su punto de fábrica y diferentes puntos de venta, ya sean propios o clientes que compran sus productos para abastecer almacenes. Esta empresa a pesar de tener una capacidad instalada, en diferentes ocasiones logran picos de venta, tal es el caso de las temporadas escolares, los días del padre y grados, ya que en especial el mercado que manejan es el calzado formal para hombre, esto contado por su gerente, el cual lleva cerca de 40 años en el negocio del calzado y afirma que a pesar de que el mercado está ampliamente dominado por contrabando y calzado de menor precio, el calzado colombiano ha logrado sostenerse debido a su calidad.

El diagrama de flujo de procesos descrito en la tabla 5, genera un bosquejo de las características principales de las actividades involucradas en el proceso productivo, definiendo los tiempos estándar que se manejan actualmente en la elaboración de cada tarea de 21 unidades, los desplazamientos que se deben realizar que son dados por las distancias, estudiadas de los movimientos que realizan los operarios y el número de operarios involucrados en cada actividad. La distancia total que se muestra al final de la tabla 5 representa la distancia que se debe recorrer para formar un par de calzado al pasar por cada estación de trabajo, Esta difiere de la distancia total recorrida incluida en la tabla 1, debido a que esta fue calculada con el flujo entre departamentos evaluado en un periodo de un mes, contabilizando todos los movimientos a partir de la capacidad máxima de 1092 pares, mientras que la distancia de la tabla 5 representa la cantidad en metros obtenidas por un recorrido evaluado dentro del diagrama espaguetti que se evaluó dentro de la planta. Por otra parte, el tiempo total mostrado es el tiempo requerido para producir una tarea (21 pares), ya que este si totaliza el tiempo empleado en cada estación para poder conformar toda la orden de producción, que es aproximadamente 6,5 días.

6.4. SIPOC DE LA EMPRESA CALZADO ANTONELLO

PROVEEDORES	ENTRADAS	PROCESOS	SALIDAS	CLIENTES
• Peleterías. • Pegaucho. • JAB Representaciones S.A. • EMCALI. • Servicios externos de maquilado, marroquinería, mensajería y estampado de la marquilla. • Proveedores de calzado femenino. • Empresas de repuestos y mecánicos para los equipos.	• Cueros, crupon y cuerinas. • Telas e hilos (calibres: 20,40 y 60). • Pegantes: Cemento de contacto, pegante ecológico y maxoll. • Plásticos y materiales sintéticos. • Suelas y plantillas. • Cordones. • Tacones. • Puntillas. • Caucho. • Hormas en pasta. • Resortes e hiladilla. • Espumas. • Ojales. • Pigmentos, tintes, ceras y barsol. • Material de empaque. • Repuestos para máquinas de corte, refil y enebre.	• Desarrollo del modelo inicial. • Despiece y elaboración de plantillas. • Escalamiento de tallas. • Elaboración de guarnecido y junta de piezas externas. • Cocido y reforzado de las uniones. • Detalles: chiripiado, grabados, monogramas, decoraciones, perforado 1 y 2, entre otros según el estilo. • Elaboración de suelas. • Montaje final del producto. • Embellecimiento. • Empaque.	• Calzado en cuero masculino en sus diferentes estilos: mocasines, corona, italiano, tubulares, plantisuela, entre otras referencias. • Calzado deportivo y urbano en cuero. • Calzado para dama. • Correas. • Bolsos. • Billeteras. • Llaveros. • Suelas y elaboración de tareas para otras fábricas. • Retazos de cuero y de las suelas que se venden por kilo.	• Distribuidores. • Almacenes. • Puntos de venta de la marca. • Fábricas de calzado. • Competidores de la región. • Consumidores finales.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Diagrama de Flujo de procesos de producción

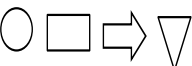
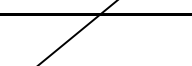
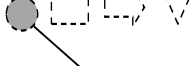
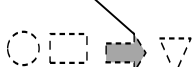
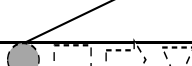
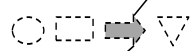
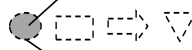
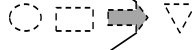
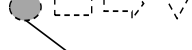
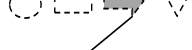
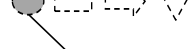
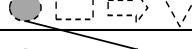
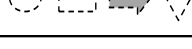
Número de actividad		Actividad	Tiempo por tarea* (min)	Costo por tarea* (\$)	No. Operarios	Máquina, Herramienta o Insumo	Requerimientos de manejo		
							¿Cómo se mueve?	Tipo recipiente	Distancia movimiento (m)
1		Desplazar las láminas de cuero desde la bodega de materia prima al proceso de corte	0,50		1		Manual		7,45
2		Cortar las piezas del calzado, según el molde de la referencia	210	\$ 73.500	1	Bisturí			
3		Desplazar las piezas cortadas al área de desbaste	0,41		1		Manual	Canasta	6,1
4		Desbastar las piezas que conforman el calzado (Disminuir su grosor en los bordes a coser)	90	\$ 14.700	1	Desbastadora			
5		Desplazar las piezas desbastadas al área de guarnecido	0,99		1		Manual	Canasta	14,9
6		Unir las piezas para formar el calzado	600	\$ 84.000	6	Máquina de coser, Cemento de contacto			
7		Desplazar las piezas a la bodega de producto en proceso	0,78		1		Manual	Canasta	11,66
8		Almacenar la orden de producción hasta que haya disponibilidad de suelas	7.200		1				

Tabla 5. (Continuación)

Tabla 51 (Continuación)									
9		Desplazar la orden de producción hacia la segunda fábrica, donde está ubicado el área de montado	2,21		1		Manual	Canasta	66,26
10		Montar el cuero a la horma	420,00	\$ 48.300	3	Pegadora de Cuñas, Pegadora de puntas			
11		Desplazar las piezas hacia el área de pegado de suelas	1,40		1		Manual	Canasta	21,01
12		Pegar la suela y el tacón	420	\$ 42.000	2	Horno, Pegadora de bolsa, Prensa Hidráulica y Prensa Mecánica			
13		Desplazar la orden de producción al área de alistamiento final y empaque	3,61		1		Manual	Canasta	54,15
14		Eliminar residuos adheridos al calzado, brillar, instalar cordones, plantillas (cuando sea necesario)	97,00	\$ 13.650	1	Pulidora			
15		Revisar el estado final del calzado (limpieza, brillo)	20,00						
16		Empacar cada par de calzado en cajas	63,00						
17		Desplazar los productos terminados al área de almacenamiento	0,97		1		Manual	Canasta	14,52
TOTAL			9130,86					TOTAL	196,05

Fuente: Elaboración propia

*Tarea: Término por el que se le conoce al tamaño de lote a producir, para este caso se hace referencia a 21 pares, cada tarea tiene un tiempo de producción promedio de 6,5 días, teniendo en cuenta que la espera puede ser variable, según la disponibilidad de suelas, ya que el proceso de las suelas le da prioridad a los pedidos de clientes externos para después dar paso a los pedidos de los locales de la fábrica.

6.5. DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA

El punto de fábrica de Calzado Antonello consta actualmente de dos instalaciones con dos pisos cada una, que no están comunicadas entre sí. Los departamentos que se van a estudiar en este trabajo como base para definir su nuevo diseño son los que se muestran en la tabla 6, definidos según las operaciones descritas en la figura 3 y la tabla 5 ya que son las actividades que se acoplan dentro de un mismo espacio y pueden identificar una sola ruta de producción. Cabe resaltar que las zonas comunes como los baños, las cocina y las oficinas administrativas se tratarán como departamentos fijos, por lo tanto no se tendrán en cuenta durante el análisis de reubicación de áreas.

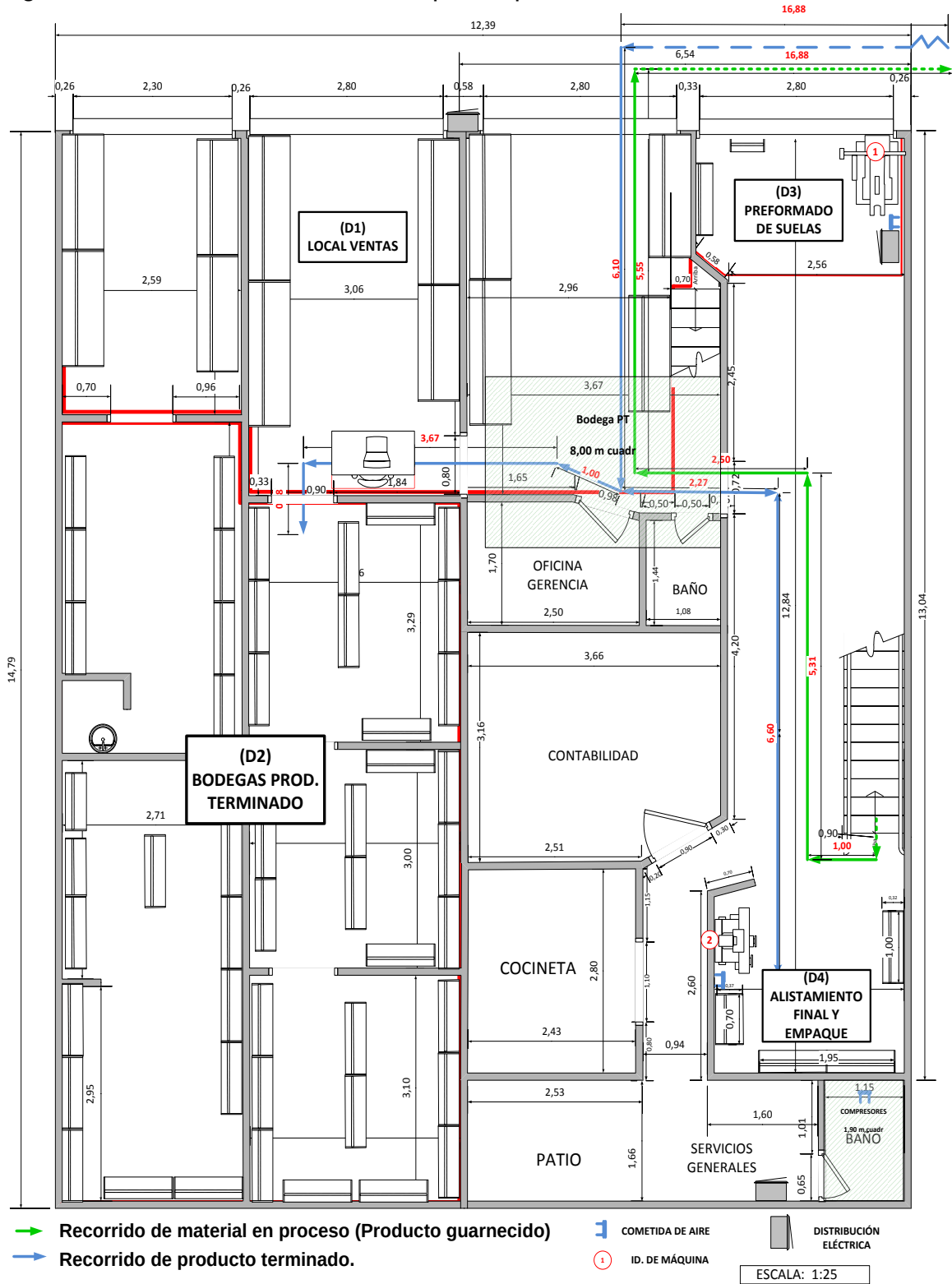
Tabla 6. Listado de departamentos en la empresa

No.	Departamento
D1	Local Ventas
D2	Bodegas Producto Terminado (PT)
D3	Preformado suelas
D4	Alistamiento y empaque
D5	Diseño
D6	Guarnecido
D7	Bodega Materia Prima (MP)
D8	Corte
D9	Bodega Producto en Proceso (PP)
D10	Desbaste
D11	Pulido de Suelas
D12	Grabado y nivelado de suelas
D13	Montado
D14	Pegado
D15	Plantillas

Fuente: Elaboración propia.

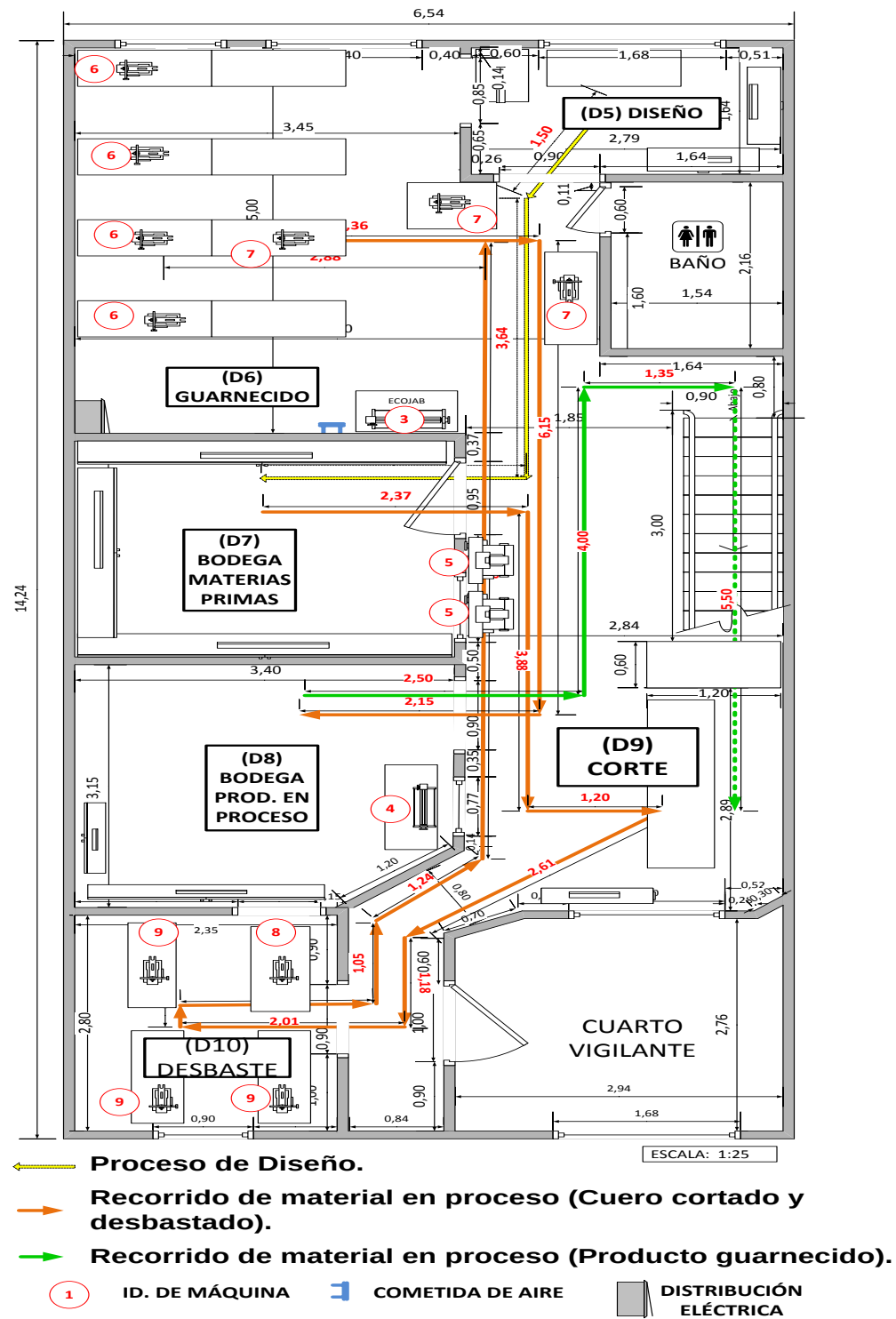
La distancia total recorrida por el material durante todo el proceso es 196,05 m, esto teniendo en cuenta la secuencia de procesos para la fabricación del calzado y según los lugares por donde se puede transitar y que se verá más detallado en las figuras 4 a la 7.

Figura 4. Distribución actual local 1 - primer piso.



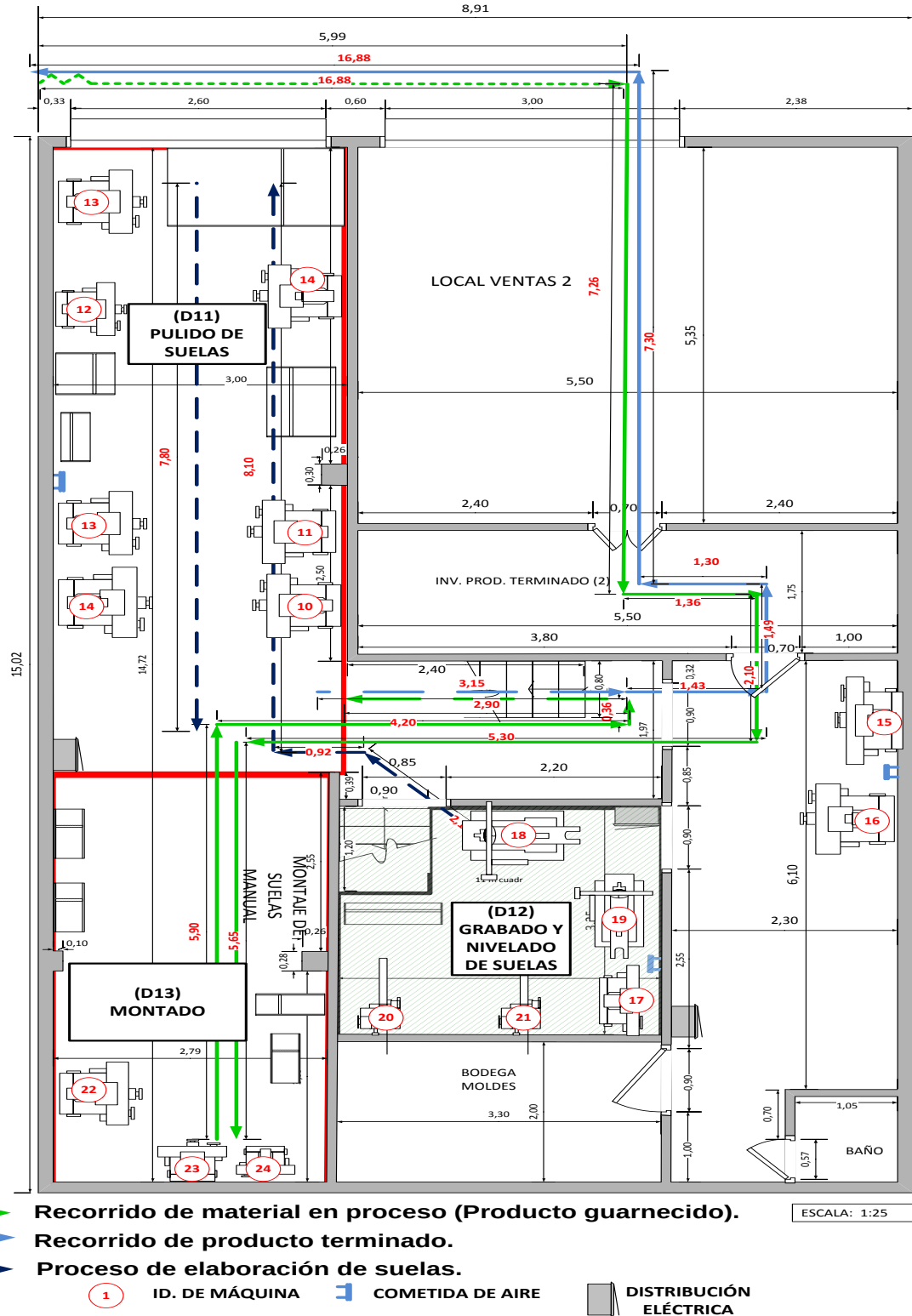
Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Distribución actual local 1 - segundo piso.



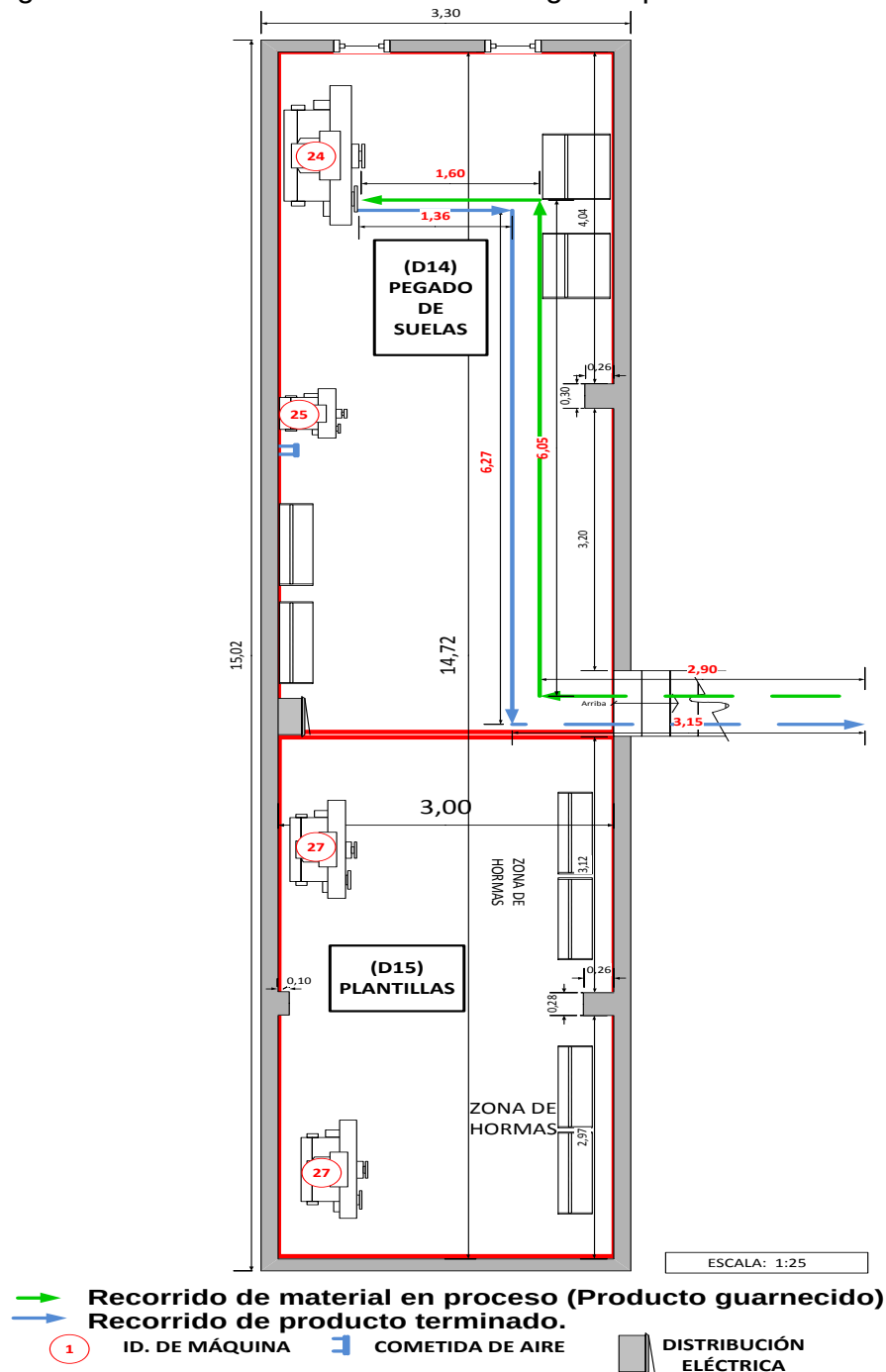
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Distribución actual local 2 - primer piso.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Distribución actual local 2 - segundo piso.



Fuente: Elaboración propia

Como método para elegir y describir el tipo de distribución recomendada para la empresa, a continuación se presenta la descripción de este tema con el fin de cumplir con el objetivo número 2.

7. ELECCIÓN DEL TIPO DE DISTRIBUCIÓN A SEGUIR

Con los datos obtenidos en el capítulo 6 con respecto a los procesos de negocio y operativos de la empresa, se logra apreciar que la capacidad instalada de la empresa Antonello es de 1092 pares mensuales, esto debido a los tiempos de cada uno de los procesos contenidos en la tabla 5 y teniendo en cuenta que se realicen tareas u órdenes de producción con mayor complejidad. Esta capacidad máxima también se corrobora al tener en cuenta el nivel de flujo que existe entre los departamentos de alistamiento final y empaque (D4) y las bodegas de producto terminado (D2), ya que en promedio en el mes, los operarios logran transportar 52 tareas completamente terminadas (ver anexo A), es decir, 1092 pares de calzado producidos en promedio al mes.

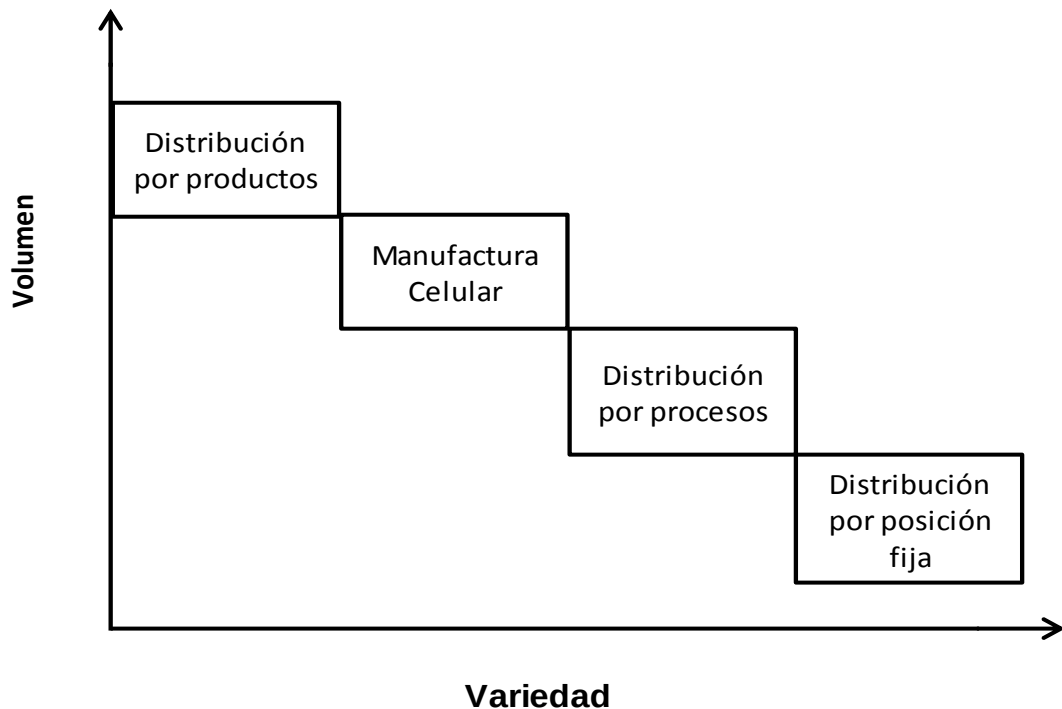
A pesar de que se pueda producir esta cantidad, calzado Antonello no cuenta con una línea de producción continua, sino que realiza ordenes de producción o proyectos dependiendo de lo que requieran sus puntos de venta para complementar los niveles de inventarios de ciertas referencias o según lo requerido por clientes externos, ordenes que varían según el modelo escogido, los colores, tipos de horma y suela, que proporciona actualmente más de 250 referencias activas que pueden ser producidas por sus operarios.

Según un informe del periodista Juan Fernando Rojas para el periódico *El colombiano*⁴² realizado en el presente año, en donde entrevista al gerente de Cueros Vélez S.A.S, se extrae que el volumen de ventas anuales de la mayor empresa de curtiembres del país es de 250 mil millones de pesos, valor que comparado con el promedio anual de ventas de 1320 millones de pesos, que se podrían conseguir con las ventas de los 12000 pares reportados por calzado Antonello en promedio, corresponderían al 18,9% del valor de ventas de Vélez, lo cual nos ayuda a considerar que la empresa calzado Antonello posee un volumen de producción bajo, debido a que es una pequeña empresa de tan solo 30 empleados y posee una capacidad instalada estrechamente relacionada a los tiempos que manejan sus operarios actualmente.

Después del análisis anterior de la empresa Antonello, en donde se define que el volumen de producción y ventas es bajo, y que se tiene una alta variedad de referencias, la figura 8 que confronta el volumen versus el sistema de producción nos permite ubicar a esta empresa de calzado en una distribución por procesos.

⁴²Tomado de ROJAS TRUJILLO, Juan Fernando. Cueros Vélez tendrá curtimbre propia este año en Amagá. En: <http://www.elcolombiano.com/cueros-velez-tendra-curtimbre-propia-este-ano-en-amaga-YG1239247> 08 de Febrero de 2015.

Figura 8. Gráfica de Volumen vs. Sistemas de Producción.



Fuente: Tomado y Adaptado de: CORONADO, Jairo. Métodos para Distribución en Planta. Colombia. Universidad de los Andes. 2007. p. 4.

De esta manera los departamentos descritos en la sección 6.5 seguirán siendo los mismos, ya que están organizados y distribuidos por procesos, abarcando las tareas descritas en la tabla 5 en una misma área, debido a la similitud de procesos, la relación entre las máquinas y a la cantidad de operarios que se requieren. Sin embargo, se buscará que las alternativas propuestas distribuyan en las localidades disponibles, estos departamentos de una forma más óptima según la cantidad de flujo y necesidad de cercanía.

Este tipo de distribución tiene ciertas ventajas y desventajas las cuales se describen en la tabla 7:

Tabla 7. Ventajas y Desventajas de la Distribución por proceso

Ventajas	Desventajas
• Flexibilidad en el proceso dada la versatilidad en los equipos y la cualificación del personal. • Se facilita la supervisión especializada. • Mayor fiabilidad en el proceso (El fallo de una máquina no implica la parada del proceso en general) • Se puede manejar equipo de uso general lo que conlleva menores costos.	• Implica un control más riguroso de la producción. • Mayores requerimientos de manejo de materiales. • Posibilidad de altos niveles de producto en proceso • Se pueden presentar largos recorridos durante el proceso productivo.

Tomado y Adaptado de: MACHUCA, Jose A. *et al.* Dirección de operaciones. España. Mc GrawHill Interamericana de España. 1995. p. 291.

Debido a que el tipo de construcción del local es basado en cuartos y no son áreas destapadas sin paredes a la vista, la principal desventaja que se puede presentar es que debido a las restricciones del espacio que deba albergar cada célula se incrementen las distancias a recorrer, sin embargo, continuar con una distribución que separe los procesos como se encuentran en la figura 3 que describe el diagrama de operaciones en dos fases principales (guarnecido y elaboración de suelas), permite que como se muestra en la tabla 7, el proceso no se vea afectado por el fallo de una máquina o un paro en la producción de ciertas etapas, ya que calzado Antonello también soporta sus operaciones con la venta de suelas a otras empresas como insumo, o maneja distribución de calzado de mujer mediante el uso de producto en consignación o manejo por compra-venta.

8. DEFINICIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

8.1. REQUERIMIENTOS DE ESPACIO

Para calcular los requerimientos de espacio de cada uno de los 15 departamentos de la fábrica es necesario tener en cuenta el área que ocupan las máquinas, mesas de trabajo, anaqueles, estanterías y el espacio designado para la circulación del personal y tránsito de materiales. En este caso se analizarán dichos espacios utilizando el siguiente planteamiento expuesto en el libro dirección de operaciones de José A. Machuca⁴³:

Superficie estática (S_E): Espacio destinado para las máquinas y los puestos de trabajo. Esta área está determinada por la sumatoria de las áreas de cada máquina que se alberga en los departamentos productivos, descritas en la tabla 4 de la sección 6.3. En los departamentos como bodegas y de elaboración manual como lo son alistamiento y empaque o el propio local de ventas, se tomaron las dimensiones de los puestos de trabajo y anaqueles que debían ser reubicados, excluyendo el mobiliario que verdaderamente no pertenecía, con el fin de disminuir el área actual de cada departamento, determinando de esta manera un área mínima requerida para cada departamento, valor que será usado como el área real que se debe reubicar dentro de cada localidad disponible. Tanto la cantidad como el área de máquinas y puestos de trabajo que constituye la superficie estática S_E como la comparación entre área actual del departamento y el área real requerida están incluidos en la tabla 8, que resume los cálculos realizados con la toma de mediciones en campo y la tabulación de los datos realizados en Excel.

Superficie gravitacional (S_G): Es el espacio para que los trabajadores puedan realizar su trabajo y los materiales y herramientas sean ubicados.

Donde $S_G = S_E \cdot n$ y donde n es el número de lados accesibles de las máquinas al trabajo.

Superficie de evolución (S_v): Espacio destinado a los recorridos de materiales y de personal. Esta área está determinada por la fórmula:

$$S_v = (S_E + S_G)K \quad (\text{Ec. 8})$$

⁴³ Tomado de MACHUCA, Jose A. *et al.* Dirección de operaciones. España. Mc GrawHill Interamericana de España. 1995. p. 293.

Donde Machuca expone a K como un coeficiente que puede variar desde 0,05 y 3 dependiendo de la razón de la empresa, o también es presentado como “el coeficiente que se determina dividiendo la altura de las máquinas o equipos móviles (H_m) entre doble altura de máquinas o equipos fijos (H_f)”⁴⁴. Es decir:

$$K = \frac{H_m}{2H_f} \quad (\text{Ec. 9})$$

Debido a que en el desarrollo de la investigación no se encontraron artículos en donde se encontrara el coeficiente apropiado para el sector de calzado, a que no se quiso especular sobre un valor adrede entre los límites que presenta Machuca en su libro con el fin de evitar valores de área que extralimiten o sean mucho menores a los requeridos por cada departamento, y debido a que en algunos de los 15 departamentos como lo son el local de ventas, las bodegas y diseño, no cuentan con diferenciación de equipos móviles y fijos, la ecuación 9 tampoco podría ser usada como lo utilizó Sigüas⁴⁴ en su proyecto; Por tanto se utilizó una serie de consideraciones que expone Tompkins, *et al*⁴⁵ en dónde se retratan medidas necesarias para pasillos dependiendo del paso entre máquinas o el acceso al departamento, en este caso se necesita un pasillo de mínimo 75 cm para que el operario se desplace entre dos objetos estáticos; cuando el operario camine entre un objeto estacionario y una máquina en funcionamiento el espacio designado debe ser de 90 cm y cuando camine entre dos máquinas en funcionamiento debe ser de 105 cm.

Gracias a estas consideraciones y a los planos realizados de la situación actual (figuras 4 a 7 de la sección 6.5) se estipuló que según las disposiciones actuales de las máquinas y puestos de trabajo se hicieran consideraciones de agregar pasillos de 75,90 o 105 cms según se considerara las líneas o acomodaciones de este tipo de objetos conservando así la distribución interna de las áreas en cuanto a acomodación, para dar el aproximado de superficie de evolución necesaria.

De esta manera, el espacio mínimo de área para cada departamento, viene dado por la superficie total (S_T):

$$S_T = S_E + S_G + S_V \quad (\text{Ec. 10})$$

Esta superficie total S_T se convierte entonces en el área comparable con la superficie disponible de cada localidad dentro del estudio.

⁴⁴ Tomado de SIGUAS SIFUENTES, Sandra. Proyecto de inversión para el servicio de alquiler de montacargas. Perú. N.A [En](#): Biblioteca virtual Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

⁴⁵ TOMPKINS, James A. *et al*. Planeación de instalaciones 3a. ed. México D.F. International Thomson editores. 2006. p. 112.

Según el fundamento anterior, las áreas mínimas requeridas para cada departamento son:

Tabla 8. Definición de áreas mínimas.

No.	Nombre	Área actual (m2)	Cantidad Máquinas	Cantidad de Puestos de trabajo y/o anaqueles	Área que ocupan las máquinas (m2)	Área puestos y/o anaqueles (m2)	S _E (Superficie estática) (m2)	S _G (Superficie gravitacional) (m2)	S _V (Superficie de elevación) (m2)	S _T Área requerida (m2)
D1	Local Ventas	39,34	0	14	0	14,92	14,92	0	18	32,92
D2	Bodegas PT	57,11	0	61	0	21,9	21,9	0	15,98	37,88
D3	Preformado suelas	5,84	1	2	0,66	0,45	1,11	2,22	1,35	4,68
D4	Alistamiento y empaque	7,02	1	3	0,45	0,3	1,63	1,63	1,8	5,06
D5	Diseño	4,59	0	5	0	2,03	2,03	0	1,58	3,60
D6	Guarnecido	21,33	11	0	7,56	0	7,56	7,56	12,6	27,73
D7	Bodega MP	9,52	0	7	0	4,5	4,5	0	2,48	6,98
D8	Corte	9,98	0	7	0	3,23	3,23	0	1,64	4,86
D9	Bodega PP	10,32	0	3	0	1,8	1,8	0	0,75	2,55
D10	Desbaste	6,58	4	4	0	1,99	1,99	1,99	2,415	6,40
D11	Pulido de Suelas	26,70	9	4	7,85	3,29	11,14	11,14	4,2	26,47
D12	Grabado y nivelado de suelas	9,65	5	1	2,89	0,3	3,19	3,19	3,15	9,53
D13	Montado	16,27	3	4	1,22	1,58	2,80	5,59	5,04	13,43
D14	Pegado	24,90	2	4	1,32	1,56	2,88	2,88	9,06	14,82
D15	Plantillas	18,99	2	3	1,2	0,9	2,1	2,1	6,41	10,61

Fuente: Elaboración propia.

8.2. DELIMITACIONES DE ESPACIO ASIGNABLE

En el estudio de espacios se determinó que en los dos locales disponibles existen 19 localidades asignables, que están conformadas por los quince departamentos ya existentes y se adicionan cuatro localidades más debido a que junto con el gerente se desea eliminar uno de los dos locales de ventas, pasando a ser un área disponible para albergar otro departamento, así como la unión de las dos bodegas de producto terminado y la utilización de un pasillo que actualmente no se está destinando para la producción.

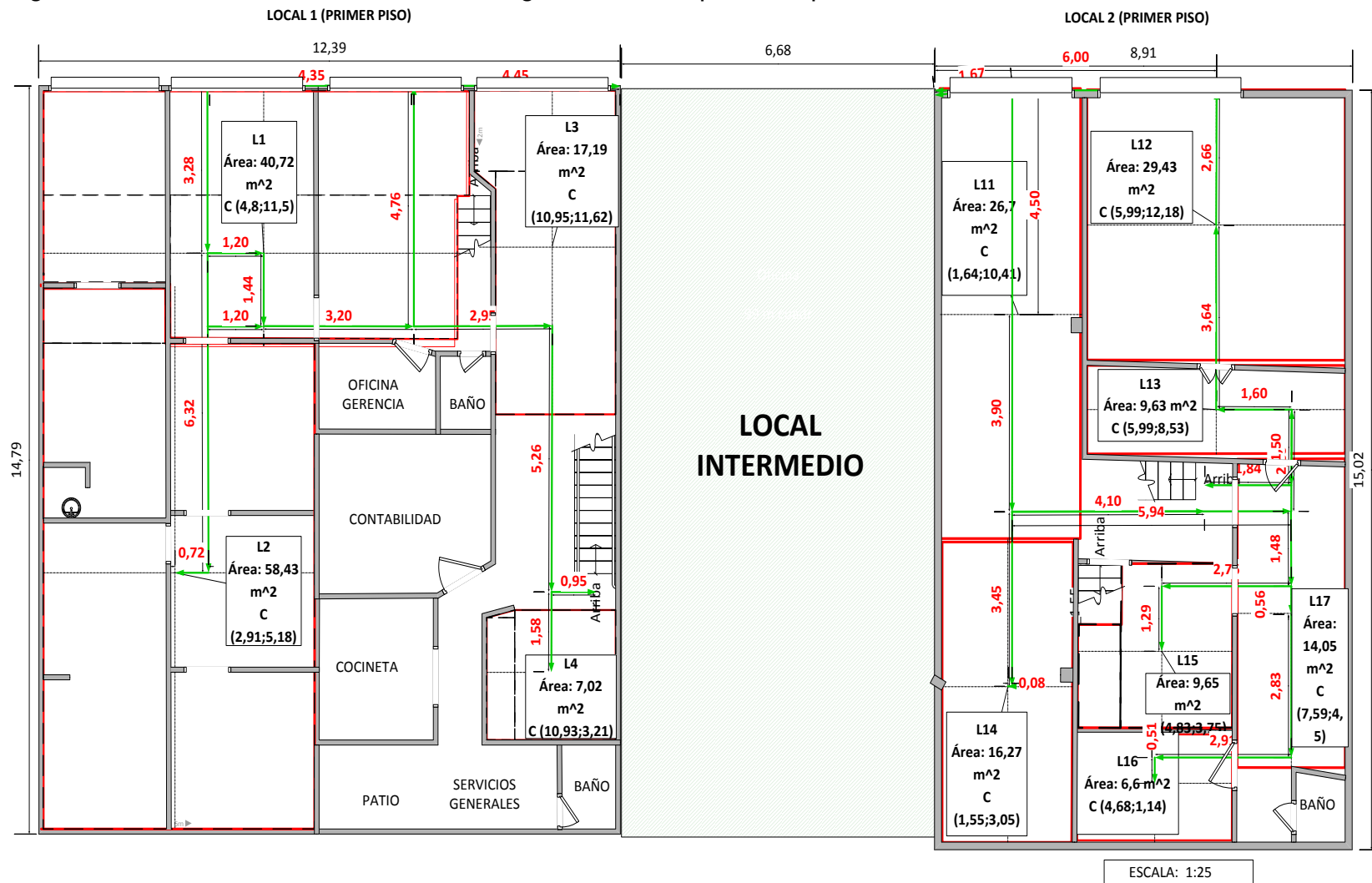
Dentro de los planos se exceptúan de uso las áreas comunes, los baños, los pasillos, las oficinas administrativas y la zona de servicios generales que se encuentra ubicada en la parte trasera del primer piso del local 1, en donde se localiza una cocineta, el patio de aseo y un baño. Debido a que son áreas que se requieren de forma determinada en toda empresa y que no se estudió su reasignación debido a que no son parte del proceso productivo, estas no jugarán un papel importante en la resolución de los modelos puesto que no poseen flujos entre departamentos. Las 19 localidades definidas se presentan en las figuras 9 y 10 y las características principales estudiadas son presentadas en la Tabla 9:

Tabla 9. Localidades designadas y sus características.

Nombre	Área (m ²)	CENTROIDE (m)		Cantidad de tomas trifasicas	¿Posee cometida de aire?	Localidad con caja trifasica más cercana	Localidad con cometida de aire más cercana	Ubicación
		X	Y					
L1	40,72	4,80	11,50	0	NO	L3	L3	1ER PISO LOCAL 1
L2	58,43	2,91	5,18	0	NO	L4	L4	
L3	17,19	10,95	11,62	1	SI			
L4	7,02	10,93	3,21	1	SI			
L5	21,33	2,28	11,50	11	SI			2DO PISO LOCAL 2
L6	4,59	5,06	13,35	0	NO	L5	L5	
L7	9,52	1,82	7,67	0	SI	L5		
L8	10,32	1,75	4,65	1	NO		L7	
L9	9,98	5,03	4,72	0	NO	L10	L7	
L10	6,58	1,29	1,52	4	NO		L7	
L11	26,70	1,64	10,41	9	SI			1ER PISO LOCAL 2
L12	29,43	5,99	12,18	0	NO	L17	L17	
L13	9,63	5,99	8,53	0	NO	L17	L17	
L14	16,27	1,55	3,05	3	SI			
L15	9,65	4,83	3,75	5	SI			
L16	6,60	4,68	1,14	0	NO	L17	L17	
L17	14,05	7,59	4,50	2	SI			
L18	24,90	1,69	10,66	2	SI			2DO PISO
L19	18,99	1,69	3,35	2	NO		L18	

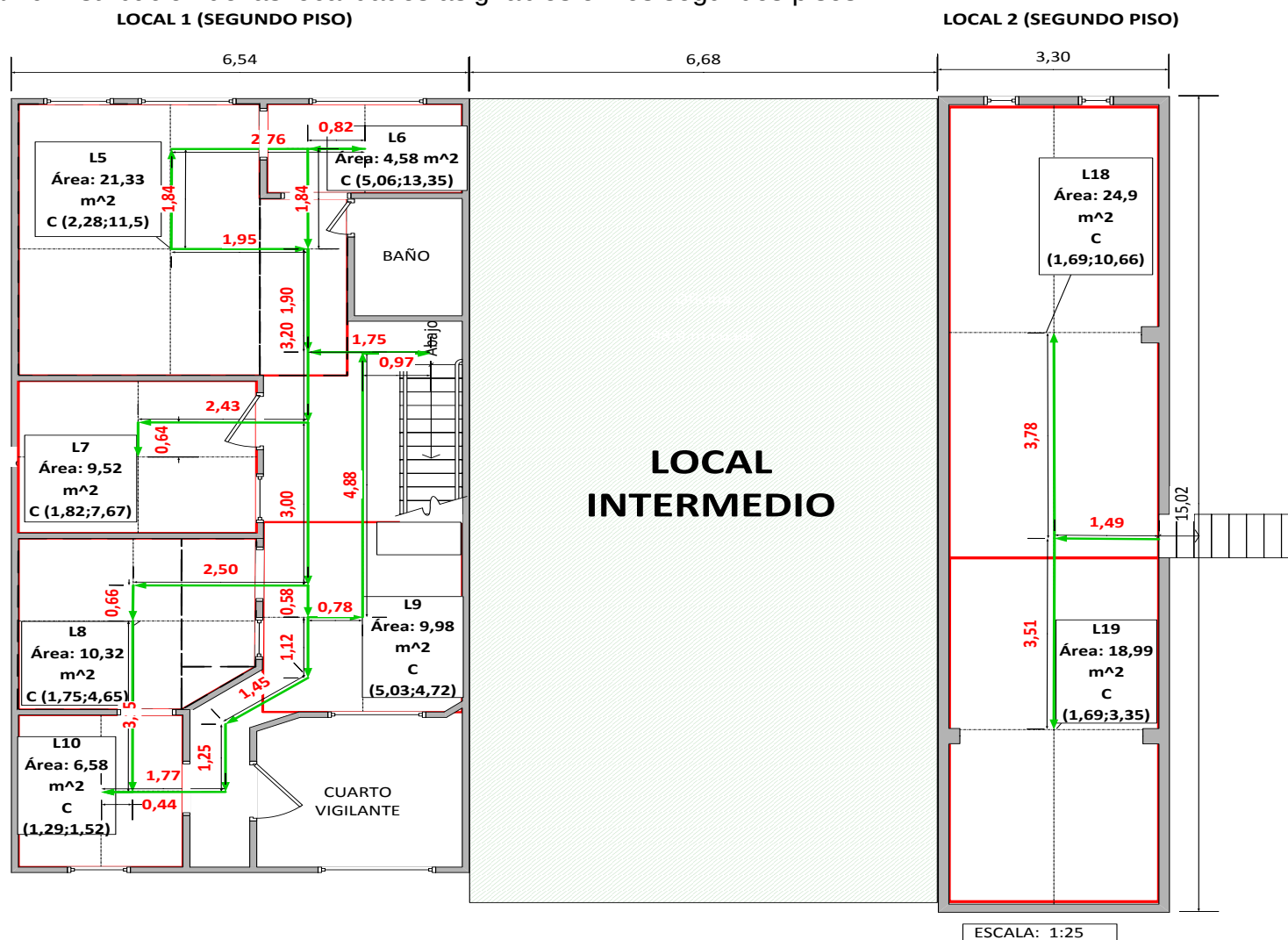
Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Distribución de las localidades asignables en los primeros pisos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Distribución de las localidades asignables en los segundos pisos.



Fuente: Elaboración propia.

8.3. DETERMINACIÓN DE COSTOS DE DISTRIBUCIÓN

En cada una de las alternativas, incluyendo la situación actual, se cuenta con distintos factores de costos que se desean evaluar en este caso, para encontrar la mejor asignación de departamentos a los lugares de la fábrica que están disponibles. Los principales factores de costo que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de alternativas y la cuantificación de estas están definidos de la siguiente manera:

8.3.1. Factor de costo de distancia: El recorrido que deben realizar las materias primas, los materiales en proceso y el producto terminado a través de la planta debe estar definido por la función flujo por distancia, tal como lo indica la función objetivo del QAP (Ec. 2), ya que este costo indica el valor en el que se incurre por recorrer cierto tramo dentro de la planta, determinado número de veces en los que se deben comunicar dos departamentos.

Para determinar este costo inicialmente se debe contar con los flujos que existe entre departamentos, en este caso calculado como el número promedio de veces que transita un operario de un departamento a otro en el término de un mes, movilizándolo consigo una canasta que tiene 60 cm (Largo) x 40 cm (Ancho) x 25 cm (Alto), con una capacidad de carga de 20 kg, que se utiliza para movilizar una tarea de producción (la cuál fue definida como 21 pares de calzado que están siendo producidos).

El recorrido se generará cada vez que la tarea asignada sea finalizada a los operarios de cada departamento, ya que para ser terminado un par de calzado, sigue los procesos descritos en el diagrama de la figura 3 y la tabla 5. Los flujos presentados entre departamentos son los descritos en la tabla 9, aquellos que no se presentan es porque no existe un flujo directo entre ese par de departamentos.

Tabla 10. Flujos presentados entre departamentos.

CONEXIÓN	FLUJOS (#Veces prom./mes)
D7-D6	26
D7-D8	78
D8-D10	78
D10-D6	182
D6-D9	78
D9-D13	52
D13-D14	52
D14-D4	52
D4-D2	104
D2-D1	4
D7-D3	26
D3-D12	52
D12-D11	52
D11-D14	52
D15-D4	52
TOTALES	940

Fuente: Elaboración propia

El valor de flujo más frecuente es de 52 veces/mes, el cual representa el número de tareas terminadas y almacenadas al final del proceso productivo (D14-D4: De pegado a alistamiento y empaque) y que de igual manera serían almacenados en la bodega de producto terminado (interacción entre D4 y D2), obteniendo una capacidad de producción de 1092 pares, elaborados en jornadas diarias de trabajo de 10 horas y durante un mes, esto considerando que existan ordenes de trabajo de forma regular.

Las distancias que se presentan entre una localidad y otra fueron calculadas gracias a los planos que se generaron inicialmente, ya que al estar en escala y mediante el software Visio® de Office, se lograron calcular por medio de distancias rectilíneas, las cantidades de movimiento que se presentan entre una localidad m y una localidad n , al desplazarse entre las áreas transitables, es decir, evitando paredes y pasando por puertas y escaleras necesarias para llegar de un centroide a otro. Los centroides de cada localidad son calculados dentro de un plano cartesiano posicionado en la esquina inferior izquierda de cada plano de cada piso, utilizando las fórmulas de centroides compuestos incluidas en el libro de

Resistencia de materiales de James Gere⁴⁶, ya que se contaba con áreas principalmente conformadas por rectángulos y triángulos (según lo ilustrado en las figuras 9 y 10 mostradas en la sección 8.2). El cálculo de estos centroides se realizó con las ecuaciones 11 y 12 y aunque fueron resumidas en las características de cada localidad de la tabla 9, se hace énfasis en cómo fue su cálculo para tener en cuenta que los desplazamientos se hacen de un centroide a otro obteniendo siempre distancias más representativas que dibujando rutas diferentes en un plano:

$$\bar{X} = \frac{Q_Y}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$\bar{Y} = \frac{Q_X}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{Y}_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde se tiene un área que está dividida en n partes y se tiene que Q_x y Q_y son las sumatorias de las coordenadas en x y en y, respectivamente de los centroides de cada uno de las i-ésimas partes. A denota la sumatoria de las áreas de cada una de las partes que la componen.

Las distancias rectilíneas o Manhattan, Norma L1 descrita en el artículo de Aznar y Guijarro⁴⁷, se utilizaron debido a que representan de una forma más adecuada los recorridos que se deben realizar dentro de la fábrica, ya que el viaje de un departamento a otro está acotado por paredes, puertas, pasillos y escaleras, y utilizar otras metodologías como la euclidiana no definiría de una forma adecuada estos recorridos, puesto que además el caso práctico es el de dos locales separados entre sí por un local aparte el cuál se debe transitar por la calle y además cada local posee dos pisos, esta distancia entre locales es de 6,68m.

Se debe tener en cuenta que para transitar entre pisos se tiene que hacer uso de dos escaleras, una por cada local, lo cual debe generar una penalidad dentro de la distancia que se deba recorrer entre localidades apartadas entre sí por la diferencia de nivel, estas penalidades fueron estipuladas al tener la imagen de que una escalera es un bosquejo de un triángulo con base y altura a una inclinación dada (ver figura 11). Esta asunción se realizó debido a que al ver una escalera de esta forma se podría tener penalidades distintas para los procesos de subir y bajar con carga las escaleras, puesto que ambos tipos de movimientos generan esfuerzos diferentes en el operario, y a esto se le suma el agravante que la carga en las canastas varía en eso si se moviliza solo materias primas, frente a transportar producto en proceso o terminado, lo cual haría mucho más difícil

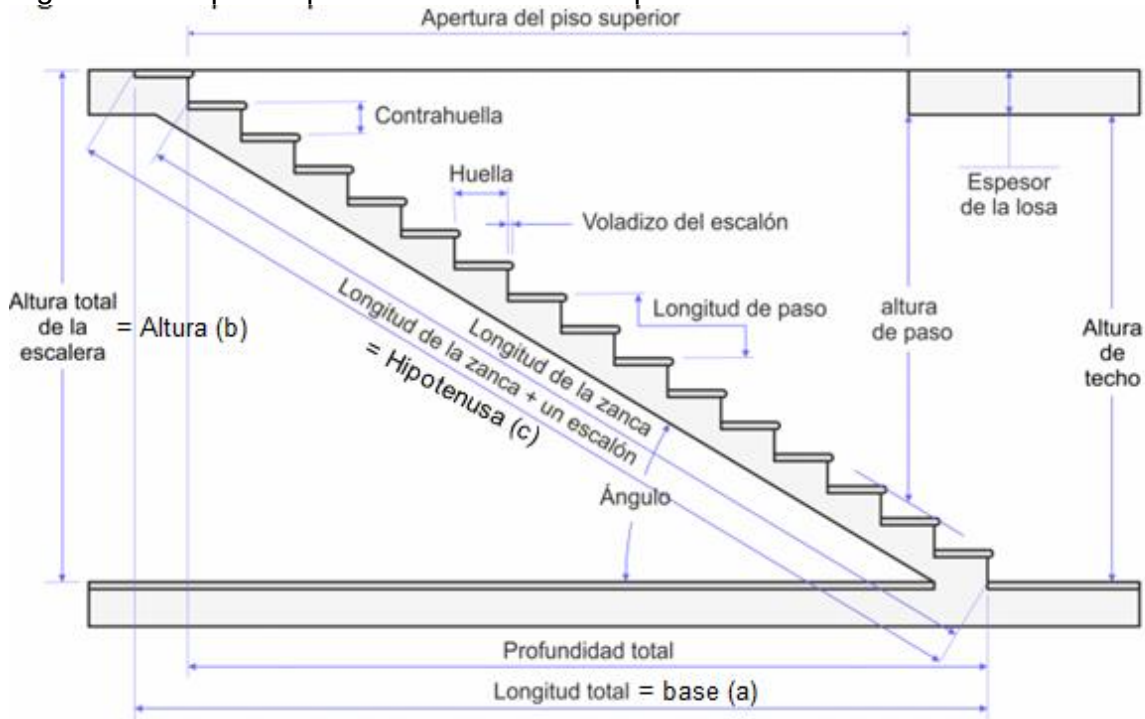
⁴⁶ Ecuaciones tomadas de GERE, James. *Resistencia de Materiales* 5ta ed. México D.F. Thomson Editores. 2002. p. 819-820.

⁴⁷ AZNAR BELLVER, Jerónimo; GUIJARRO MARTINEZ, Francisco. *Nuevos métodos de valoración. Modelos multicriterio*. Universidad Politécnica de Valencia. s.a. p. 37-42.

calcularse un peso promedio y con base en esto hacer una penalización a las distancias a recorrer.

El supuesto de penalidades de distancias en las escaleras puede ser visto según la figura 11 donde la altura total corresponde al cateto b , la longitud o base de la escalera corresponde al cateto a y la longitud de zanca o recorrido más escalón corresponde a la hipotenusa del triángulo que se pide asemejar en este caso, para comprender las ecuaciones 13 y 14 que se proponen:

Figura 11. Esquema para determinación de penalización.



Fuente: Tomado y adaptado de <http://www.toutcalculer.com/es/edificio/disenar-una-escalera.php>.

$$Subir_{escalera} = a + b \quad (\text{Ec. 13})$$

$$Bajar_{escalera} = \sqrt{a^2 + ab + b^2} \quad (\text{Ec. 14})$$

siendo a : base y b : Altura de la escalera

Esta penalización asigna un valor mayor que b (altura) y que c (hipotenusa), para el proceso de subir de un piso a otro con carga, ya que esta suma de catetos es mucho mayor que el valor calculado por la fórmula de hipotenusa de un triángulo (raíz de ambos catetos al cuadrado). Para el proceso de descenso, aunque el

esfuerzo es menor, la penalización asegura que ya que el operario se está movilizand o con carga la distancia debe ser mayor que c , puesto que dentro de la formula se agrega el componente de $a*b$, factor que garantiza un valor mayor. Esta penalización fue escogida, debido a que los resultados de distancia daban mayores a que si se hubiera tenido en cuenta la sumatoria entre cantidad de pasos y descansos de cada una de las escaleras, ya que ambas escaleras son diferentes e irregulares en su construcción, de igual manera se favorece el supuesto de darle un peso mayor a estos recorridos siendo que no se puede promediar el peso de la canastilla en cada una de las ocasiones en las que se debe movilizar. Las distancias obtenidas en las escaleras de acceso son las que se muestran en el final de la tabla 11 según las dimensiones de base y altura de cada escalera, logrando apreciar como las penalidades logran ser mayores según lo anterior:

Tabla 11. Penalidades de recorrido en escaleras (en metros).

Escalera de acceso	Base a (m.)	Altura b (m.)	Hipotenusa c (m.)	Penalidad por ascenso (m.)	Penalidad por descenso (m.)
Escalera Local 1	5,50	3,60	6,57	9,10	7,94
Escalera Local 2	2,40	2,50	3,47	4,90	4,24

Fuente: Elaboración propia

Se desea que todos los escenarios sean comparables entre sí, teniendo un factor de costo por distancia dado en pesos, por lo que la matriz de distancias calculadas con la ayuda de los planos realizados en Visio y los recorridos trazados en las figuras 9 y 10 (Ver anexo B donde se consignaron las distancias entre localidades en metros) se convirtió a pesos al determinar que una distancia entre dos localidades sería recorrida en un tiempo t , a una velocidad promedio de $\frac{1}{4}$ m/s, velocidad promedio calculada a los operarios que se movilizaban con las tareas de un local a otro al movilizarse en ese espacio a 15 metros/min. Teniendo presente este valor de velocidad en la que podrían recorrer las distintas distancias calculadas, se asumió que el valor en pesos sería el costo por operario que se deja de percibir productivamente, es decir, que teniendo en cuenta que un operario que se moviliza para transportar la tarea finalizada cada que la termina, no representa ganancias a la empresa, y ya que la operación de pago a los operarios de las actividades representativas que tienen los mayores flujos es realizada al destajo, se puede calcular un costo promedio por minuto de un operario que sea designado para movilizar las canastillas con tareas en proceso de la siguiente manera:

Tabla 12. Costos por procesos por operario.

(A) PROCESO	(B) TIEMPO PROMEDIO POR TAREA (h)	(C) CANT.TAREAS PROCESADAS DURANTE LA JORNADA DE 10 h.	(D) CANT. PARES/DÍA = (C) * 21 pares)	(E) PAGO AL DESTAJO POR PAR	(F) COSTO/MIN PARA OPERARIO = (D) * (E)
Corte	3-3 1/2	3	63	\$ 3.500	\$ 367,50
Preformado suelas	3 1/2	2	42	\$ 2.500	\$ 175,00
Grabado y nivelado	4	2	42	\$ 1.600	\$ 112,00
Pulido de suelas	4-4 1/2	2	42	\$ 3.000	\$ 210,00
Desbaste	1-1 1/2	7	147	\$ 700	\$ 171,50
Guarnecido	10 en cada grupo (Laboran 3 Grupos)	3	63	\$ 4.000	\$ 420,00
Montado	7	1	21	\$ 2.300	\$ 80,50
Pegado	7	1	21	\$ 2.000	\$ 70,00
Alistamiento final	2-2 1/2	4	84	\$ 650	\$ 91,00
COSTO PROM. / MIN DE UN OPERARIO					\$ 188,61
Vel. Prom:	0,25	m/s			
	15	m/min			

Fuente: Elaboración propia

El costo por minuto obtenido de un operario es de \$188,61 pesos/min y con la velocidad promedio se puede despejar según la fórmula de velocidad el tiempo requerido para movilizarse las distancias obtenidas entre la localidad “m” y “n”, (siendo $\text{Velocidad} = \text{Distancia} / \text{Tiempo}$ entonces $\text{Tiempo} = \text{Distancia} / \text{Velocidad}$), esto con el fin de que cada valor de la matriz de distancias ahora sea convertido a una función de $(\$/\text{min}) * (\text{m}/(\text{m}/\text{min}))$, de esta manera la matriz obtenida es la matriz de distancias con costos incluidos, cuyos resultados se pueden encontrar tabla 13. Esta matriz describe de esta manera el costo por cada vez que se deba hacer el recorrido entre un departamento “o” ya localizado en la localidad “m”, hasta el departamento “p” localizado en una localidad “n”, lo cual al multiplicarse por la cantidad de flujo refleja el costo de la distribución en términos de flujos y distancias a recorrer.

Estos valores son los que permiten que a las distribuciones alternas que se obtuvieron mediante las metodologías aplicadas en las secciones 8.4 a 8.6, puedan ser comparables entre sí, ya que con esta tabla 13 y el anexo A, qué referencia los valores de flujo, se calcula el costo de la distribución y las distancias totales recorridas según la reasignación de departamentos.

Tabla 13. Matriz de distancias con costos incluidos.

Distancias Rectilíneas en costos (\$)	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19
L1	\$ 0	\$ 103,48	\$ 114,30	\$ 181,70	\$ 358,49	\$ 367,41	\$ 365,03	\$ 403,88	\$ 361,63	\$ 441,73	\$ 309,95	\$ 343,40	\$ 382,88	\$ 441,10	\$ 446,63	\$ 537,92	\$ 459,33	\$ 538,17	\$ 535,40
L2	\$ 103,48	\$ 0	\$ 182,20	\$ 248,72	\$ 425,51	\$ 434,43	\$ 432,05	\$ 470,90	\$ 428,65	\$ 508,75	\$ 414,44	\$ 447,89	\$ 487,37	\$ 545,59	\$ 551,12	\$ 642,41	\$ 563,82	\$ 642,66	\$ 639,89
L3	\$ 114,30	\$ 182,20	\$ 0	\$ 105,75	\$ 282,54	\$ 291,47	\$ 289,08	\$ 327,93	\$ 285,68	\$ 365,78	\$ 346,54	\$ 379,99	\$ 419,47	\$ 477,69	\$ 483,22	\$ 574,51	\$ 495,92	\$ 574,76	\$ 571,99
L4	\$ 181,70	\$ 248,72	\$ 105,75	\$ 0	\$ 216,65	\$ 225,58	\$ 223,19	\$ 262,04	\$ 219,79	\$ 299,89	\$ 413,06	\$ 446,51	\$ 485,99	\$ 544,21	\$ 549,74	\$ 641,03	\$ 562,44	\$ 641,28	\$ 638,51
L5	\$ 343,87	\$ 410,89	\$ 267,93	\$ 202,04	\$ 0	\$ 57,84	\$ 103,36	\$ 142,97	\$ 120,33	\$ 180,82	\$ 575,24	\$ 608,68	\$ 648,17	\$ 706,38	\$ 711,92	\$ 803,21	\$ 724,62	\$ 803,46	\$ 800,69
L6	\$ 352,80	\$ 419,82	\$ 276,85	\$ 210,97	\$ 57,84	\$ 0	\$ 112,29	\$ 151,14	\$ 128,51	\$ 188,99	\$ 584,16	\$ 571,16	\$ 610,65	\$ 668,86	\$ 674,40	\$ 765,68	\$ 687,10	\$ 812,38	\$ 809,62
L7	\$ 350,41	\$ 417,43	\$ 274,47	\$ 208,58	\$ 103,36	\$ 112,29	\$ 0	\$ 116,06	\$ 93,43	\$ 138,19	\$ 581,78	\$ 615,22	\$ 654,71	\$ 712,92	\$ 718,46	\$ 809,74	\$ 731,16	\$ 810,00	\$ 807,23
L8	\$ 389,27	\$ 456,29	\$ 313,32	\$ 247,43	\$ 142,97	\$ 151,14	\$ 116,06	\$ 0	\$ 56,83	\$ 45,14	\$ 620,63	\$ 654,08	\$ 693,56	\$ 751,78	\$ 757,31	\$ 848,60	\$ 770,01	\$ 848,85	\$ 846,08
L9	\$ 347,02	\$ 414,04	\$ 271,07	\$ 205,18	\$ 120,33	\$ 128,51	\$ 93,43	\$ 56,83	\$ 0	\$ 80,10	\$ 578,38	\$ 611,83	\$ 651,31	\$ 709,53	\$ 715,06	\$ 806,35	\$ 727,76	\$ 806,60	\$ 803,83
L10	\$ 427,11	\$ 494,13	\$ 351,17	\$ 285,28	\$ 180,82	\$ 188,99	\$ 138,19	\$ 45,14	\$ 80,10	\$ 0	\$ 574,48	\$ 691,92	\$ 731,41	\$ 789,63	\$ 795,16	\$ 886,45	\$ 807,86	\$ 886,70	\$ 883,93
L11	\$ 309,95	\$ 414,44	\$ 346,54	\$ 413,06	\$ 589,85	\$ 598,78	\$ 596,39	\$ 635,24	\$ 592,99	\$ 673,09	\$ 0	\$ 214,77	\$ 169,00	\$ 44,39	\$ 193,26	\$ 227,97	\$ 149,38	\$ 228,22	\$ 225,45
L12	\$ 343,40	\$ 447,89	\$ 379,99	\$ 446,51	\$ 623,30	\$ 632,22	\$ 629,84	\$ 668,69	\$ 626,44	\$ 706,54	\$ 214,77	\$ 0	\$ 45,77	\$ 210,11	\$ 160,57	\$ 195,28	\$ 116,69	\$ 235,51	\$ 232,75
L13	\$ 382,88	\$ 487,37	\$ 419,47	\$ 485,99	\$ 662,78	\$ 671,71	\$ 669,32	\$ 708,17	\$ 665,92	\$ 746,02	\$ 169,00	\$ 45,77	\$ 0	\$ 164,34	\$ 114,80	\$ 149,51	\$ 70,92	\$ 189,74	\$ 186,98
L14	\$ 441,10	\$ 545,59	\$ 477,69	\$ 544,21	\$ 721,00	\$ 729,93	\$ 727,54	\$ 766,39	\$ 724,14	\$ 804,24	\$ 44,39	\$ 210,11	\$ 164,34	\$ 0	\$ 188,61	\$ 223,32	\$ 144,73	\$ 223,57	\$ 220,80
L15	\$ 446,63	\$ 551,12	\$ 483,22	\$ 549,74	\$ 726,53	\$ 735,46	\$ 733,07	\$ 771,92	\$ 729,67	\$ 809,77	\$ 193,26	\$ 160,57	\$ 114,80	\$ 188,61	\$ 0	\$ 136,55	\$ 57,97	\$ 201,69	\$ 198,92
L16	\$ 537,92	\$ 642,41	\$ 574,51	\$ 641,03	\$ 817,82	\$ 826,75	\$ 824,36	\$ 863,21	\$ 820,96	\$ 901,06	\$ 227,97	\$ 195,28	\$ 149,51	\$ 223,32	\$ 136,55	\$ 0	\$ 78,59	\$ 193,77	\$ 191,00
L17	\$ 459,33	\$ 563,82	\$ 495,92	\$ 562,44	\$ 739,23	\$ 748,16	\$ 745,77	\$ 784,62	\$ 742,37	\$ 822,47	\$ 149,38	\$ 116,69	\$ 70,92	\$ 144,73	\$ 57,97	\$ 78,59	\$ 0	\$ 175,66	\$ 172,89
L18	\$ 529,92	\$ 634,41	\$ 566,51	\$ 633,03	\$ 809,82	\$ 818,75	\$ 816,36	\$ 855,21	\$ 812,96	\$ 893,06	\$ 219,97	\$ 227,26	\$ 181,49	\$ 215,32	\$ 193,44	\$ 185,52	\$ 167,41	\$ 0	\$ 91,79
L19	\$ 527,15	\$ 631,64	\$ 563,74	\$ 630,26	\$ 807,05	\$ 815,98	\$ 813,59	\$ 852,44	\$ 810,20	\$ 890,29	\$ 217,20	\$ 224,50	\$ 178,73	\$ 212,55	\$ 190,67	\$ 182,75	\$ 164,64	\$ 91,79	\$ 0

Fuente: Elaboración propia

8.3.2. Factor de costos de adecuación: La generación de alternativas plantea una reubicación de los departamentos hacia las localidades disponibles, teniendo en cuenta los flujos y las distancias entre departamentos, pero se debe tener en cuenta que estos movimientos tienen consigo unos costos por conceptos de traslado de máquinas, estanterías y diversos costos asociados al funcionamiento de las máquinas de cada departamento y que de esta manera puedan estar listas para operar.

Estos costos fueron estudiados de acuerdo a las siguientes necesidades:

- Costos de adecuación eléctricos (requerimientos de energía trifásica de las máquinas).
- Costos de adecuación de fuentes neumáticas (cometidas de aire adicionales).
- Costos de iluminación de las localidades L2, L16 y L17.
- Costos de nivelación de suelo para las bodegas de producto terminado (L2) y la localidad L16.
- Costos de movilización de máquinas, puestos y estanterías.

Los costos de adecuación fueron calculados mediante cotizaciones de los elementos que más influían dentro del costo estudiado, ya que pueden existir costos variables muy pequeños que no alteren el propósito de añadir esta variable al estudio, y debido a que las cotizaciones realizadas pueden llegar a variar de valor en la fecha en la que se decida aplicar la alternativa.

Los requerimientos neumáticos y eléctricos que requieren las máquinas y equipos que se encuentran en cada departamento se presentan en la tabla 14, con el fin de tener el punto comparativo entre lo que se requiere para poder mover el departamento y la disponibilidad de la localidad que la pueda albergar (según las características incluidas en la tabla 9 de la sección 8.2):

Tabla 14. Requerimientos de máquinas.

	DEPARTAMENTO	CANT. ANAQUELES Y/O PUESTOS	CANT. MÁQUINAS	REQ. FUENTE ELECTRICA	REQ. NEUMÁTICO
D1	Local Ventas	14	0	-	-
D2	Bodegas PT	61	0	-	-
D3	Preformado suelas	2	1	TRIFASICA	SI
D4	Alistamiento y empaque	3	1	TRIFASICA	SI
D5	Diseño	5	0	-	-
D6	Guarnecido	0	11	TRIFASICA	SI
D7	Bodega MP	7	0	-	-
D8	Corte	7	0	-	-
D9	Bodega PP	3	0	-	-
D10	Desbaste	4	4	TRIFASICA	-
D11	Pulido de suelas	4	9	TRIFASICA	SI
D12	Grabado y nivelado de suelas	1	5	TRIFASICA	SI
D13	Montado	4	3	TRIFASICA	SI
D14	Pegado	4	2	TRIFASICA	SI
D15	Plantillas	3	2	TRIFASICA	-

Fuente: Elaboración propia

Costos de adecuación eléctrica: Para que las máquinas de los departamentos puedan contar con una fuente trifásica en cada una de las localidades es necesario tener presente que pueden existir dos escenarios, el primero de ellos es que en la localidad se cuente con fuente trifásica, pero no se cuente con los tomacorrientes necesarios para el departamento que se piensa albergar, es por esto que el costo sería únicamente del valor de un punto o toma. Se incurre en este costo cuando se presentan las siguientes dos condiciones:

- (1) $Tomas\ necesarios > Tomas\ actuales$
- (2) la localidad L_m cuenta con Energía. Trifasica

Es decir, cuando se necesitan más tomas eléctricos de los que hay en el departamento donde se van a reubicar En este caso el costo de adecuación eléctrica ($Cadec_{energía}$) se calcula como:

$$Cadec_{energía} = C_e * (Tomas\ necesarios - Tomas\ actuales); \text{ (Ec. 15)}$$

Donde C_e es el costo unitario por toma corriente, que incluye los conceptos incluidos en la tabla 15:

Tabla 15. Cotización de tomacorriente.

Toma industrial	\$ 20.500,00
Cable encauchetado 3x10 (Metro)	\$ 4.700,00
Instalación	\$ 4.000,00
Costo unitario de tomacorriente	\$ 29.200,00

Fuente: Cotización realizada en Homecenter e Intereléctricos.

El segundo escenario ocurre cuando la localidad no cuenta con distribución eléctrica trifásica, según lo indicado en la tabla 9 de la sección 8.2. En este caso al poseer la distancia entre la localidad que no cuenta con esta característica y la localidad más cercana de la cual se pueda hacer una derivación, se puede realizar el supuesto de que esta distancia ayudaría a calcular la cantidad de metros aproximados para realizar la instalación de las tres líneas eléctricas, que en conjunto con la regata necesaria, se totaliza el costo de instalación, valor que se suma a los costos de tomas necesarios al momento de reubicar. Los valores cotizados para realizar una derivación trifásica están incluidos en la tabla 16:

Tabla 16. Costos asociados con la realización de una derivación trifásica.

Cable #10 x metro (Para 3 fases a \$1350 c/m)	\$ 4.050,00
Tubo conduit PVC 1/2 x por 3 metros	\$ 783,33
Costo por metro de cometa de energía (Costo variable)	\$ 4.833,33
Instalación punto de energía trifásico (Costo fijo)	\$ 15.000,00

Fuente: Cotización realizada en Intereléctricos.

Costos de adecuación neumática: En la fábrica existen máquinas como la preformadora, la ECOJAB, las referenciadoras y algunas prensas que requieren de una cometa de aire, por lo cual se describen los departamentos que albergan estos equipos con el requerimiento de fuente neumática en la tabla de requerimientos de máquinas. En este caso en la distribución inicial (figuras 4 a 7), se ubican cuáles son las cometas de aire más cercanas, y ya que para extender esto hasta la localidad que lo requiere, solo se debe incurrir en un costo por metro de tubería galvanizada de ½ pulgada y los acoples, en este caso al igual que anterior se calcula este costo multiplicando el costo variable por los metros necesarios más la instalación del punto, según los costos de la tabla 17.

Tabla 17. Costos asociados con la instalación de una cometida de aire.

Item	Valor (\$)	Total costos variables (Valor por m. en cometida)	Total costos fijos por cometida
Tubo metálico EMT Conduit Galvanizado de 1/2 x 3Mts	\$ 2.450,00		
Capacetes lisos para tubería (2 unds)	\$ 3.200,00		
Acople rápido	\$ 24.900,00		
Instalación de tubería de aire comprimido	\$ 12.000,00	\$ 2.450,00	\$ 40.100,00

Fuente: Cotización realizada en Intereléctricos.

Costos de iluminación: Debido a que las localidades L2, L16 y L17 anteriormente eran utilizadas únicamente como bodegas y pasillo, respectivamente, y a que en el modelo de alternativas se quiere estudiar la posibilidad de asignar departamentos productivos, se debe contar con una mejor iluminación para estas zonas, lo cual es calculado por el factor de luminosidad requerido para una sala o lugar amplio que está cerrado, teniendo en cuenta que:

$$\text{Flujo Luminoso} = \frac{\text{Iluminancia (Lux)} * \text{Superficie (m}^2\text{)}}{\text{Coef.Utilización} * \text{Coeficiente Mtto.}} \quad (\text{Ec. 16})$$

Si se tiene que la iluminación de un salón debe ser de 500 Lux, el coeficiente de mantenimiento es de 0,6, el coeficiente de utilización k determinado por el área y la altura del espacio a iluminar tomado del artículo de N-Ergiza⁴⁸, y que la luminiscencia de las lámparas cotizadas es de 1700 Lux, se obtiene que el costo de iluminar estas áreas estará dado por:

Tabla 18. Cotización de luminaria de 1700 Lux o Lm/m².

Costo de cada Luminaria	\$ 58.300,00
Lámpara Industrial 2 x 32 - T8 de Sobreponer con Especular	

Fuente: Cotización realizada en Intereléctricos.

Tabla 19. Cantidad de luminarias requeridas para L2,L16 y L17.

Localidad	Área (m2)	Factor K	Flujo luminoso	Cantidad	Existentes	Total requerido	Costo por Localidad
L2	58,43	1,43	12272,71	7	5	2	\$ 116.600,00
L16	6,60	0,35	5724,00	3	1	2	\$ 116.600,00
L17	14,05	0,46	9082,80	5	3	2	\$ 116.600,00

Fuente: Elaboración propia

⁴⁸ Ecuación tomada del artículo publicado en NERGIZA. LA ENERGÍA DEL DÍA A DÍA. ¿Cuánta potencia lumínica necesito? En: <http://nergiza.com/cuanta-potencia-luminica-necesito/>. 2015.

Costos de nivelado de suelo: Nuevamente se tiene que para poder utilizar las localidades L2 y L16 para procesos productivos se debe contar con mejores condiciones de suelo, para poder que se anclen las máquinas y no se generen vibraciones que afecten el proceso productivo, este costo fue calculado mediante la cotización de la instalación por metro cuadrado de baldosa, y se determinó un costo promedio aproximado del metro cuadrado de baldosa, estos costos multiplicados por el área de las localidades se muestran en la tabla 20:

Tabla 20. Costos asociados a la nivelación del suelo.

Costo de Ceramica promedio x metro ²	\$ 10.000	Localidad	Área (m ²)	Costo por Localidad
Instalación x metro ²	\$ 12.000	L2	58,43	\$ 1.285.351,79
TOTAL x Metro²	\$ 22.000	L16	6,60	\$ 145.200,00

Fuente: Elaboración propia

Costos de movilización e instalación de máquinas y estanterías: Para estimar el costo por mover departamentos a nuevas localidades, se estima que se debe contar con un técnico para la instalación y puesta en marcha de las máquinas y de 3 operarios de la fábrica para movilizar máquinas, estanterías y puestos de trabajo según se requieran en la nueva disposición, si el salario mensual de un técnico para este tipo de maquinaria es de \$800.000 y el de un operario se estima como el mínimo legal vigente, y además si todos estos movimientos se deben de hacer en un fin de semana para no afectar la producción, es decir, en dos días de 8 horas c/u se tendrá el costo que se les debe pagar por la jornada.

Además de esto, se debe contar con un montacargas a combustión cuyo valor/hora es de \$45.000 pesos en el primer día para mover máquinas y mobiliario de un local a otro, y con el alquiler de un estibador manual cuyo valor por día es de \$40.000 pesos (Se alquila mínimo dos días) para poder movilizarse dentro de cada local con las cargas. Los costos estimados en los que se incurre al mover objetos de los departamentos (Sean los movimientos que sean dentro de los 2 días que se requieren) serán:

Tabla 21. Costos de movilización de maquinaria y mobiliario.

CONCEPTO	Costo x hora	Cant. Horas	Costo Total
Costo técnico de instalación	\$ 3.846,15	16	\$ 61.538,46
Costo de 3 operarios para carga/descarga	\$ 3.097,84	16	\$ 49.565,38
Costo de alquiler de montacargas	\$ 45.000,00	6	\$ 270.000,00
Costo de alquiler estibador manual	\$ 5.000,00	16	\$ 80.000,00
COSTO FIJO POR MVTO. DE MAQUINAS Y EQUIPO			\$ 461.103,85

Fuente: Valores de montacargas cotizados en Multicargas del Valles S.A.S.

Tabla 22. Matriz de costos de adecuación.

Costo adecuación \$	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19
D1	\$ 0	\$ 1.401.951,79	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
D2	\$ 0,00	\$ 0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
D3	\$ 150.505,50	\$ 1.604.747,79	\$ 0	\$ 0,00	\$ 0,00	.	\$ 83.930,00	\$ 62.713,50	\$ 133.291,83	\$ 67.025,50	\$ 0,00	\$ 151.889,33	\$ 125.378,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 391.620,83	\$ 116.600,00	\$ 0,00	\$ 57.985,00
D4	\$ 150.505,50	\$ 1.604.747,79	\$ 0,00	\$ 0	\$ 0,00	.	\$ 83.930,00	\$ 62.713,50	\$ 133.291,83	\$ 67.025,50	\$ 0,00	\$ 151.889,33	\$ 125.378,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 391.620,83	\$ 116.600,00	\$ 0,00	\$ 57.985,00
D5	\$ 0,00	\$ 1.401.951,79	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 261.800,00	\$ 116.600,00	\$ 0,00	\$ 0,00
D6	\$ 442.505,50	\$ 1.896.747,79	.	.	\$ 0	.	.	.	.	.	.	\$ 443.889,33	.	.	.	.	.	.	.
D7	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	.	\$ 0	\$ 0,00	\$ 0,00	.	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	.	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00
D8	\$ 0,00	\$ 1.401.951,79	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	.	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 261.800,00	\$ 116.600,00	\$ 0,00	\$ 0,00
D9	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00
D10	\$ 175.735,00	\$ 1.603.786,79	\$ 87.600,00	\$ 87.600,00	\$ 0,00	.	\$ 171.530,00	\$ 87.600,00	\$ 162.588,33	\$ 0	\$ 0,00	\$ 176.653,33	\$ 159.060,00	\$ 87.600,00	\$ 0,00	\$ 423.808,33	\$ 204.200,00	\$ 87.600,00	\$ 87.600,00
D11	\$ 384.105,50	\$ 1.838.347,79	.	.	.	.	.	.	.	.	\$ 0	\$ 385.489,33	.	.	.	.	.	.	.
D12	\$ 267.305,50	\$ 1.721.547,79	\$ 116.800,00	.	\$ 0,00	.	.	\$ 179.513,50	\$ 250.091,83	.	\$ 0,00	\$ 268.689,33	\$ 242.178,00	\$ 116.800,00	\$ 0	.	\$ 233.400,00	\$ 116.800,00	\$ 174.785,00
D13	\$ 208.905,50	\$ 1.663.147,79	\$ 58.400,00	.	\$ 0,00	.	.	.	.	.	\$ 0,00	\$ 210.289,33	.	\$ 0	.	.	\$ 175.000,00	\$ 58.400,00	\$ 116.385,00
D14	\$ 179.705,50	\$ 1.633.947,79	\$ 29.200,00	.	\$ 0,00	.	.	.	.	.	\$ 0,00	\$ 181.089,33	.	\$ 0,00	.	.	.	\$ 0	\$ 57.985,00
D15	\$ 117.335,00	\$ 1.545.386,79	\$ 29.200,00	.	\$ 0,00	.	.	.	.	.	\$ 0,00	\$ 118.253,33	.	\$ 0,00	.	.	\$ 116.600,00	\$ 0,00	\$ 0

* El punto (.) representa que el departamento “o” no puede ser ubicado en la localidad “m” debido a que no cumple con el área requerida para disponer el departamento. Fuente: Elaboración propia.

En total el costo de adecuar un departamento en determinada localidad mostrado en la tabla anterior, está sujeto a las variables anteriormente descritas, por lo cual se calcularon y se expresaron todas como una matriz de departamento – localidad, la cual expresa el valor variable de la nueva disposición (Suma de costos de adecuación eléctrica, neumática, iluminación y piso para localizar el departamento “o” en la localidad “m”).

Por otra parte los costos de movilización serán considerados como un costo fijo dentro del cálculo total de la inversión de la nueva distribución, ya que así se movilice un solo departamento hacia un local diferente, ya se requiere la contratación de montacargas y ayuda adicional, además es propicio que los movimientos se hagan dentro del periodo de fin de semana, comprendiendo el total de horas calculadas dentro de la tabla de costos de movilización (Tabla 21), el valor de dos días requeridos para movimientos también se justifica teniendo en cuenta que el alquiler del montacargas manual es mínimo por ese periodo de tiempo y también teniendo en cuenta que ese es el tiempo que ha tomado el traslado de un departamento en oportunidades anteriores y que el fin de semana es el espacio deseado para realizar este tipo de labores según lo expresado por el propietario de la fábrica.

8.4. ALTERNATIVA PROPUESTA MEDIANTE SLP

Como ya se ha explicado anteriormente, se van a utilizar diversas metodologías para obtener las alternativas a la distribución de planta actual. Una de ellas es el Systematic Layout Planning – SLP, del que resultará una alternativa basada en las necesidades de cercanía entre los departamentos. Estas necesidades se expresan según las calificaciones de cercanías propuestas por Muther y como medida de justificación a la cercanía se formulan unas razones específicas al caso estudio.

La tabla de relación de actividades ilustrada en la figura 12 se obtuvo a partir de las indagaciones realizadas a trabajadores de cada departamento de la fábrica, acerca de sus preferencias y necesidades de relación con los otros departamentos, englobando sus opiniones dentro de 6 razones de importancia frente a la cercanía, que se describen en la tabla 24, y que se eligieron debido a que son factores clave que benefician las medidas de desempeño a evaluar en cada una de las alternativas, ya que estas razones buscan a su vez evitar contraflujos y obtener una mejor secuenciación del proceso, todo desde una perspectiva cualitativa que de soporte a las calificaciones descritas en Tompkins

(ver Tabla 23). A continuación se presentan las tablas 23 y 24 con las se indago al personal y lograron calificar la cercanía entre departamentos.

Tabla 23. Calificación de cercanías

Valor	Cercanía
A	Absolutamente necesario
E	Especialmente Importante
I	Importante
O	Ordinario Cercanía
U	No importante
X	Indeseable

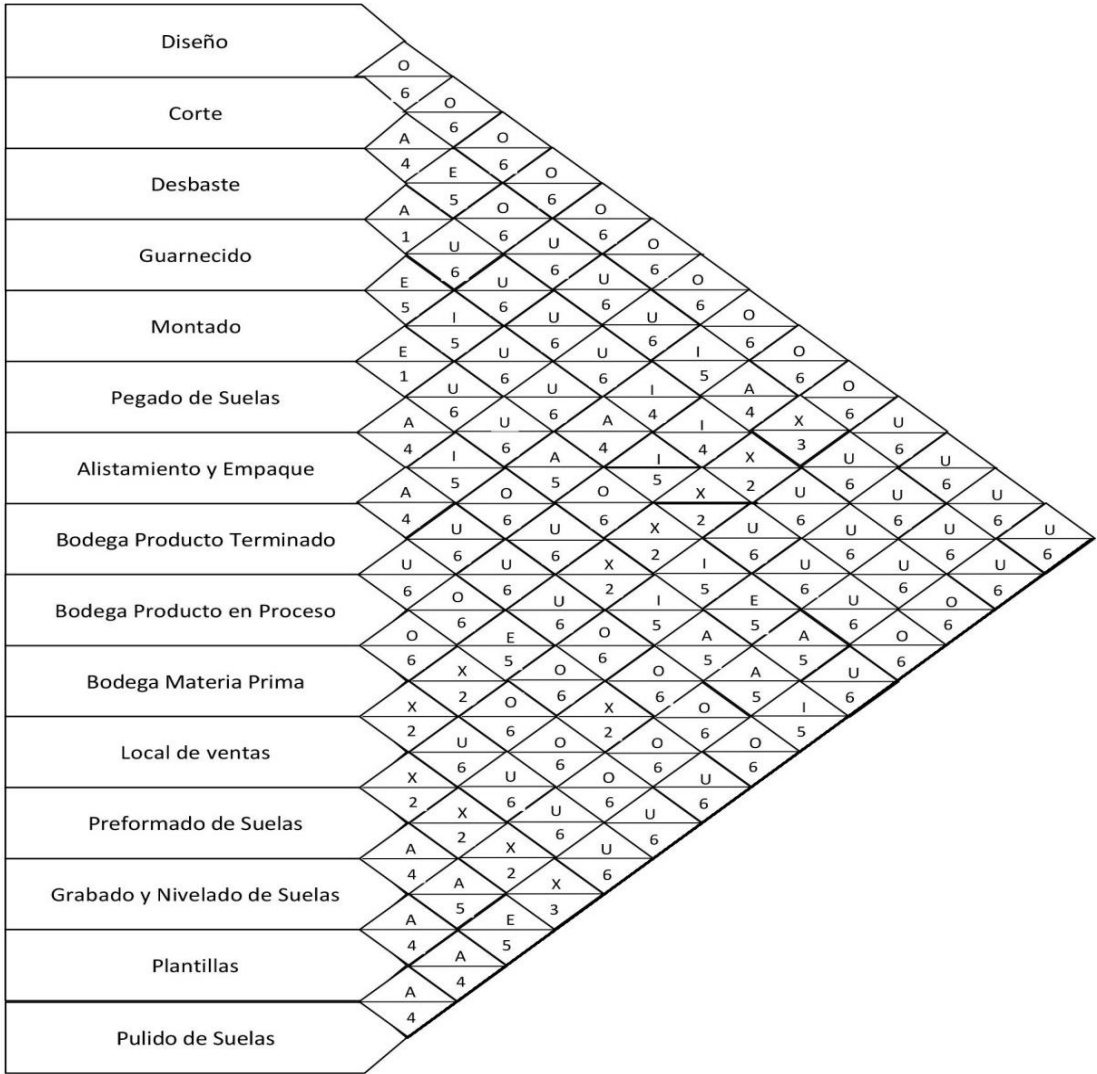
Fuente: Tomado y Adaptado de: TOMPKINS, James A. *et al.* Planeación de instalaciones 3a. ed. México D.F. International Thomson editores. 2006. p.307.

Tabla 24. Razones tras el valor de cercanía

CÓDIGO	RAZÓN
1	Compartir personal
2	Seguridad
3	Conservación del espacio en buenas condiciones
4	Secuencia del flujo del trabajo
5	Conveniencia
6	No se comparten recursos

Fuente: Elaboración propia

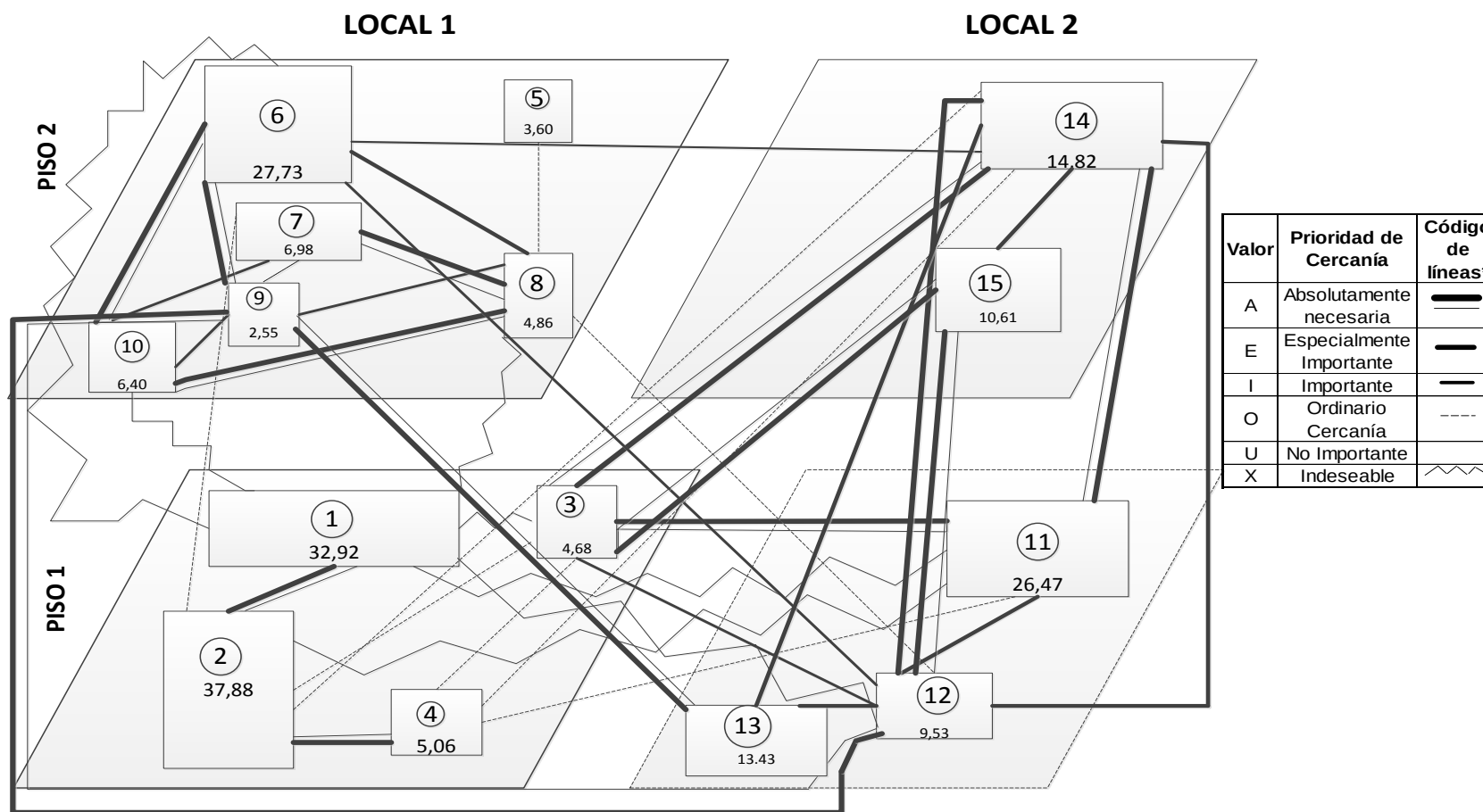
Figura 12. Relación de Actividades entre departamentos.



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que ya se conocen los requerimientos de área para cada departamento y las relaciones de cercanía entre ellos, se puede construir el diagrama de relaciones de espacio (Figura 13) que ubica los departamentos en su ubicación actual en cada local (denotado con el número encerrado), mostrando su área mínima requerida y las relaciones que existen entre cada uno para poder producir todos los productos, ya que según la caracterización realizada en la sección 1 y 6.1, el recorrido es el mismo para todos los productos, puesto que los departamentos son áreas macro y la diferenciación o variabilidad se presenta al interior de estos debido a las máquinas y actividades que realice el operario.

Figura 13. Diagrama de relaciones de espacio.



Fuente: Elaboración propia.

El código de líneas utilizado es sólo uno de los posibles para representar la prioridad de cercanía entre departamentos, en la práctica se pueden encontrar otros tipos de convenciones.

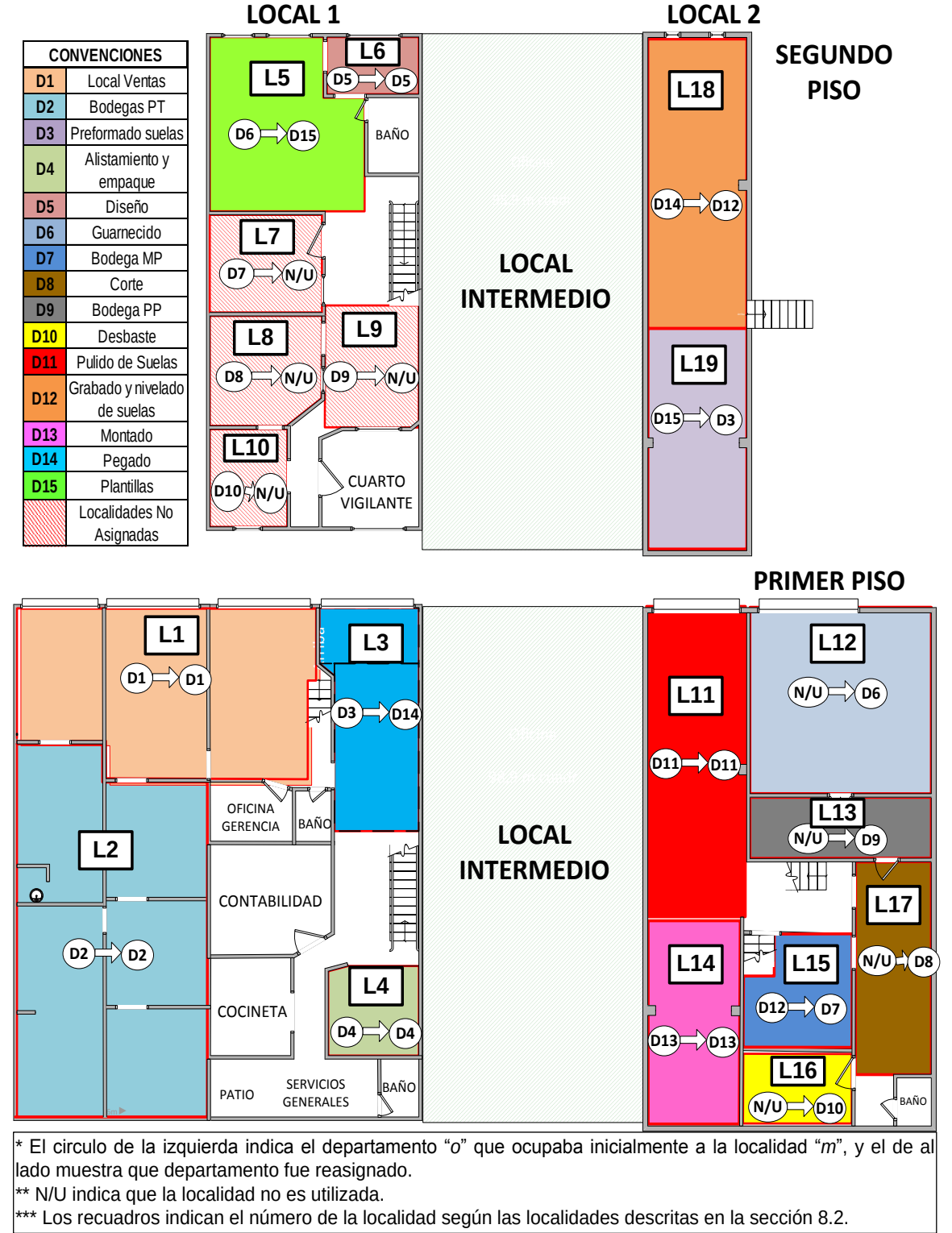
Además de tener en cuenta las necesidades de cercanía entre departamentos para definir la alternativa propuesta mediante el SLP, se debe contar con el hecho de que existen limitaciones en cuanto a la reubicación de áreas como por ejemplo el local de ventas debe quedar en el lugar en donde está, es decir, permanecer fijo así como las oficinas, la cocina y el área de servicios generales.

Los pasos que se tuvieron en cuenta para generar una alternativa a la distribución siguiendo el procedimiento del SLP son:

1. Desarrollar la matriz de flujos entre departamentos y la relación entre los mismos.
2. Definir los requerimientos de espacio para cada departamento y compararlos con las áreas disponibles, determinando cuáles espacios asignables puede albergar cada departamento.
3. Elaborar el diagrama de relaciones de espacio.
4. Considerar las limitaciones, en este caso que el local de ventas no puede ser reubicado.
5. Definir la alternativa según las actividades 1 a 4.
6. Someter la alternativa a evaluación junto con las otras propuestas.

Conociendo lo anterior, se propone como alternativa la siguiente distribución de planta ilustrada en la figura 14, cumpliendo principalmente con las restricciones de área entre departamentos a localidades y teniendo en cuenta los puntos clave en cercanía, movilizar el proceso de guarnecido a un área mucho más cercana a los procesos de montado y pegado:

Figura 14. Distribución de planta obtenida mediante el método SLP para Calzado Antonello.



Fuente: Elaboración propia.

8.5. ALTERNATIVA PROPUESTA MEDIANTE PROBLEMA DE ASIGNACIÓN CUADRÁTICA QAP

Como se describió en el marco referencial y en la metodología, uno de los métodos para la generación de alternativas a la distribución de la fábrica Calzado Antonello, que se va a utilizar es el problema de asignación cuadrática (QAP), debido a que los locales cuentan con dos pisos cada uno y están separados por un obstáculo, los cálculos de distancia realizados y la identificación de áreas de departamentos y localidades permite formular las restricciones que este modelo debe tener en cuenta. Teniendo en cuenta las ecuaciones 1 a 4, de la sección 2.5, se plantea el modelo en el lenguaje de programación AMPL, donde se determina que la variable a resolver será X_{om} , y en donde se anexa la variable C, para determinar el valor de la inversión (Determinado como la suma de los costos de adecuación fijos y variables).

Para el modelo QAP se tiene en cuenta la definición de dos conjuntos, el primero de ellos el de departamentos (dep) que define los 15 elementos a asignar, cuyo sufijo será la letra “o”. De igual manera se definió el conjunto de localidades asignables (loc) que contiene los elementos L1 a L19, con sufijo “m”. Los parámetros a tener en cuenta son: las áreas requeridas por los departamentos (areadep), las áreas disponibles (arealoc), los valores de flujo entre departamentos (flujo) (ver Anexo A), las distancias con costos incluidos entre localidades (distancias) (tabla 13) y los costos de adecuación (costoad) (tablas .21 y 22).

Teniendo en cuenta todo esto se define entonces que la función objetivo será la reducción del costo de la distribución determinado por la ecuación 5, ya que se convirtieron los datos recolectados en el trabajo de campo a la forma en la que los requiere el modelo para asignar según la multiplicación de flujos y distancias, que se traducen como el costo de recorrer o movilizar materiales, producto en proceso y producto terminado entre los departamentos que si poseen flujo, y según las iteraciones y comparación entre pares que realiza el modelo QAP.

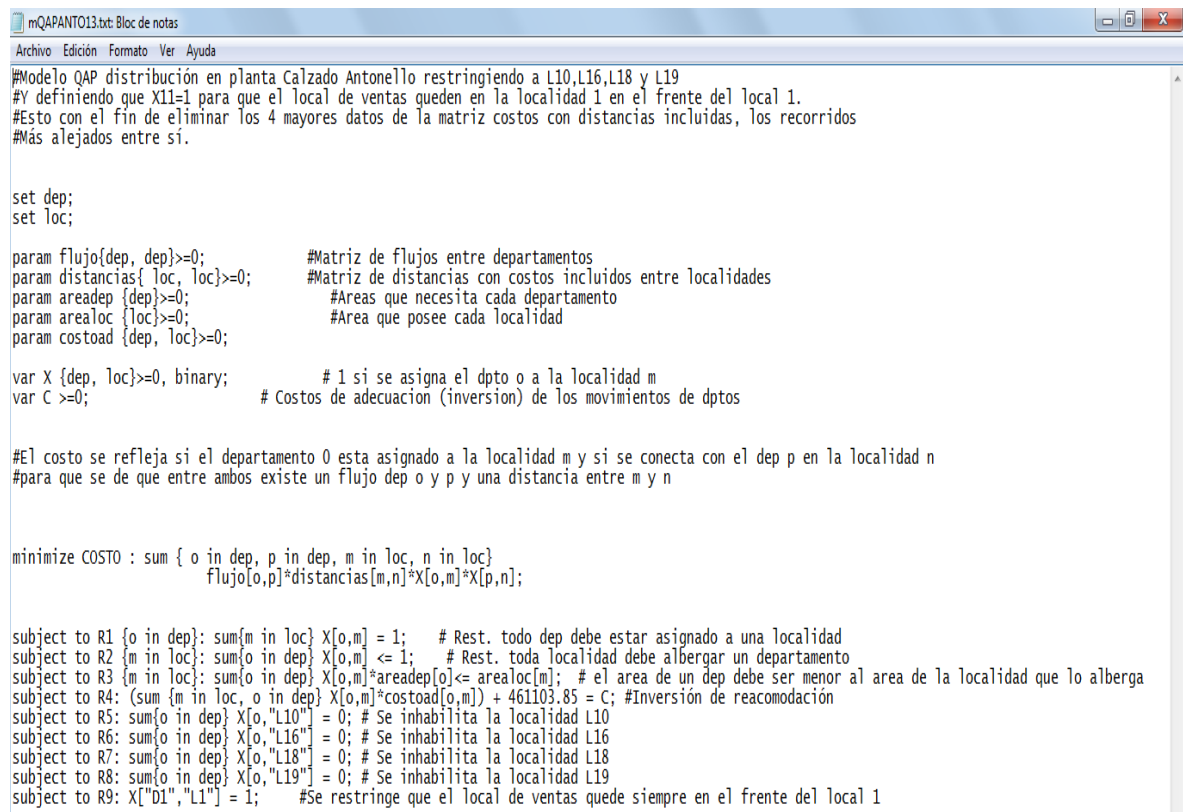
Debido a que esta metodología es con la que se desarrolló la mayor parte del estudio se hicieron en total 13 corridas diferentes en AMPL, teniendo en consideración no utilizar restricciones de área, inhabilitando 4 localidades de forma aleatoria para que el modelo de matrices de flujos y distancias fuera cuadrado con tamaño $n=15$, una de estas corridas fue restringiendo las mismas localidades que no se asignaron en el SLP para identificar si con el conjunto de localidades sobrante existía un valor Z aún menor. También se incluyó la restricción que consiste en que el local de ventas estuviese siempre en la localidad L1 ($X_{11} = 1$) porque la localidad 1 está ubicada en la parte de delante de la fábrica y para

exhibir el producto y facilitar el acceso de los clientes por obvias razones el local de ventas, y un escenario donde se varió la ecuación 5, para incluir dentro de la minimización el costo de adecuación para que el modelo buscara una alternativa que minimizara los costos de la distribución, esta función objetivo sería entonces:

$$\text{Minimizar Costo } Z = (\sum_{o=1}^N \sum_{p=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N f_{op} d_{mn} X_{om} X_{pn}) \quad (\text{Ec. 17}) \\ + (\sum_{o=1}^N \sum_{m=1}^N \text{Costo Var. adec.}_{om} X_{om} + \text{Costo Fijo Adec.})$$

Donde CostoFijo Adec es igual a \$461.103,85 pesos, lo concerniente a los costos de movilización de máquinas, equipo, puestos de trabajo y estanterías. La escritura del modelo conto en su totalidad con 9 restricciones, un ejemplo del archivo del modelo se muestra en la Ilustración 5.

Ilustración 5. Ejemplo de archivo modelo en AMPL.



```

mQAPANT013.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

#Modelo QAP distribución en planta Calzado Antonello restringiendo a L10,L16,L18 y L19
#Y definiendo que X11=1 para que el local de ventas queden en la localidad 1 en el frente del local 1.
#Esto con el fin de eliminar los 4 mayores datos de la matriz costos con distancias incluidas, los recorridos
#Más alejados entre sí.

set dep;
set loc;

param flujo{dep, dep}>=0;          #Matriz de flujos entre departamentos
param distancias{loc, loc}>=0;      #Matriz de distancias con costos incluidos entre localidades
param areadep{dep}>=0;              #Areas que necesita cada departamento
param arealoc{loc}>=0;              #Area que posee cada localidad
param costoad{dep, loc}>=0;

var X {dep, loc}>=0, binary;         # 1 si se asigna el dpto o a la localidad m
var C >=0;                          # Costos de adecuacion (inversion) de los movimientos de dptos

#El costo se refleja si el departamento 0 esta asignado a la localidad m y si se conecta con el dep p en la localidad n
#para que se de que entre ambos existe un flujo dep o y p y una distancia entre m y n

minimize COSTO : sum { o in dep, p in dep, m in loc, n in loc}
                flujo[o,p]*distancias[m,n]*X[o,m]*X[p,n];

subject to R1 {o in dep}: sum{m in loc} X[o,m] = 1;    # Rest. todo dep debe estar asignado a una localidad
subject to R2 {m in loc}: sum{o in dep} X[o,m] <= 1;    # Rest. toda localidad debe albergar un departamento
subject to R3 {m in loc}: sum{o in dep} X[o,m]*areadep[o] <= arealoc[m]; # el area de un dep debe ser menor al area de la localidad que lo alberga
subject to R4: (sum {m in loc, o in dep} X[o,m]*costoad[o,m]) + 461103.85 = C; #Inversión de reacomodación
subject to R5: sum{o in dep} X[o,"L10"] = 0; # Se inhabilita la localidad L10
subject to R6: sum{o in dep} X[o,"L16"] = 0; # Se inhabilita la localidad L16
subject to R7: sum{o in dep} X[o,"L18"] = 0; # Se inhabilita la localidad L18
subject to R8: sum{o in dep} X[o,"L19"] = 0; # Se inhabilita la localidad L19
subject to R9: X["D1","L1"] = 1; #Se restringe que el local de ventas quede siempre en el frente del local 1

```

Fuente: Elaboración propia en bloc de notas para consola AMPL.

En la ilustración 5 se aprecia entonces que en la parte superior se encuentran definidos los conjuntos y parámetros descritos anteriormente, posterior a esto se tienen las variables X_{om} y C , las cuales sirven para definir ambos costos de la distribución alternativa de Calzado Antonello, y seguido de esto se aprecia la

primer función objetivo, aquella que solo minimiza el costo y no el valor de adecuación. En las restricciones se encuentra entonces que R1 y R2 son aquellas que vienen inmersas en la escritura de este modelo de programación, R3 se utiliza para evaluar que una localidad tenga el área adecuada para cada departamento, R4 calcula el valor de la inversión, que en este caso son los costos de adecuación de la alternativa, el conjunto de restricciones R5 a R9 son aquellas que inhabilitan la localidad L_m escogida a variar, en este caso se debe tener en cuenta que exista al menos la cantidad de área total que se requiere para los departamentos, de lo contrario la solución se vuelve infactible. R9 designa que el local de ventas debe encontrarse al frente del local por lo tanto debe utilizar la localidad L1 que sería la única que puede albergar su espacio requerido.

Después de resolver todos los escenarios dentro de la consola de AMPL y comparar los resultados en la plataforma NEOS, se utilizó un archivo Excel para poder calcular todos los costos en los que se incurre al momento de relocalizar los departamentos, teniendo la tabla de asignación de departamento a localidad para disponer el valor binario. De las 13 corridas realizadas se escogieron los 3 mejores escenarios o alternativas para compararse dentro del capítulo siguiente, ya que estos reportaban mejor costo de la distribución (Valor de la función objetivo Z), los mejores valores de la distancia total recorrida y requerían valores de adecuación comparables con la alternativa obtenida por el SLP.

Los tres escenarios escogidos serán designados como alternativas QAP1, QAP2 y QAP3, que a su vez serán tratados a lo largo del trabajo como alternativa 3, alternativa 4 y alternativa 5, respectivamente. La alternativa QAP1 se obtuvo al correr el modelo sin restricciones de localidad, es decir convirtieron la restricción 3 en libre ($X_{om} \leq 1$) para que se incluyera dentro del ejercicio de comparación de pares las 19 localidades asignables. La alternativa QAP2 se obtuvo al restringir el uso de las áreas más pequeñas de la fábrica (L4, L6, L10 y L16), con el fin de tener un mejor valor en el porcentaje de utilización del espacio asignado y evaluar si la asignación de localidades cambiaba en torno a la asignación de un departamento que aunque requiera poco espacio, si necesite mayoritariamente estar cerca a otra debido al valor de flujo. Por último la alternativa QAP3 se obtuvo de la variación en la función objetivo al añadir el costo de adecuación a la minimización.

Se realizaron 13 corridas diferentes buscando realizar los procesos de análisis vistos dentro de la materia de investigación de operaciones, al buscar evaluar como la variación en cada tipo de restricción obtenía tanto valores diferentes de la función Z, como de las asignaciones de departamentos descritas por la variable X_{om} . En el apartado de “Recomendaciones y estudios posteriores” se denota que variaciones a la restricción R2 donde se permite albergar más de un departamento dentro de una localidad, no son calificadas como QAP, ya que no se podría

contabilizar con los datos tomados actualmente el valor de flujo por distancia al interior de las localidades con más de una asignación.

Tabla 25. Tabla resumen obtenida por las 13 corridas en el programa AMPL

Corrida	Variación realizada	Valor Z (Costo de distribución) (\$ pesos)	Valor C (Costo de adecuación) (\$ pesos)	Distancia total recorrida (m)	% Utilización Espacio Asignado	Cantidad de cambios
QAP1	La restricción 2 se deja libre ($X_{om} \leq 1$), con el fin de que se puedan utilizar las 19 localidades asignables, ya que define que puede estar asignado al menos un dpto. o ninguno a cada localidad y se define que el local de ventas quede en la localidad L1 ($X_{11} = 1$).	\$ 152.720,03	\$ 1.776.674,01	12145,63	67,93%	10
QAP2	Se inhabilitaron las localidades con áreas más pequeñas (L4,L6,L10 y L16) y se define que el local de ventas quede en la localidad L1 ($X_{11} = 1$).	\$ 170.225,53	\$ 1.551.858,51	13537,82	65,44%	12
QAP3	Se incluye el costo de adecuación dentro de la función objetivo para minimizarla y se define que el local de ventas quede en la localidad L1 ($X_{11} = 1$).	\$ 231.018,02	\$ 904.993,18	18372,57	67,49%	9
R1	No se restringe que el área del dpto (A_{dep}) sea menor al área de la localidad que lo pueda albergar (A_{loc}).	\$ 111.481,99	\$ 2.395.870,63	8866,02	72,94%	15
R2	Se inhabilitaron las localidades L5,L7,L8 y L9 por estar lo más alejadas de los procesos finales de producción (pegado y montado) y se permite que el local de ventas se reasigne.	\$ 186.367,25	\$ 2.912.015,47	14821,55	71,37%	12
R3	Se permite que una localidad pueda albergar más de un departamento en la restricción 2 ($X_{om} \leq 4$).	\$ 86.159,30	\$ 53,54	6852,14	86,78%	9
R4	Se inhabilitan de nuevo las áreas más pequeñas pero esta vez dejando libre la asignación del local de ventas ($D1$).	\$ 163.163,93	\$ 2.953.810,30	12976,22	65,44%	14
R5	Se busca que todos los procesos de suelas ($D3,D11$ y $D12$) queden dentro del local 1, mediante el uso de los subconjuntos en AMPL suelas y local1.	Solución Infactible				
R6	No se utilizan las localidades L7 a L10, al igual que en la alternativa del SLP para comparar resultados. Se limita que el local de ventas este en L1.	\$ 152.720,03	\$ 1.776.674,01	12145,63	67,93%	10
R7	Se utilizan las mismas localidades que estan siendo utilizadas en la distribución actual para evaluar que reasignaciones se pueden realizar. (No se usa L12,L13,L16 y L17)	\$ 193.859,70	\$ 895.018,85	15417,41	73,53%	9
R8	No se usan las mismas localidades que en R2 pero esta vez se añade la restricción 10, que indica que el local de ventas tiene que estar en la localidad L1 ($X_{11}=1$)	\$ 193.337,31	\$ 1.510.063,68	15375,87	71,37%	10
R9	No se usan L5,L6,L16 y L18, al igual que en R1, pero esta vez usando la restricción 3 para evaluar si el área del dpto. es menor al área de la localidad.	\$ 204.745,03	\$ 1.514.792,18	16283,11	72,94%	11
R10	Se inhabilitan L10,L16,L18 y L19, al eliminar los datos más altos de la matriz de distancias con costos incluidos.	\$ 198.058,01	\$ 1.551.858,51	15751,30	72,86%	10

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 25 aprecian las variaciones y resultados de las 13 corridas diferentes del modelo en AMPL, evaluando diferentes escenarios como lo fue inhabilitar 4 localidades, sin excluir las localidades más grandes ya que son las que pueden albergar los departamentos de guarnecido, pulido de suelas, local de ventas y la bodega de producto terminado y de ésta manera observar la variación que se genera en el resultado de los criterios base para la evaluación. Se decidió

parar en la corrida 13 ya que no se presentaban cambios significativos en las últimas corridas. Cabe resaltar que la corrida R3 no se puede comparar con las otras porque su resultado refleja la posibilidad de que dos departamentos puedan estar ubicados en una localidad y la corrida R5 generó una solución infactible ya que no presenta la posibilidad de alojar el área de pulido de suelas, ya que no hay un espacio que tenga esa capacidad. De estas 13 corridas se escogieron las designadas como QAP1, QAP2 y QAP3, debido a que son las únicas corridas comparables con las otras metodologías, ya que cumple todo el grupo de 9 restricciones y son las únicas a las que se les puede evaluar las seis medidas de desempeño en el proceso comparativo de la sección 9.

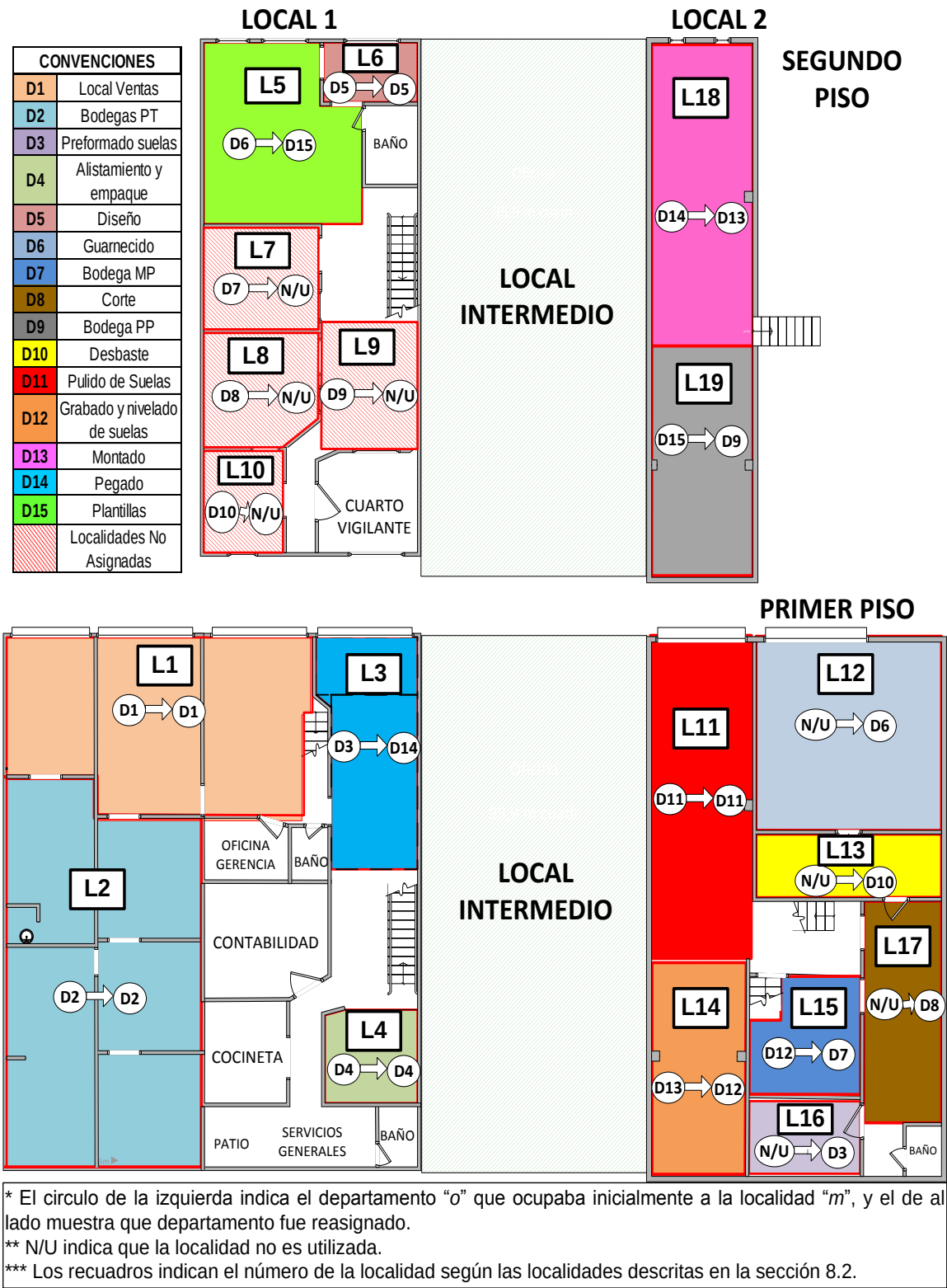
Como continuación al desarrollo del modelo, las respuestas a la variable X_{om} se muestran a continuación en la tabla 26, al igual que las distribuciones obtenidas para la fábrica Calzado Antonello se muestran en las figuras 15 a 17.

Tabla 26. Resumen de resultados obtenidos con QAP.

	QAP 1		QAP 2		QAP 3	
	Xom (dep-Loc)		Xom (dep-Loc)		Xom (dep-Loc)	
	D1	L1	D1	L1	D1	L1
	D2	L2	D2	L2	D2	L2
	D3	L16	D3	L8	D3	L4
	D4	L4	D4	L3	D4	L3
	D5	L6	D5	L7	D5	L10
	D6	L12	D6	L12	D6	L12
	D7	L15	D7	L15	D7	L17
	D8	L17	D8	L17	D8	L13
	D9	L19	D9	L19	D9	L16
	D10	L13	D10	L13	D10	L15
	D11	L11	D11	L11	D11	L11
	D12	L14	D12	L9	D12	L5
	D13	L18	D13	L18	D13	L14
	D14	L3	D14	L14	D14	L18
	D15	L5	D15	L5	D15	L19
COSTO DISTRIBUCIÓN (\$)	\$ 152.720,03		\$ 170.225,53		\$ 231.018,02	
DISTANCIA TOTAL (m)	12145,63		13537,82		18372,57	
COSTOS ADECUACIÓN	\$ 1.776.674,01		\$ 1.551.858,51		\$ 904.993,18	
No. CAMBIOS	10		12		9	
% UTILIZACIÓN ESPACIO	67,93%		65,44%		67,49%	

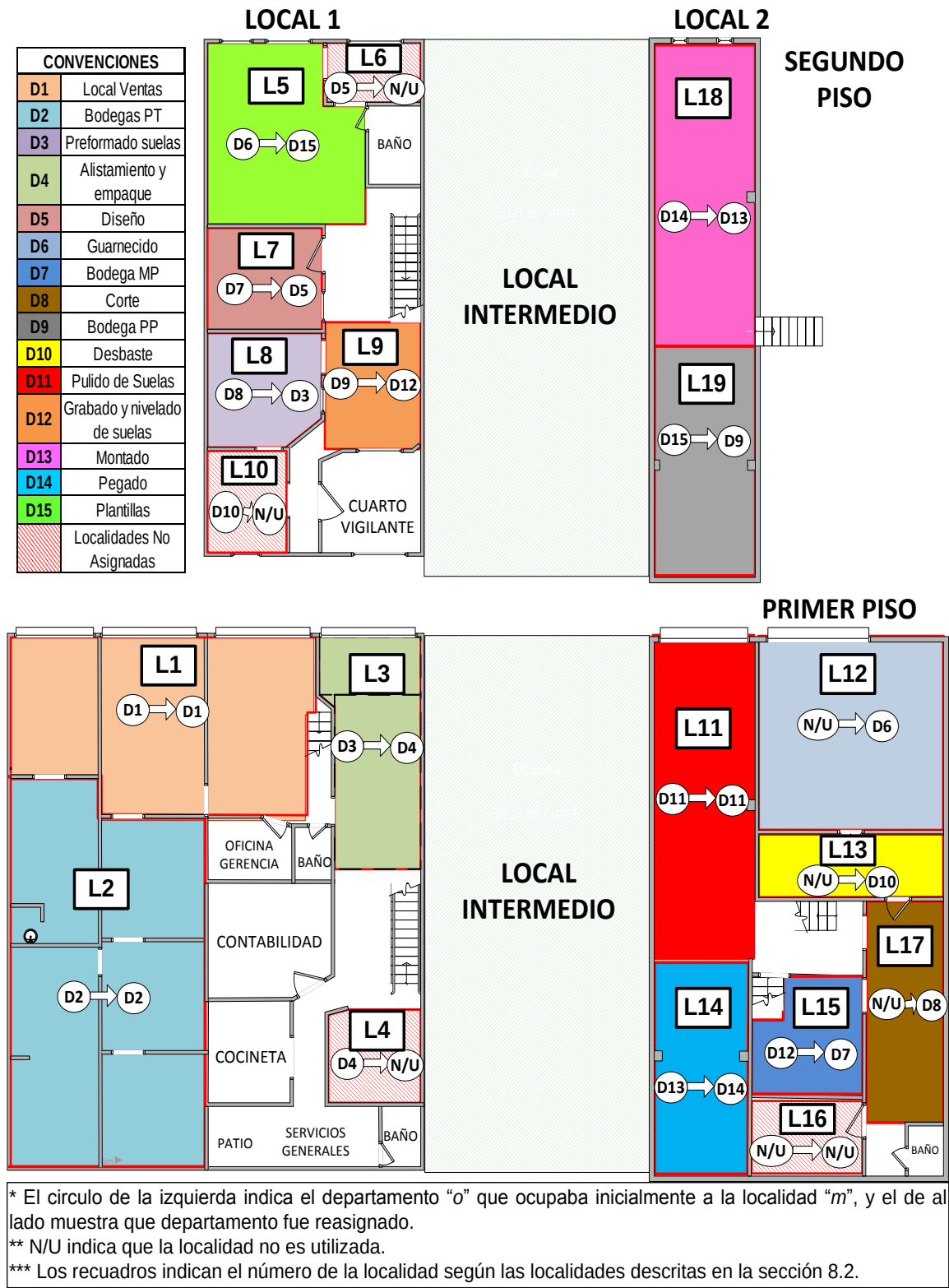
Fuente: Elaboración propia.

Figura 15 Distribución de planta alternativa QAP1 para Calzado Antonello.



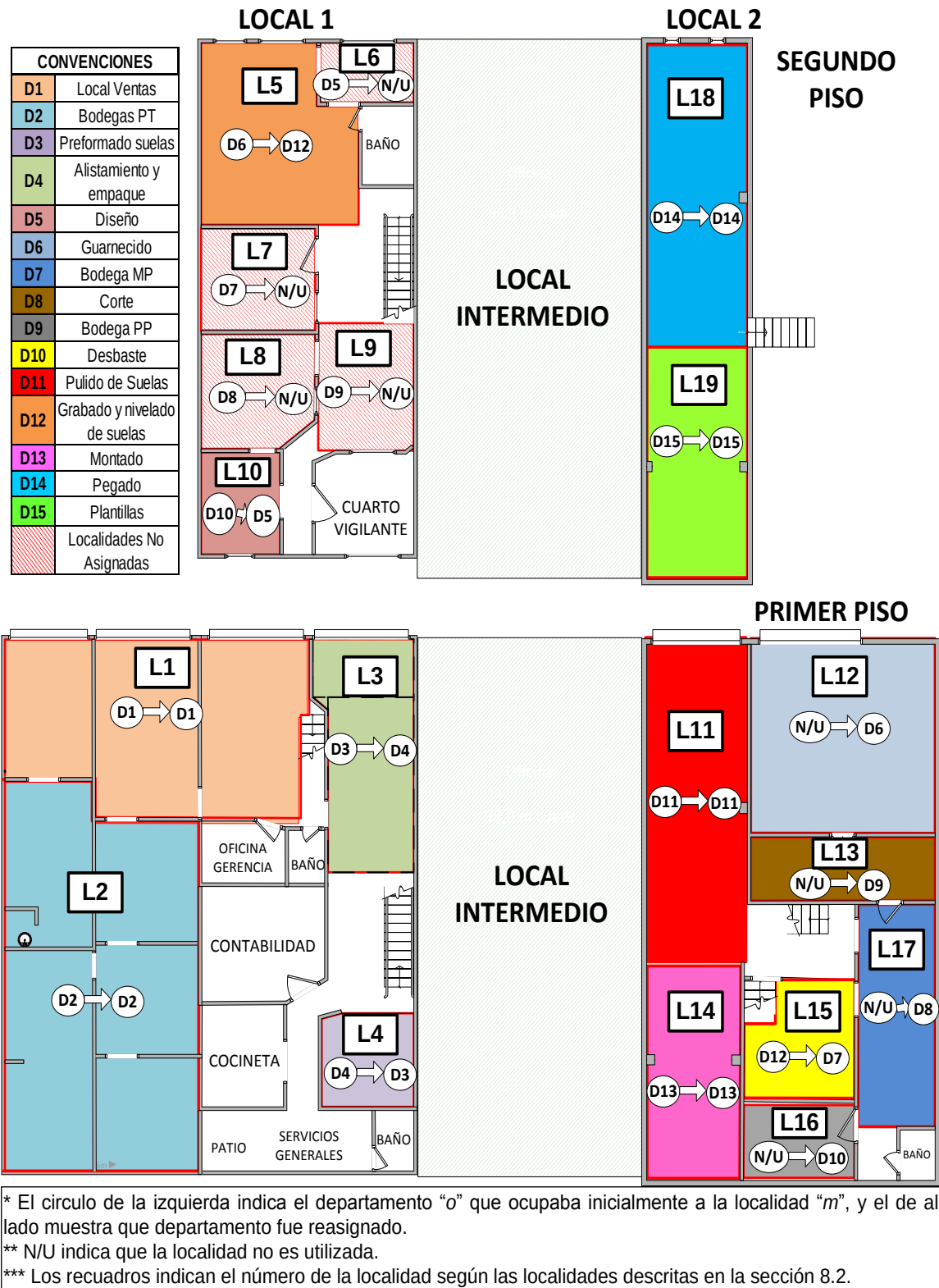
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Distribución de planta alternativa QAP2 para Calzado Antonello.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Distribución de planta alternativa QAP3 para Calzado Antonello.



Fuente: Elaboración propia.

8.6. ALTERNATIVA PROPUESTA POR EL METODO DE APROXIMACIÓN DE VOGEL.

La tercera metodología utilizada parte del hecho de que el problema que se presenta en la acomodación de los departamentos en la fábrica Calzado Antonello ha sido visto como un problema de asignación, por lo tanto se decidió utilizar una heurística para ver cómo sería la asignación mediante este tipo de técnicas, ya que en los dos apartados anteriores se estudió el problema como una secuencia procedimental y como una problema de programación. El método de aproximación de Vogel según lo definido en las técnicas del capítulo 3.5 y dentro de la metodología (capítulo 5), define a la asignación de la variable X_{om} mediante una búsqueda del menor costo de asignación dentro de una matriz de departamentos a localidades con capacidades y recursos definidos en 1, y dado a que se requiere que esta matriz sea cuadrada para no nivelar con departamentos ficticios, y a que se quiere llegar a una alternativa comparativa con los otros métodos, se excluyen al igual que en el SLP y en la alternativa QAP1, el uso de las localidades L7 a L10.

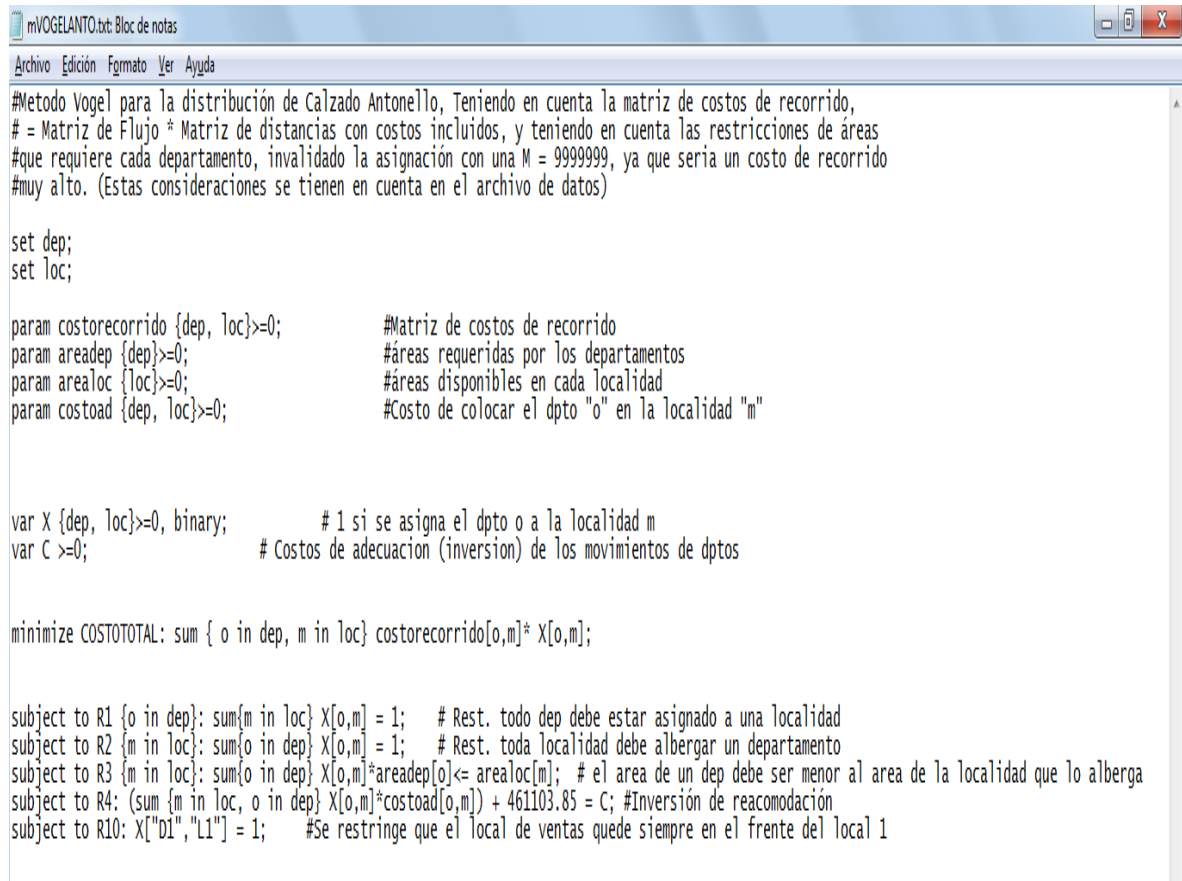
Para obtener el costo que se estudia en las iteraciones de este método, se debe realizar la multiplicación entre matrices de flujo y distancias con costos incluidos, para obtener de esta manera la matriz de costos de recorrido, que a diferencia del costo mínimo que se busca en el proceso combinatoria del método QAP, este valor va a representar el costo de asignar el departamento “o” a la localidad “m” teniendo en cuenta la sumatoria de todos los flujos que parte de ese departamento con los que tiene interacción al ya estar localizado en la localidad que designa la columna de la matriz. El modelo Vogel está escrito de igual manera en AMPL al generar los archivos de modelo y datos para ser corridos dentro de la consola.

La función objetivo para este modelo está descrita como:

$$\text{Minimizar } Z: \text{COSTO} = \sum_o^N \sum_m^N \text{CostoRecorrido}_{om} * X_{om} \quad (\text{Ec. 13})$$

En la formulación se utilizan los mismos conjuntos dep y loc, los mismos parámetros a excepción de los parámetros de flujo y distancia se define el parametro “costorecorrido”. Se requirió de las restricciones R1,R2, R3,R4 y R10. Dentro de los costos de adecuación, se definió como $M=\$9'999.999$ el costo de asignación dentro de la matriz de costos de recorrido (ver anexo C) para poder restringir la asignación de la variable dentro del programa WINQSB, ya que se utilizó el módulo de “Network Modelling” brindado por este programa. La asignación en este módulo se ilustra en la figura que acompaña la tabla 27. La escritura del modelo se presenta en la ilustración 6:

Ilustración 6. Escritura del método Vogel en AMPL.



```
mVOGELANTO.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

#Metodo Vogel para la distribución de Calzado Antonello, Teniendo en cuenta la matriz de costos de recorrido,
# = Matriz de Flujo * Matriz de distancias con costos incluidos, y teniendo en cuenta las restricciones de áreas
#que requiere cada departamento, invalidado la asignación con una M = 9999999, ya que seria un costo de recorrido
#muy alto. (Estas consideraciones se tienen en cuenta en el archivo de datos)

set dep;
set loc;

param costorecorrido {dep, loc}>=0;      #Matriz de costos de recorrido
param areadep {dep}>=0;                  #áreas requeridas por los departamentos
param arealoc {loc}>=0;                  #áreas disponibles en cada localidad
param costoad {dep, loc}>=0;             #Costo de colocar el dpto "o" en la localidad "m"

var X {dep, loc}>=0, binary;              # 1 si se asigna el dpto o a la localidad m
var C >=0;                               # Costos de adecuación (inversion) de los movimientos de dptos

minimize COSTOTOTAL: sum { o in dep, m in loc} costorecorrido[o,m]* X[o,m];

subject to R1 {o in dep}: sum{m in loc} X[o,m] = 1;    # Rest. todo dep debe estar asignado a una localidad
subject to R2 {m in loc}: sum{o in dep} X[o,m] = 1;    # Rest. toda localidad debe albergar un departamento
subject to R3 {m in loc}: sum{o in dep} X[o,m]*areadep[o]<= arealoc[m]; # el area de un dep debe ser menor al area de la localidad que lo alberga
subject to R4: (sum {m in loc, o in dep} X[o,m]*costoad[o,m]) + 461103.85 = C; #Inversión de reacondición
subject to R10: X["D1","L1"] = 1;    #Se restringe que el local de ventas quede siempre en el frente del local 1
```

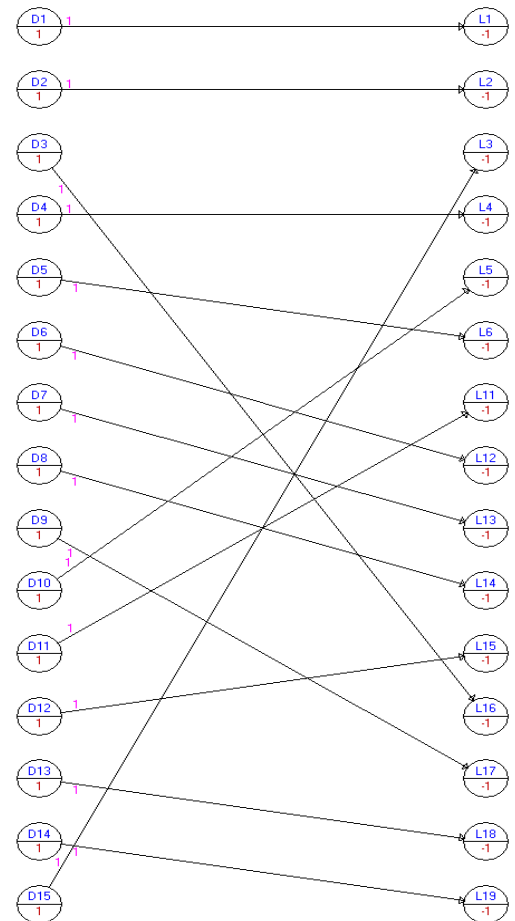
Fuente: Elaboración propia en bloc de notas para consola AMPL.

De la misma manera que en el QAP, al método vogel se le programo la variación en otro archivo de modelo, en la función objetivo, incluyendo los costos de adecuación dentro de la minimización, sin embargo esta alternativa no es tenida en cuenta, debido a que el valor de ahorro fue de -18,38% con una inversión de adecuación de \$1'160.551 pesos, mostrando que esta metodología arroja costos de distribución más altos que la situación actual debido a su ahorro negativo.

La asignación de la variable X_{om} y las medidas de desempeño obtenidas mediante el modelo de AMPL se encuentran en la tabla 21, mientras que el diagrama que acompaña la tabla 21 y la figura 18 muestran de forma general los resultados obtenidos en el módulo de asignación del programa WINQSB, permitiendo corroborar que ambos programas calculan los mismos resultados para el método Vogel.

Tabla 27. Resultados obtenidos por el método Vogel.

VOGEL	
Xom (dep-Loc)	
D1	L1
D2	L2
D3	L16
D4	L4
D5	L6
D6	L12
D7	L13
D8	L14
D9	L17
D10	L5
D11	L11
D12	L15
D13	L18
D14	L19
D15	L3
COSTO DISTRIBUCIÓN (\$)	\$ 301.350,18
DISTANCIA TOTAL (m)	23965,99
COSTOS ADECUACIÓN	\$ 1.442.199,01
No. CAMBIOS	9
% UTILIZACIÓN ESPACIO	67,93%



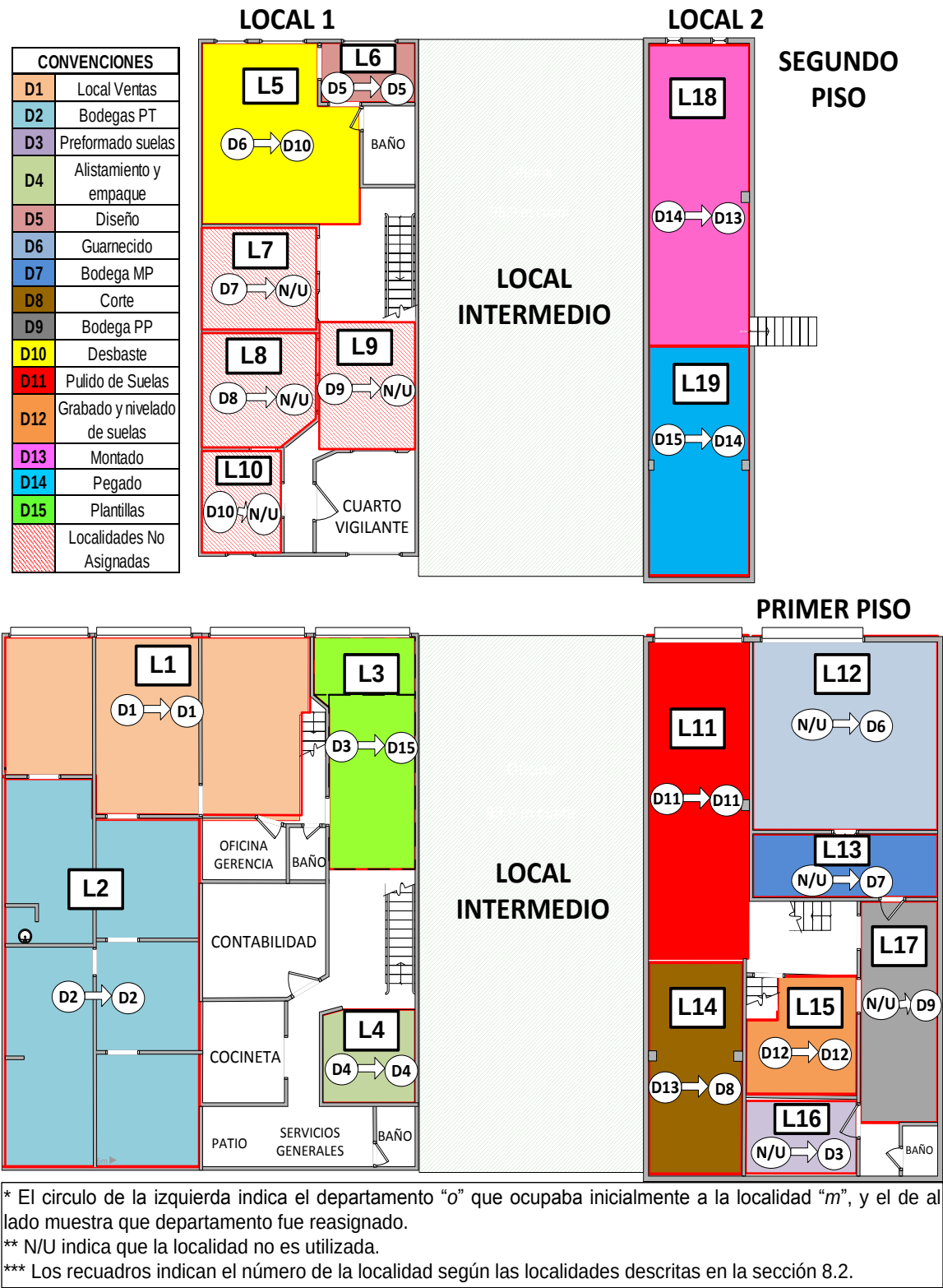
Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Resultados obtenidos en WINQSB por método de aproximación de Vogel.

Network Modeling						
File Format Results Utilities Window Help						
Solution for Antovogel: Minimization (Assignment Problem)						
10-21-2015	From	To	Assignment	Unit Cost	Total Cost	Reduced Cost
1	D1	L1	1	0	0	0
2	D2	L2	1	413,94	413,94	0
3	D3	L16	1	0	0	0
4	D4	L4	1	25.866,38	25.866,38	0,38
5	D5	L6	1	0	0	0
6	D6	L12	1	3.570,03	3.570,03	0
7	D7	L13	1	30.353,05	30.353,05	0,05
8	D8	L14	1	0	0	0
9	D9	L17	1	0	0	0
10	D10	L5	1	10.527,01	10.527,01	0,01
11	D11	L11	1	11.438,37	11.438,37	0
12	D12	L15	1	0	0	0
13	D13	L18	1	0	0	0
14	D14	L3	1	5.498,89	5.498,89	-0,11
15	D15	L19	1	33.202,60	33.202,60	-0,40
	Total	Objective	Function	Value =	120.870,27	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Distribución obtenida por el método Vogel.



Fuente: Elaboración propia.

9. ANÁLISIS Y RESULTADOS

9.1. MEDIDAS DE DESEMPEÑO DE LAS ALTERNATIVAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA

Las medidas de desempeño se seleccionaron de la revisión de literatura, cubriendo factores y perspectivas que pueden usarse para evaluar la efectividad de una distribución de planta. También se tomó en consideración el punto de vista del gerente y propietario de la fábrica. Las medidas de desempeño elegidas para el estudio serán los mismos criterios que se tendrán en cuenta para tomar la decisión mediante el Proceso Analítico Jerárquico-AHP, desarrollado en la siguiente sección.

Según Lin, Nagaliman y Raman⁴⁹ algunos de los criterios que permiten evaluar la eficiencia de una distribución de planta son los siguientes:

- % Ahorro mensual que genera la nueva distribución.
- Total distancia recorrida (m)
- % Utilización de espacio
- Seguridad y comodidad de los trabajadores
- Número de cambios
- Costo de adecuación (\$)

El porcentaje de ahorro mensual que genera cada alternativa frente a la distribución actual se calcula según los resultados de costos de distribución obtenidos en cada metodología, teniendo en cuenta que este es el valor Z que se minimizó en la formulación de la ecuación 5, donde se incluyen flujos, distancias y costos asociados al desplazamiento.

La distancia recorrida por cada una de las alternativas se obtuvo a partir de la suma de los recorridos necesarios por el proceso productivo según la distribución de cada alternativa. Cabe recordar que esta distancia corresponde a la distancia

⁴⁹ Tomado de RAMAN, Dhamodharan, NAGALINGAM, SevV, LIN, GrierC.I. Towards measuring the effectiveness of a facilities layout. En: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2009. p. 191-203.

recorrida por los trabajadores según el flujo de producción estimado mensualmente.

El número de cambios se calculó teniendo en cuenta el número de departamentos que fueron reubicados según la distribución actual de la empresa.

La seguridad y comodidad de los trabajadores es un criterio muy importante a tener en cuenta en la decisión final ya que se deben brindar espacios que garanticen el bienestar de los operarios, este es un criterio cualitativo que se calificará también para cada alternativa según su diseño. Teniendo en cuenta aspectos como el espacio libre para circular de cada departamento y la distribución de los departamentos que generan mayor ruido en cada alternativa.

Para lograr la comparación de las alternativas con la distribución actual, ésta se incluirá dentro de las alternativas a evaluar, siendo el estado actual la alternativa A1, cuyas medidas de desempeño también fueron calculadas y registradas en la tabla 20, para el No. de cambios y el costo de adecuación aparece en cero para la distribución actual ya que dejar esta distribución no representa movimientos y por consiguiente no hay costo de adecuación.

Tabla 28. Medidas de desempeño para cada alternativa

	COSTO DE LA DISTRIBUCIÓN (\$)	C1. % AHORRO (mensual)	C2. DISTANCIA TOTAL RECORRIDA (m)	C3. Utilización de espacio	C5. No. DE CAMBIOS	C6. COSTO DE ADECUACIÓN (\$)
A1 (Actual)	\$ 257.151,79	0%	20.450,95	73,53%	0	\$ -
A2 (SLP)	\$ 169.010,75	34,28%	13.441,21	67,93%	9	\$ 1.649.386,51
A3 (QAP1)	\$ 152.720,03	40,61%	12.145,63	67,93%	10	\$ 1.776.674,01
A4 (QAP2)	\$ 170.225,53	33,80%	13.537,82	65,44%	12	\$ 1.551.858,51
A5 (QAP3)	\$ 231.018,02	10,16%	18.372,57	67,49%	9	\$ 904.993,18
A6 (Vogel)	\$ 301.350,18	-17,19%	23.965,99	67,93%	9	\$ 1.442.199,01

Fuente: Elaboración propia.

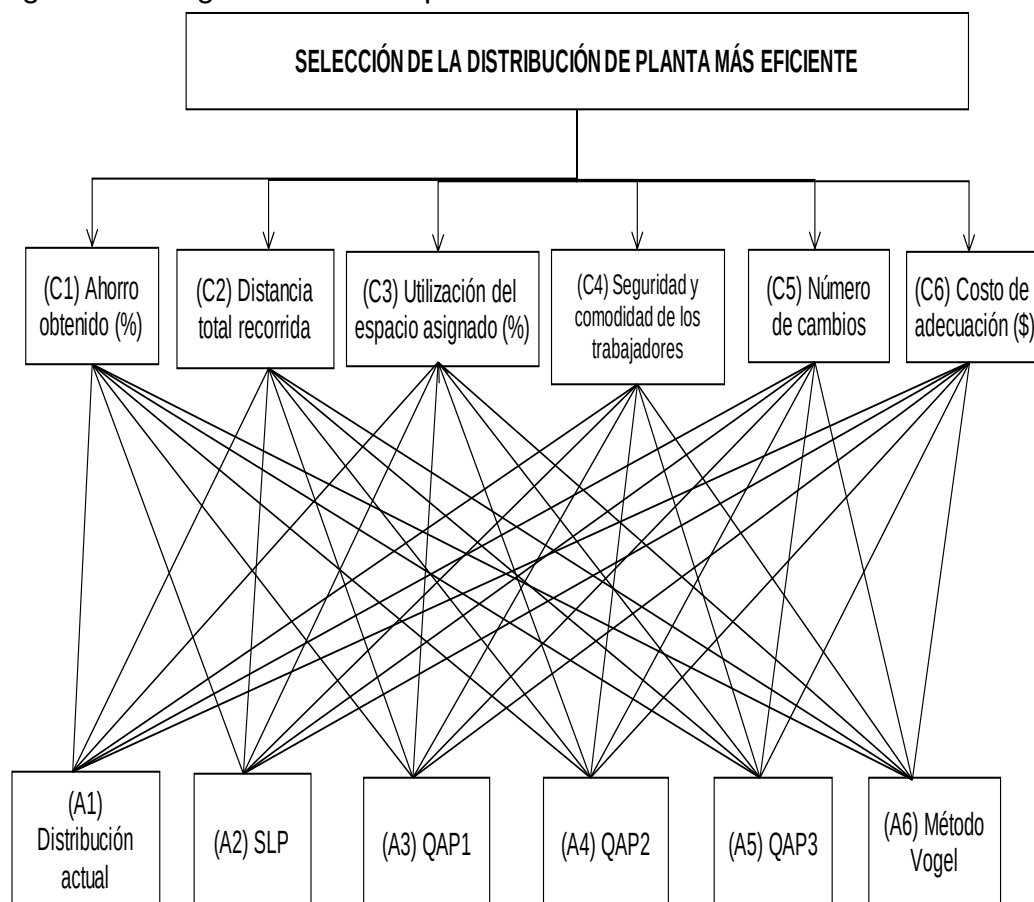
El criterio 4 corresponde a la Seguridad y comodidad de los trabajadores que es un criterio cualitativo, evaluado únicamente dentro del AHP con la escala de Saaty, de forma inversamente proporcional al porcentaje de utilización del espacio asignado que arrojó cada alternativa, ya que a menor uso del espacio se poseen áreas más confortables y menos congestionadas de elementos, máquinas y materiales, que puedan ocasionar accidentes.

9.2. ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA MEDIANTE AHP

Las alternativas planteadas a la distribución actual de la organización se van a evaluar mediante el método de decisión multicriterio conocido como Proceso Analítico Jerárquico (AHP) evaluando seis alternativas según los seis criterios seleccionados anteriormente.

Para ilustrar la estructura del problema a desarrollar se elabora un diagrama de jerarquías, donde se puede apreciar el objetivo principal del análisis, los criterios a tener en cuenta y el total de alternativas. Dicha estructura se presenta en la figura 19.

Figura 20. Diagrama de Jerarquías.



Fuente: Elaboración propia.

El método de decisión multicriterio AHP utiliza las comparaciones entre pares a través de la escala fundamental para calificar las alternativas según cada criterio (ver anexo D) y los criterios entre sí (ver anexo F).

En primera instancia se utilizan dichas comparaciones entre pares para la calificación entre criterios y entre alternativas para cada criterio utilizando la escala fundamental (Tabla 2), teniendo como expertos al gerente general y al gerente de producción, siguiendo el procedimiento, y efectuando la verificación del nivel de consistencia al compararse los criterios entre cada alternativa (ver anexo E) y con esto llegar al vector prioridad global, indicando el valor que sea mayor la alternativa a seleccionar.

Las seis matrices de comparación entre pares de alternativas para cada criterio y la matriz de comparación entre criterios y sus vectores prioridad, así como la verificación de su consistencia a través del índice CR se encuentran en el Anexo F, en donde se obtiene una consistencia CR del 8,19%, permitiendo decir que la calificación dada para los aspectos está acorde con la metodología.

Las comparaciones entre pares de alternativas es el mecanismo base para desarrollar el Proceso Analítico jerárquico-AHP, mediante la utilización de la escala de Saaty para definir las calificaciones lo que la convierte en una metodología estandarizada a nivel mundial. Sin embargo, según Opydo⁵⁰ “muchas veces la toma de decisiones utilizando la escala de Saaty se torna difícil de manejar especialmente a medida que aumenta el número de alternativas”, ya que aumenta el número de comparaciones necesarias y por ende el tiempo empleado para completarlas, además cuando hay un gran número de comparaciones es difícil ser consistente lo que implicaría a su vez un mayor esfuerzo para lograr dicha consistencia.

Para no tener una decisión final sesgada por la opinión de estas personas, se optó por realizar varios escenarios al AHP. Para hacer esto posible se obtuvieron los vectores prioridad para cada alternativa según escalas naturales a partir de los resultados numéricos que arrojó cada una, excepto para la alternativa 4 que es cualitativa. Es por esto que cuando se cuenta con criterios que se pueden medir para cada alternativa, se pueden emplear escalas específicas para cada criterio logrando que las calificaciones sean más objetivas y precisas. En la mayoría de los casos estas escalas “naturales” funcionan mejor.

⁵⁰ OPYDO, Dawid. When (Not) to Use Pairwise Comparisons in Analytic Hierarchy Process. Transparent Choice. 2014. [En: http://blog.transparentchoice.com/analytic-hierarchy-process/when-not-to-use-pairwise-comparisons-in-ahp](http://blog.transparentchoice.com/analytic-hierarchy-process/when-not-to-use-pairwise-comparisons-in-ahp).

Es por esto que como un segundo escenario del AHP, se van a utilizar las calificaciones obtenidas de los criterios para cada una de las seis alternativas para determinar los vectores prioridad y tomar la decisión a partir de ellos.

La obtención de los vectores prioridad de las alternativas para cada criterio se calcula como la división entre el resultado de la alternativa para el criterio sobre la suma de los resultados de todas las alternativas para ese mismo criterio, es decir, que el vector prioridad de las alternativas para cada criterio está determinado por la porción que representa cada valor del total (Ver Anexo G). En los casos en los que un resultado bajo es el deseable como resultado para un criterio en específico se obtiene su recíproco y con estos valores se opera para obtener el vector prioridad.

Al momento de calcular los vectores prioridad de las alternativas para cada criterio, usando los datos reales del problema para encontrar la escala, ocurrió un problema común del AHP con dos de los criterios: Número de cambios y costo de adecuación, específicamente para la alternativa 1, es decir, el estado actual ya que el valor de esta alternativa para ambos criterios es de 0, por lo que la distribución actual no representa ningún cambio en la distribución y por consiguiente ningún costo por reubicación de los departamentos; es por esta situación que los vectores prioridad tendrían un valor de 0 para esta alternativa y como se considera mejor el resultado menor obtenido para estos dos criterios, el modelo daría todo el peso a la alternativa actual, lo cual aparte de no ser el objetivo del análisis, no tiene en cuenta los demás resultados de las alternativas.

Este inconveniente se puede solucionar de dos formas conocidas para normalizar: Uno de los métodos es con el uso de Euler, al coger cada valor del vector y aplicarle $e^{(-x)}$, siendo x el valor correspondiente y con esos valores se trabaja bajo el procedimiento inicial y de esta manera desaparece el 0. Otro de los métodos es con el uso de la desviación estándar y el promedio de los datos, encontrando el valor z de cada valor y estos valores representarlos como su recíproco, para luego encontrar el vector prioridad con la escala que se obtiene a partir de los recíprocos.⁵¹ Los vectores prioridad obtenidos por medio de estas dos técnicas se encuentran en el Anexo H.

Debido a que se presenta esta situación se puede plantear un segundo escenario para desarrollar el AHP, que es obteniendo los vectores prioridad de las alternativas para C1, C2 y C3 (% Ahorro, Total Distancia recorrida y % Utilización

⁵¹ COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. Metodología Multicriterio para la Priorización y Evaluación. En: http://www.cepal.org/es/search?as_q=multicriterio. s.a.

del espacio asignado) mediante las escalas naturales a partir de los resultados obtenidos y los vectores prioridad de las alternativas para C4, C5 y C6 (Seguridad y comodidad de los trabajadores, número de cambios y costo de adecuación) mediante la comparación entre pares según la escala fundamental propuesta por Saaty.

Ahora, se tiene como tercer escenario, los vectores prioridad obtenidos a partir de las escalas naturales para C1, C2 y C3, el vector prioridad de las alternativas para C4 mediante la escala fundamental de Saaty y para C5 y C6 mediante la normalización del vector de resultados mediante la técnica con el Euler. Y por último un cuarto escenario es igual al anterior pero para C5 y C6 se utiliza la técnica de encontrar el valor z de cada dato del vector de resultados para obtener el vector prioridad.

Cabe resaltar que en los cuatro escenarios el vector prioridad de las alternativas para C4 (Seguridad y comodidad de los trabajadores) se obtiene a partir de la escala fundamental de Saaty debido a que fue una medida cualitativa arraigada al porcentaje de utilización del espacio asignado, como se ha explicado en ocasiones anteriores.

Cada uno de los cuatro escenarios del AHP arrojó su respuesta y para tomar la decisión final se sumarán las calificaciones obtenidas de cada alternativa dentro de cada escenario, esto con el fin de evaluar y comparar el resultado final de los cuatro procesos de análisis. A continuación la tabla 29 indica el resultado de cada escenario y la decisión final dada por la jerarquía del mayor puntaje obtenido en el vector de prioridad global:

Tabla 29. Resultados finales.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Suma calificaciones	Vector prioridad global final	Jerarquía
A1	0,158466151	0,130019907	0,30935309	0,142287042	0,74012619	0,17422674	4to
A2	0,170473612	0,216155126	0,182062826	0,212873394	0,781564958	0,183981484	3ro
A3	0,257012275	0,25511886	0,209864403	0,238923297	0,960918834	0,226201637	2do
A4	0,215285919	0,278475824	0,222078727	0,252900842	0,968741313	0,22804306	1ro
A5	0,164385308	0,174425634	0,099201325	0,142250101	0,580262369	0,136594573	5to
A6	0,187579522	0,040664988	-0,022560371	0,010765324	0,216449462	0,050952506	6to
				Suma	4		

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 29 muestra como resultado final que se debe elegir la alternativa 4, ya que es el puntaje mayor de los valores arrojados por el vector prioridad global para las alternativas como distribución de la fábrica Antonello. La figura 21 corresponde al plano de la planta con la distribución recomendada.

Siendo la alternativa 4 la elegida por el método de AHP, al comparar sus medidas de desempeño con las de la actual se pueden tener los siguientes datos:

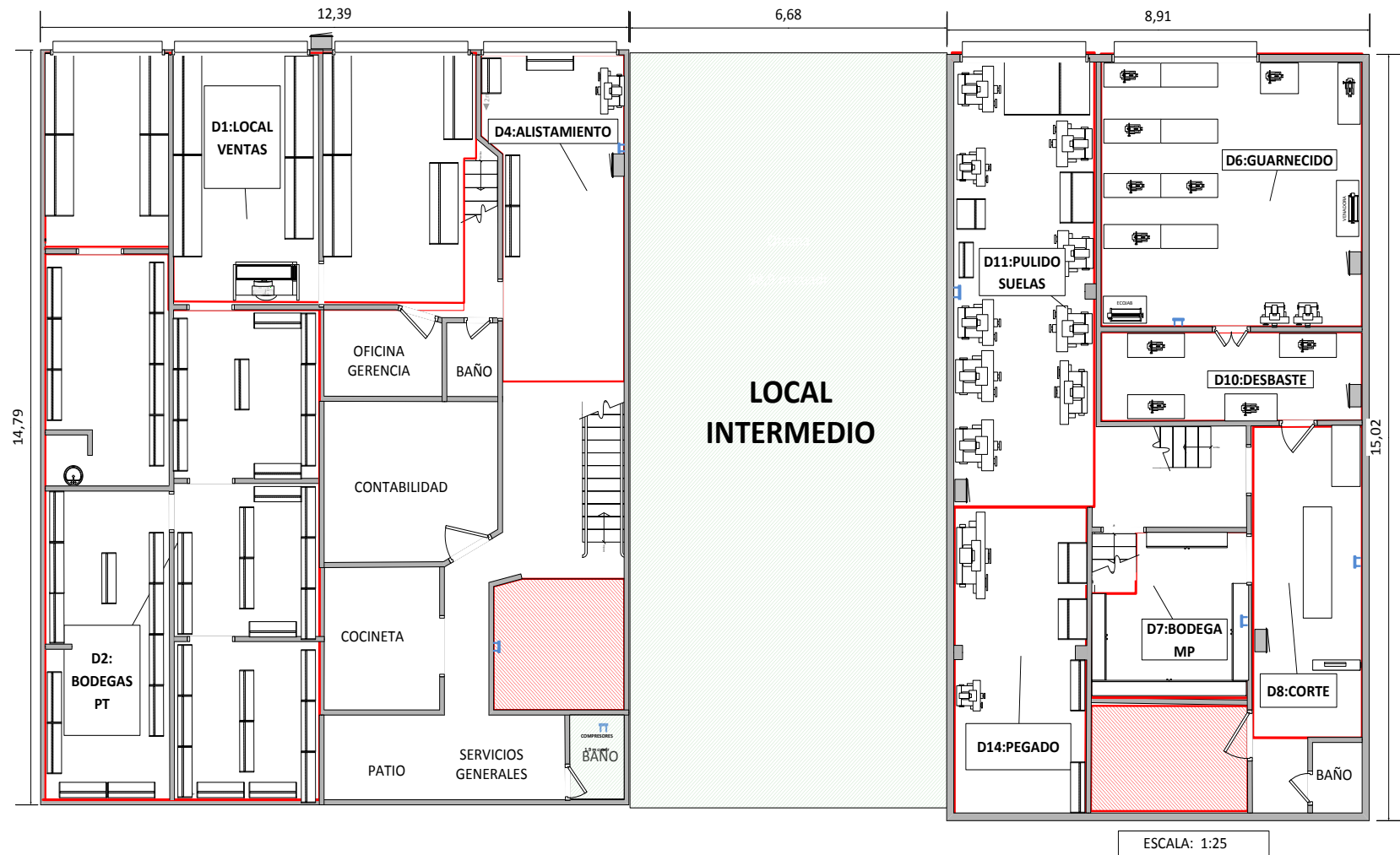
Tabla 30. Comparación de las medidas de desempeño.

Alternativa \ Criterio	Costo de la distribución (\$)	Distancia total recorrida (m)	% Utilización del espacio asignado	No. De cambios	Costo de adecuación (\$)
Distribución actual	\$ 257.151,79	20.450,95	73,53%	0	\$ 0
Distribución recomendada	\$ 170.225,53	13.537,82	65,44%	12	\$ 1.551.858,51

Fuente: Elaboración propia.

La distribución recomendada representaría para la compañía un porcentaje de ahorro mensual por costo de manejo de materiales de un 33,80%. Teniendo en cuenta que el costo de adecuación es de 1'551.858,51 pesos y que el ahorro obtenido con esta distribución es de \$86.926,26 pesos mensuales, por concepto de disminución en los tiempos y recorridos que deben hacer los operarios al movilizar materias primas, materiales en proceso y producto terminado alrededor de la fábrica, se tiene que el tiempo en meses en el que se recuperaría esta inversión es de 16,8 meses, es decir, un año y cuatro meses; tiempo en el cuál si se continuase con la distribución actual se estarían generando sobre costos por valor de \$1'460.361,16 pesos. Esta cifra anterior cubriría el 94,1% de la inversión requerida y estaría generando beneficios no solo en los costos de movimiento de materiales, sino en el entorno laboral al tener en cuenta los otros factores estudiados en el AHP, más aun si esta alternativa se complementa con un buen estudio de ergonomía y ubicación de los puestos de trabajo.

Figura 21. Distribución recomendada
LOCAL 1 (PRIMER PISO)

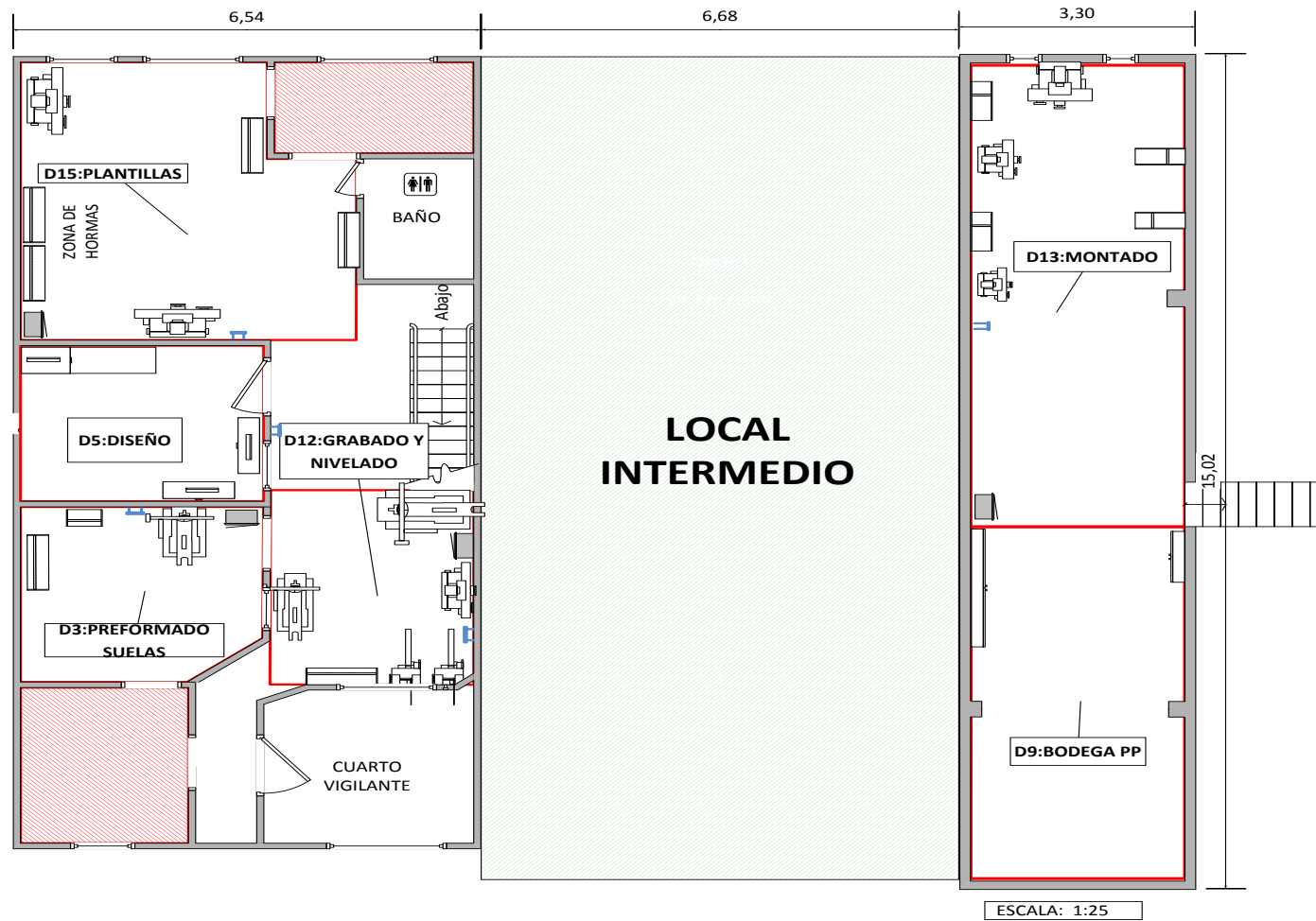


Fuente: Elaboración Propia

Figura 20. (Continuación)

LOCAL 1 (SEGUNDO PISO)

LOCAL 2 (SEGUNDO PISO)



Fuente: Elaboración propia.

10. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD – AHP

Considerando que la decisión final está estrechamente ligada a las ponderaciones de cada criterio, es decir, al vector prioridad de los criterios, es conveniente visualizar la variación que se obtiene en la respuesta final al hacer diferentes modificaciones en las ponderaciones de cada uno. Las variaciones que se van a tomar en cuenta para hacer este análisis son las siguientes:

- La primera variación se dará partiendo del hecho de darle más importancia en las calificaciones por medio de la escala fundamental de Saaty al criterio 4, es decir, a la seguridad y comodidad de los trabajadores, dejando en segundo plano los temas monetarios que son el porcentaje ahorro obtenido y el costo de adecuación de dicha alternativa. Este nuevo enfoque será aplicado también a los cuatro escenarios utilizados para generar la respuesta inicial. El nuevo vector prioridad para los criterios así como el resultado final para cada escenario y la selección final se encuentran a continuación:

Tabla 31. Análisis de sensibilidad 1.

Vector prioridad criterios
0,309514488
0,075843607
0,030375785
0,34643905
0,046294715
0,191532355

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Suma calificaciones	Vector prioridad global final
A1	0,138909962	0,113215396	0,268156001	0,125943486	0,646224845	0,153704397
A2	0,15618432	0,197095787	0,168021207	0,194338564	0,715639879	0,170214743
A3	0,230591981	0,231330314	0,191402656	0,216262613	0,869587563	0,206831157
A4	0,245002054	0,296154081	0,248565871	0,274873624	1,06459563	0,25321377
A5	0,175978856	0,182819174	0,11913534	0,155583926	0,633517297	0,15068191
A6	0,179144017	0,057909502	0,004718924	0,032997786	0,27477023	0,065354022
				Suma	4	

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta este planteamiento, la alternativa a seleccionar sería la 4, es decir, que no representa ningún cambio a la decisión inicial.

- La segunda modificación a considerar se basa en la calificación de los criterios considerando una relevancia importante de la distancia total recorrida frente a los otros, seguida por el costo de la distribución y la seguridad y comodidad de los trabajadores. El vector prioridad se obtuvo a partir de porcentajes directos dados a cada criterio. A continuación se muestran los resultados.

Tabla 32. Análisis de sensibilidad 2.

Vector prioridad criterios
0,25
0,4
0,05
0,17
0,03
0,1

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Suma calificaciones	Vector prioridad global final
A1	0,112683456	0,111922833	0,198392008	0,120736491	0,543734788	0,1268899
A2	0,216686518	0,209109318	0,216686518	0,207655553	0,850137908	0,198394358
A3	0,271163532	0,241407681	0,271163532	0,232089585	1,01582433	0,237060145
A4	0,207997943	0,257152237	0,207997943	0,245848609	0,918996732	0,214463753
A5	0,136833581	0,161069278	0,136833581	0,14635394	0,581090379	0,135607472
A6	0,13382732	0,060336558	0,13382732	0,047315822	0,37530702	0,087584372
				Suma	4,285091157	

Fuente: Elaboración propia.

Con este enfoque la alternativa que se escogería sería la alternativa 3.

- El tercer y último análisis de sensibilidad fue desarrollado bajo una calificación binaria entre criterios, es decir, una calificación entre pares que indica que cuando se califica 1 es porque el criterio es más relevante respecto al otro y 0 de lo contrario. A partir de esta calificación se obtuvo lo siguiente:

Tabla 33. Análisis de sensibilidad 3.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Suma	Vector prioridad
C1		1	1	1	1	1	5	0,333333333
C2	0		1	1	1	0	3	0,2
C3	0	0		0	0	0	0	0
C4	0	0	1		1	0	2	0,133333333
C5	0	0	1	0		0	1	0,066666667
C6	0	1	1	1	1		4	0,266666667
Suma							15	

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Suma calificaciones	Vector prioridad global final
A1	0,162477859	0,147288626	0,365123905	0,165832263	0,840722653	0,196909854
A2	0,181953028	0,209555821	0,168797847	0,205711606	0,766018302	0,179412974
A3	0,258826273	0,251133567	0,194739524	0,229604577	0,934303942	0,218827995
A4	0,211037907	0,265159723	0,19860931	0,235458152	0,910265093	0,213197736
A5	0,167245355	0,179218118	0,090091716	0,141110982	0,577666171	0,135298081
A6	0,178713251	0,056971892	-0,017362302	0,02228242	0,240605261	0,05635336
Suma					4	

Fuente: Elaboración propia.

Para este caso la alternativa a seleccionar sería la 3. De manera general se observa que tanto en el vector de la respuesta inicial como en los vectores finales de los análisis de sensibilidad existe una estrecha diferencia entre las calificaciones de las alternativas 3 y 4, lo que da a entender que si existiera alguna razón para no implementar la alternativa 4 la opción 3 daría también muy buenos resultados. A partir de esta situación también se puede concluir que la alternativa 4 es una distribución que brinda resultados equilibrados para cada uno de los criterios estudiados.

11. CONCLUSIONES

- La distribución de planta en una organización es un elemento que al ser estudiado y planeado puede brindar mejoras en la eficiencia de sus procesos, trayendo consigo beneficios como la disminución en el costo de manejo de materiales y en la distancia recorrida. El estudio realizado en Calzado Antonello sirvió para demostrar que la distribución actual podía ser mejorada para percibir este tipo de beneficios, además de mejorar la seguridad y comodidad de trabajadores, con una posible mejora en la asignación de los departamentos a los espacios disponibles. Con la alternativa recomendada se lograría obtener un ahorro en los costos y en la distancia total recorrida de 33,8%.
- Para lograr un correcto análisis sobre la distribución de planta de una organización es necesario caracterizar sus procesos, productos, materiales, mano de obra y maquinaria que intervienen en los procesos de fabricación y de esta manera determinar la relación entre los procesos, el personal y los materiales. Esto con el fin de determinar los tiempos de cada proceso, distancias y la relación entre los departamentos, y con esto estructurar un estado actual y obtener medidas de desempeño relevantes.
- El análisis del volumen de producción, los materiales, maquinaria, las características de los productos y su proceso de fabricación, llevan a recomendar que los departamentos se deben distribuir conforme a una distribución por proceso.
- La utilización de técnicas diferentes, una procedimental, la programación lineal y una heurística permitió hacer comparaciones sobre las asignaciones que se pueden generar sobre los departamentos al interior de la fábrica, evaluando en que costo se incurre al tener diferentes variaciones en la disposición.
- El Proceso Analítico Jerárquico-AHP fue útil para comparar las alternativas con la distribución actual, principalmente a través de la evaluación del costo que genera cada una, la distancia recorrida y la seguridad y bienestar de los trabajadores, dando como resultado que la alternativa generada por el QAP sería la recomendada, dado que brinda la mejor combinación de resultados para los criterios estudiados.

12.RECOMENDACIONES

- En el momento en que se desee implementar la distribución recomendada, se debe hacer una actualización de los costos involucrados en la reacomodación de la distribución, ya que puede cambiar el costo total de adecuación calculado en este trabajo.
- En el futuro se puede estudiar la posibilidad de incluir dos departamentos en una sola localidad, tal y como se intentó variar al interior del documento, pero se debe tener en cuenta la variación de los centroides de cada localidad al ubicar dos departamentos para calcular el nuevo costo por el flujo de materiales. También teniendo en cuenta que existen espacios disponibles que están ocupados actualmente por máquinas y herramientas obsoletas, materiales que no se utilizan, que permitiría liberar espacio.
- Como un análisis posterior está el estudio de conformación de puestos de trabajo, teniendo en cuenta los principios de ergonomía y de las relaciones operario-máquina.

BIBLIOGRAFÍA

AL-HAWAR Tarek, MUMANI Ahmad y MOMANI Amer. Application of the Analytic Network Process to facility layout selection. En: Journal of Manufacturing System. 2014. p. 488-497

AGUIRRE, Manuel. Propuesta de Distribución de la Planta para la Fábrica de Calzado Rosana. Licenciado en Administración. Universidad Veracruzana. 2011.

AZNAR BELLVER, Jerónimo; GUIJARRO MARTINEZ, Francisco. Nuevos métodos de valoración. Modelos multicriterio. Universidad Politécnica de Valencia. s.a. p. 37-42.

BENJAAFAR, Saifallah y SHEIKZADEH. Mehdi. Design of Flexible Layouts for Manufacturing Systems. En: IEEE Explore. Abril,1996,. p. 852-857.

BERUMEN, Sergio y LLAMAZARES, Francisco. La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. En: Cuadernos de Administración, Pontificia Universidad Javeriana. 2007. p. 65-87.

CAMARGO, María E. *et al.* Study of the layout of a steel manufacturing industry. En: 40th International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE). 2010. p. 1-3.

COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. Metodología Multicriterio para la Priorización y Evaluación. En: http://www.cepal.org/es/search?as_q=multicriterio. s.a.

CORONADO, Jairo. Métodos para Distribución en Planta. Colombia. Universidad de los Andes. 2007. p. 4.

DÍAZ HERRERA, Jhonatan. 2012. Automatización del proceso de corte en una empresa de calzado. Ingeniería Industrial, Universidad San Buenaventura

Seccional Cali. Cali: Tesis de grado para título de Ingeniería Industrial-Universidad San Buenaventura, 2012. pág. 101.

FEBRES, Juan Diego y OCHOA, Ronald. Propuestas de mejora del proceso productivo en la empresa PRESS FORJA S.A. utilizando el software Flexsim Manufacturing como herramienta para la toma de decisiones. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. 2010.

GUIMARAES, L.B.de M; RIBEIRO, J.L.D. y RENNER, J.S. Cost-benefit analysis of a socio-technical intervention in a Brazilian footwear. 2012.

GUIMARAES, L.B. *et al.* Worker evaluation of a macroergonomic intervention in a Brazilian footwear company, 2014.

MACHUCA, José A. *et al.* Dirección de operaciones. España: Mc GrawHill Interamericana de España. 1995.

MEYERS, Fred E. y STEPHENS, Matthew P. Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales 3 ed. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2006.

MAHDAVI, Iraj. *et al.* Designing a mathematical model for intra-cell layout of dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and system reconfiguration. En: IEEE Explore. 2010. p. 1-6.

MAYA, Natalia. Rediseño de planta de la empresa OSAKA MOTORCYCLE PARTS LTDA. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Medellín. Universidad Nacional de Colombia.2008.

MEJIA, Heidy y GALOFRE, Marjoire. Aplicación de software de simulación como herramienta en el rediseño de plantas de producción en empresas del sector de alimentos. 2008.

MONTMOLLIN, Maurice. Les systemes hommes-machines - introduction à l'ergonomie. Paris. Presses Universitaires. 1967.

MORENO, Jose María. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. Universidad de Zaragoza. s.a.

MUTHER, Richard. Distribución de planta 3ed. España: Editorial Hispano Europea, 1977.

NERGIZA. LA ENERGÍA DEL DÍA A DÍA. ¿Cuánta potencia lumínica necesito?. En: <http://nergiza.com/cuanta-potencia-luminica-necesito/>. 2015

NORANI, Amit. NURULZULAIHA, Suhadak y JOHARI, Norzarina. Using Simulation to Solve Facility Layout for Food Industry at XYZ Company. En: IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research (SHUSER). 2012

OPYDO, Dawid. When (Not) to Use Pairwise Comparisons in Analytic Hierarchy Process. Transparent Choice. 2014. En: <http://blog.transparentchoice.com/analytic-hierarchy-process/when-not-to-use-pairwise-comparisons-in-ahp>.

OREJUELA, Juan Pablo y OSORIO, Juan Carlos. El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. En: Scientia et Technica Año XIV, No 39. 2008. p. 247-258.

OROZCO, E. E. y CERVERA, J. E. Diseño y Distribución de Instalaciones Industriales apoyado en el uso de la Simulación de Procesos. En: Investig.innov.ing. Vol. 1 No1. 2013. p. 6-12.

RAMAN, Dhamodharan, NAGALINGAM, SevV, LIN, GrierC.I. Towards measuring the effectiveness of a facilities layout. En: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2009. p. 191-203.

ROJAS TRUJILLO, Juan Fernando. Cueros Vélez tendrá curtimbre propia este año en Amagá. En: <http://www.elcolombiano.com/cueros-velez-tendra-curtimbre-propia-este-ano-en-amaga-YG1239247>. 08 de Febrero de 2015.

SAATY, Thomas. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. En: European Journal of Operational Research. 1990. p. 9-26.

SALAZAR, Andres F. *et al.* Propuesta de Distribución en Planta bietapa en ambientes de manufactura flexible mediante el proceso analítico jerárquico. En: Revista EIA. 2010. p. 161-175.

SEGURA, Antonio. Layout Aplicación a un Despacho de Administración de Fincas. Trabajo de Fin de Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas.

SINGH, Ajit Pal y MANDERAS, Yilma. Production Floor Layout Using Systematic Layout Planning in Can Manufacturing Company. En: IEEE Explore. 2013. p. 822-828. 2013.

SIGUAS SIFUENTES, Sandra. Proyecto de inversión para el servicio de alquiler de montacargas. Perú. N.A En: Biblioteca virtual Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

TOMPKINS, James A. *et al.* Planeación de instalaciones 3a. ed. México D.F. International Thomson editores. 2006.

YOULING, Chen, *et al.* Research on optimization method for facilities layout of complex. En: IEEE Explore. 2009. p. 827–831.

ANEXOS

Anexo A. Matriz de flujos entre departamentos.

# viajes / Mes (26 días)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15
D1	0														
D2	4	0													
D3			0									52			
D4		104		0											
D5					0										
D6						0			78						
D7			26			26	0	78							
D8								0		78					
D9									0				52		
D10						182				0					
D11											0			52	
D12											52	0			
D13													0	52	
D14				52										0	
D15				52											0

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B. Matriz de distancias rectilíneas en metros.

	Distancias a escalera 1 en Local 1										Distancias a escalera 2 en Local 2								
	13,81	19,14	7,77	2,53	5,6	6,31	6,12	9,21	5,85	12,22	8,00	8,58	4,94	7,63	5,89	5,26	3,82	5,25	5,03
Distancias Rectilíneas (m)	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19
L1	0	8,23	9,09	14,45	28,51	29,22	29,03	32,12	28,76	35,13	24,65	27,31	30,45	35,08	35,52	42,78	36,53	42,80	42,58
L2	8,23	0	14,49	19,78	33,84	34,55	34,36	37,45	34,09	40,46	32,96	35,62	38,76	43,39	43,83	51,09	44,84	51,11	50,89
L3	9,09	14,49	0	8,41	22,47	23,18	22,99	26,08	22,72	29,09	27,56	30,22	33,36	37,99	38,43	45,69	39,44	45,71	45,49
L4	14,45	19,78	8,41	0	17,23	17,94	17,75	20,84	17,48	23,85	32,85	35,51	38,65	43,28	43,72	50,98	44,73	51,00	50,78
L5	27,35	32,68	21,31	16,07	0	4,60	8,22	11,37	9,57	14,38	45,75	48,41	51,55	56,18	56,62	63,88	57,63	63,90	63,68
L6	28,06	33,39	22,02	16,78	4,60	0	8,93	12,02	10,22	15,03	46,46	45,42	48,56	53,19	53,63	60,89	54,64	64,61	64,39
L7	27,87	33,20	21,83	16,59	8,22	8,93	0	9,23	7,43	10,99	46,27	48,93	52,07	56,70	57,14	64,40	58,15	64,42	64,20
L8	30,96	36,29	24,92	19,68	11,37	12,02	9,23	0	4,52	3,59	49,36	52,02	55,16	59,79	60,23	67,49	61,24	67,51	67,29
L9	27,60	32,93	21,56	16,32	9,57	10,22	7,43	4,52	0	6,37	46,00	48,66	51,80	56,43	56,87	64,13	57,88	64,15	63,93
L10	33,97	39,30	27,93	22,69	14,38	15,03	10,99	3,59	6,37	0	45,69	55,03	58,17	62,80	63,24	70,50	64,25	70,52	70,30
L11	24,65	32,96	27,56	32,85	46,91	47,62	47,43	50,52	47,16	53,53	0	17,08	13,44	3,53	15,37	18,13	11,88	18,15	17,93
L12	27,31	35,62	30,22	35,51	49,57	50,28	50,09	53,18	49,82	56,19	17,08	0	3,64	16,71	12,77	15,53	9,28	18,73	18,51
L13	30,45	38,76	33,36	38,65	52,71	53,42	53,23	56,32	52,96	59,33	13,44	3,64	0	13,07	9,13	11,89	5,64	15,09	14,87
L14	35,08	43,39	37,99	43,28	57,34	58,05	57,86	60,95	57,59	63,96	3,53	16,71	13,07	0	15,00	17,76	11,51	17,78	17,56
L15	35,52	43,83	38,43	43,72	57,78	58,49	58,30	61,39	58,03	64,40	15,37	12,77	9,13	15,00	0	10,86	4,61	16,04	15,82
L16	42,78	51,09	45,69	50,98	65,04	65,75	65,56	68,65	65,29	71,66	18,13	15,53	11,89	17,76	10,86	0	6,25	15,41	15,19
L17	36,53	44,84	39,44	44,73	58,79	59,50	59,31	62,40	59,04	65,41	11,88	9,28	5,64	11,51	4,61	6,25	0	13,97	13,75
L18	42,14	50,45	45,05	50,34	64,40	65,11	64,92	68,01	64,65	71,02	17,49	18,07	14,43	17,12	15,38	14,75	13,31	0	7,30
L19	41,92	50,23	44,83	50,12	64,18	64,89	64,70	67,79	64,43	70,80	17,27	17,85	14,21	16,90	15,16	14,53	13,09	7,30	0

Fuente: Elaboración propia.

Anexo C. Matriz de costos de recorrido para método Vogel.

Costos de recorrido \$	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19
D1	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999
D2	\$ 9.999.999	\$ 413,94	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999
D3	\$ 27.971,78	\$ 33.405,29	\$ 29.874,49	\$ 33.333,37	\$ 42.526,52	\$ 9.999.999	\$ 11.854,33	\$ 10.154,32	\$ 7.774,30	\$ 11.612,41	\$ 7.100,83	\$ 0,00	\$ 4.086,57	\$ 10.075,86	\$ 9.932,01
D4	\$ 10.762,40	\$ 0,00	\$ 18.948,63	\$ 25.866,38	\$ 44.252,69	\$ 9.999.999	\$ 43.101,91	\$ 46.580,41	\$ 50.686,60	\$ 56.741,26	\$ 57.316,65	\$ 66.810,58	\$ 58.637,43	\$ 66.836,74	\$ 66.549,04
D5	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00
D6	\$ 29.864,68	\$ 38.014,95	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 3.570,03	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999
D7	\$ 38.929,65	\$ 50.587,83	\$ 36.837,32	\$ 43.061,99	\$ 57.467,04	\$ 9.999.999	\$ 40.950,05	\$ 24.729,93	\$ 30.353,05	\$ 46.199,15	\$ 42.622,58	\$ 9.999.999	\$ 39.860,06	\$ 54.435,74	\$ 54.076,13
D8	\$ 34.405,68	\$ 42.555,95	\$ 37.259,75	\$ 42.448,06	\$ 56.237,80	\$ 9.999.999	\$ 3.462,15	\$ 16.388,80	\$ 12.818,77	\$ 0,00	\$ 14.711,67	\$ 17.418,61	\$ 11.288,75	\$ 17.438,23	\$ 17.222,46
D9	\$ 23.885,21	\$ 29.318,72	\$ 25.787,92	\$ 29.246,79	\$ 38.439,95	\$ 38.904,19	\$ 7.767,76	\$ 6.067,75	\$ 3.687,72	\$ 7.525,83	\$ 3.014,26	\$ 4.086,57	\$ 0,00	\$ 9.134,31	\$ 8.990,46
D10	\$ 64.209,95	\$ 76.407,55	\$ 50.387,52	\$ 38.395,88	\$ 10.527,01	\$ 9.999.999	\$ 106.318,01	\$ 103.951,57	\$ 111.137,40	\$ 121.733,07	\$ 122.740,00	\$ 139.354,38	\$ 125.051,37	\$ 147.853,95	\$ 147.350,48
D11	\$ 27.555,81	\$ 32.989,32	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 11.438,37	\$ 11.817,60	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999
D12	\$ 23.224,82	\$ 28.658,33	\$ 25.127,53	\$ 9.999.999	\$ 37.779,56	\$ 9.999.999	\$ 10.049,70	\$ 8.349,69	\$ 5.969,67	\$ 9.807,78	\$ 0,00	\$ 9.999.999	\$ 3.014,26	\$ 10.487,78	\$ 10.343,94
D13	\$ 27.555,81	\$ 32.989,32	\$ 29.458,52	\$ 9.999.999	\$ 42.110,56	\$ 9.999.999	\$ 11.438,37	\$ 11.817,60	\$ 9.999.999	\$ 11.196,44	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 8.705,27	\$ 0,00	\$ 4.773,12
D14	\$ 9.448,16	\$ 12.933,19	\$ 5.498,89	\$ 9.999.999	\$ 11.265,87	\$ 9.999.999	\$ 21.479,03	\$ 23.218,28	\$ 9.999.999	\$ 28.298,71	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 33.346,44	\$ 33.202,60
D15	\$ 9.448,16	\$ 12.933,19	\$ 5.498,89	\$ 9.999.999	\$ 11.265,87	\$ 9.999.999	\$ 21.479,03	\$ 23.218,28	\$ 9.999.999	\$ 28.298,71	\$ 9.999.999	\$ 9.999.999	\$ 29.246,79	\$ 33.346,44	\$ 33.202,60

Fuente: Elaboración propia.

*El costo \$9'999.999 representa un valor M para poder que WinQSB restringiera las Lm que no pueden albergar Do.

Anexo D. Matrices de comparación entre pares de alternativas.

AHORRO	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	1	1/2	1/5	0,5	1	1
A2	2	1	1/2	1	2	2
A3	5	2	1	2	3	5
A4	2	1	1/2	1	2	2
A5	1	1/2	1/3	1/2	1	1
A6	1	1/2	1/5	1/2	1	1
Suma	12	5,5	2,73333333	5,5	10	12

Vector Prioridad
0,0869425967
0,1799827544
0,3710766199
0,1799827544
0,0950726780
0,2397203745

DISTANCIA TOTAL	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	1	0,2	1/6	1/3	1/3	3
A2	5	1	2	2	4	5
A3	6	1/2	1	4	4	6
A4	5	1/2	1/4	1	3	5
A5	3	1/4	1/4	1/3	1	3
A6	1/3	0,2	1/6	0,2	1/3	1
Suma	20,3333333	2,65	3,83333333	7,86666667	12,6666667	23

Vector Prioridad
0,061208957
0,322069554
0,304960732
0,180191722
0,093142172
0,038426863

UTILIZACIÓN DEL ESPACIO	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	1	2	2	1	4	4
A2	1/4	1	1/2	1/2	2	1
A3	3	1	1	1/2	2	1
A4	1/3	1/2	1/2	1	1/3	1/3
A5	1/4	1/2	1/2	3	1	1/2
A6	1/4	1	1	3	2	1
Suma	5,08333333	6	5,5	9	11,3333333	7,83333333

Vector Prioridad
0,311396932
0,111073634
0,216389084
0,070482044
0,118136861
0,172521445

Anexo D. (Continuación)

SEGURIDAD Y COMODIDAD	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	1	1/4	1/5	1/4	1/5	1/4
A2	4	1	1	1/3	1/2	1
A3	5	1	1	1/3	1/2	1
A4	4	3	3	1	3	3
A5	5	2	2	1/3	1	2
A6	4	1	1	1/3	1/2	1
Suma	23	8,25	8,2	2,58333333	5,7	8,25

Vector Prioridad
0,043389413
0,12584001
0,133086387
0,363408665
0,208435514
0,12584001

NO. DE CAMBIOS	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	1	1/4	1/4	1/5	1/5	1/4
A2	4	1	1/3	1	1/2	1
A3	4	3	1	3	3	3
A4	5	1	1/3	1	1/2	1
A5	5	2	1/3	2	1	2
A6	4	1	1/3	1	1/2	1
Suma	23	8,25	2,58333333	8,2	5,7	8,25

Vector Prioridad
0,043389413
0,12584001
0,363408665
0,133086387
0,208435514
0,12584001

COSTO DE ADECUACIÓN	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	1	4	7	4	3	3
A2	1/4	1	1	1/2	1/2	1/2
A3	1/7	1	1	1/2	1/2	1/2
A4	1/4	2	2	1	1/2	1/2
A5	1/3	2	2	2	1	2
A6	1/3	2	2	2	1/2	1
Suma	2,30952381	12	15	10	6	7,5

Vector Prioridad
0,422164948
0,121413238
0,120636841
0,216293989
0,28214597
0,247324067

Anexo E. Verificación de consistencia de las seis medidas de desempeño.

MATRIZ-CRITERIO	λ_{max}	NUMERO DE ALTERNATIVAS	MAX CR TEORICO	CI	CR
% AHORRO	6,566957555	6	10%	0,11339	9,14%
TOTAL DISTANCIA RECORRIDA (m)	6,58157695	6	10%	0,11632	9,38%
% UTILIZACIÓN DEL ESPACIO	6,54967622	6	10%	0,10994	8,87%
SEGURIDAD Y COMODIDAD	6,246066716	6	10%	0,04921	3,97%
NO. DE CAMBIOS	6,246066716	6	10%	0,04921	3,97%
COSTO DE ADECUACIÓN (\$)	6,618391686	6	10%	0,12368	9,97%

Fuente: Elaboración propia.

Anexo F. Matriz de comparación entre criterios y verificación de consistencia.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Vector Prioridad
C1	1	3	8	3	6	3	0,381877837
C2	1/3	1	6	1/3	5	1/4	0,129694498
C3	1/8	1/6	1	1/5	1/2	1/6	0,031689891
C4	1/3	3	5	1	5	0,5	0,177633796
C5	1/6	1/5	2	1/5	1	1/4	0,047725475
C6	1/3	4	6	2	4	1	0,231378503
Suma	2,291667	11,36667	28	6,733333	21,5	5,166667	

MATRIZ	λ_{max}	NUMERO DE CRITERIOS	MAX CR TEORICO	CI	CR
CRITERIOS	6,507472544	6	10%	0,101495	8,19%

Fuente: Elaboración propia.

Anexo G. Vectores prioridad a partir de escala natural

	% AHORRO (mensual)
A1	0,00%
A2	34,28%
A3	40,61%
A4	33,80%
A5	10,16%
A6	-17,19%
Suma	102%

Vector prioridad
0
0,33720244
0,39946882
0,33248082
0,09994098
-0,16909306

	DISTANCIA TOTAL RECORRIDA (m)	Reciproco
A1	20.450,95	4,88975E-05
A2	13.441,21	7,43981E-05
A3	12.145,63	8,23341E-05
A4	13.537,82	7,38671E-05
A5	18.372,57	5,4429E-05
A6	23.965,99	4,17258E-05
Suma	101.914,17	0,000375652

Vector prioridad
0,13016712
0,19805071
0,21917687
0,19663736
0,14489215
0,11107579

	% UTILIZACIÓN DEL ESPACIO ASIGNADO
A1	73,53%
A2	67,93%
A3	67,93%
A4	65,44%
A5	67,49%
A6	67,93%
Suma	410,25%

Vector prioridad
0,17923218
0,16558196
0,16558196
0,15951249
0,16450945
0,16558196

Fuente: Elaboración propia.

Anexo H. Vectores prioridad a partir de técnicas de normalización

CRITERIO	No. de cambios	Vector de prioridad con cálculo de z	Vector prioridad con euler
A1	0	0,415348318	0,9995784
A2	9	0,12340318	0,00012336
A3	10	0,114463665	4,5381E-05
A4	12	0,099978478	6,1416E-06
A5	9	0,12340318	0,00012336
A6	9	0,12340318	0,00012336

	COSTO DE ADECUACIÓN	Vector prioridad con cálculo de z	Vector prioridad con euler
A1	\$ -	0,398713862	1,0
A2	\$ 1.649.386,51	0,107606638	0,0
A3	\$ 1.776.674,01	0,102139379	0,0
A4	\$ 1.551.858,51	0,113190076	0,0
A5	\$ 904.993,18	0,160502291	0,0
A6	\$ 1.442.199,01	0,117847755	0,0

Fuente: Elaboración propia.