



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

MAESTRÍA EN SISTEMAS DE TRANSPORTE

DISEÑO DE RUTAS DE RECOLECCIÓN EN CIUDAD UNIVERSITARIA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

CARLOS ADRIÁN ENRÍQUEZ SANTILLÁN

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ANGÉLICA DEL ROCÍO LOZANO CUEVAS

JURADO ASIGNADO:

**Presidente:** Dr. Dartois Giraldo Laurent Yves G.  
**Secretario:** Dra. Elizondo Cortés Mayra  
**Vocal:** Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas  
**1er. Suplente:** M.I. Rivera Colmenero José Antonio  
**2do. Suplente:** M.I. Guzman Castro Luis Alejandro

**Lugar donde se realizó la tesis:**

Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales (LTST) del Instituto de Ingeniería  
UNAM

TUTORA DE TESIS:

**Dra. Angélica del Rocío Lozano Cuevas**

-----  
FIRMA

# Contenido

Índice de Figuras .....	iii
Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	2
1.2 Objetivo .....	3
1.3 Justificación .....	3
Capítulo 2. Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en Ciudad Universitaria, UNAM.....	4
2.1 Gestión y tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos .....	4
2.2 Tipos de Residuos.....	6
2.3 Descripción de la recolección de los RSU.....	7
2.3.1 Centros de Transferencia .....	9
2.3.2 Plantas de separación y reciclaje .....	9
2.4 El Manejo de los RSU en México .....	11
2.5 El Sistema de Recolección en Ciudad Universitaria .....	14
Capítulo 3. Sistema de Recolección de Residuos en Ciudad Universitaria.....	22
3.1 Descripción de las Rutas de Recolección de Ciudad Universitaria.....	22
3.2 Ruta Deportiva .....	23
3.3 Ruta del Campus Central.....	28
3.4 Ruta del Circuito Exterior .....	33
3.5 Ruta de los Institutos.....	38
3.6 Ruta de la Tarde .....	42
3.7 Ruta de la Basura Orgánica .....	46
Capítulo 4. El Problema de Rutas de Vehículos.....	54
4.1 Los puentes de Königsberg y la Teoría de Grafos .....	54
4.1.1 Grafos .....	56
4.1.2 Circuitos Eulerianos.....	58
4.1.3 Caminos Hamiltonianos .....	58
4.2 El Problema del Agente Viajero.....	59
4.3 El Problema de Rutas de Vehículos.....	63
4.3.1 Problema de Rutas de Vehículos con Restricciones de Capacidad .....	66
4.3.2 El Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo .....	69
4.3.3 El Problema de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección.....	71

4.4	VRP con aplicaciones en recolección de Residuos Sólidos Urbanos .....	75
4.5	Técnicas de solución.....	75
4.6	Solución del Problema de Recolección de Basura en CU .....	78
4.6.1	Restricciones de duración de la ruta .....	78
4.6.2	Demanda y tiempo de servicio en los puntos de recolección.....	80
4.6.3	Construcción de la base de datos.....	87
4.6.4	Solución del Problema de Recolección de Basura en TransCAD .....	90
Capítulo 5.	Mejoras al Sistema de Recolección de Residuos Sólidos en Ciudad Universitaria ...	94
5.1	Solución inicial al problema de Recolección de Residuos .....	94
5.1.1	Rutas Matutinas .....	95
5.1.2	Rutas Vespertinas.....	105
5.1.3	Resumen de la solución inicial (mañana y tarde).....	111
5.1.4	Inconvenientes de las soluciones iniciales de la mañana y tarde .....	112
5.2	Solución para los grupos de puntos actuales .....	114
5.2.1	Rutas de la mañana de basura inorgánica .....	118
5.2.1.1	Ruta Deportiva .....	118
5.2.1.2	Ruta Campus Central.....	125
5.2.1.3	Ruta del Circuito Exterior .....	128
5.2.1.4	Ruta de los Institutos.....	131
5.2.2	Ruta de la basura orgánica por la mañana.....	136
5.2.3	Rutas de la tarde de basura inorgánica.....	141
5.2.3.1	Ruta del Campus Central por la tarde .....	141
5.2.3.2	Ruta de la Tarde .....	143
5.2.4	Ruta de la basura orgánica por la tarde .....	146
5.2.5	Resumen de la solución y comparación con la situación actual (mañana y tarde)	149
5.2.6	Inconvenientes de esta solución (mañana y tarde) .....	150
5.2.7	Escenarios de mejoramiento del recorrido de la Ruta Deportiva.....	150
5.2.7.1	Ruta Deportiva. Escenario 1 .....	151
5.2.7.2	Ruta Deportiva. Escenario 2 .....	159
5.2.7.3	Ruta Deportiva. Escenario 3 .....	165
5.2.7.4	Resumen de las soluciones para grupos de puntos de la ruta Deportiva, y comparación con la situación actual.....	168
5.2.7.5	Ruta del Circuito Exterior. Escenario 1 .....	169

5.3 Comparación general de las rutas actuales con las nuevas en sus mejores escenarios.	175
Conclusiones .....	178
Referencias.....	181

## Índice de Figuras

FIGURA 1.1. RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RSU. ....	10
FIGURA 1.2. DELEGACIONES CON MAYOR RECOLECCIÓN DE RSU. ....	12
FIGURA 1.3. PLANTA INCINERADORA DE EN NORUEGA. ....	13
FIGURA 1.4. MAPA DE CIUDAD UNIVERSITARIA.....	14
FIGURA 1.5. CAMIÓN RECOLECTOR DE RESIDUOS INORGÁNICOS.....	17
FIGURA 1.6. CAMIÓN RECOLECTOR DE RESIDUOS ORGÁNICOS.....	18
FIGURA 1.7. DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS GENERADOS DENTRO DE CU .....	19
FIGURA 1.8. BARREDORA MECÁNICA .....	20
FIGURA 1.9. TALLERES DE LA ZONA CULTURAL.....	20
FIGURA 2.1. CAMIÓN RECOLECTOR DE LA RUTA DEPORTIVA .....	24
FIGURA 2.2. BASURA DEPOSITADA EN EL SUELO DENTRO DE “LA BARREDORA” .....	26
FIGURA 2.3. RECOLECCIÓN DE LA BASURA MEDIANTE UN CONTENEDOR.....	26
FIGURA 2.4. DEVOLUCIÓN DEL CONTENEDOR A SU LUGAR ORIGINAL .....	27
FIGURA 2.5. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA EN LOS TALLERES DE ZOQUIPA .....	27
FIGURA 2.6. GRAN ACUMULACIÓN DE BASURA DURANTE EL RECORRIDO.....	28
FIGURA 2.7. AUTOMÓVILES ESTACIONADOS EN LUGARES NO PERMITIDOS. ....	29
FIGURA 2.8. ESTACIONAMIENTOS LLENOS EN CIUDAD UNIVERSITARIA.....	29
FIGURA 2.9. RECORRIDO DE LA RUTA CAMPUS CENTRAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	30
FIGURA 2.10. BASURA REVUELTA EN LA FACULTAD DE ODONTOLOGÍA.....	31
FIGURA 2.11. ENORMES CANTIDADES DE BASURA ACUMULADA EN FFYL.....	31
FIGURA 2.12. INSTRUMENTAL MÉDICO REVUELTO ENTRE LA BASURA INORGÁNICA EN EL ANFITEATRO. ....	32
FIGURA 2.13. RECORRIDO DE LA RUTA CAMPUS CENTRAL.....	33
FIGURA 2.14. ESTACIONAMIENTO VACÍO EN LA FACULTA DE CONTADURÍA.....	33
FIGURA 2.15. ESTACIONAMIENTO LLENO EN LA ESCUELA NACIONAL DE TRABAJO SOCIAL. ....	34
FIGURA 2.16. RESIDUOS REVUELTOS EN LA DGSM .....	34
FIGURA 2.17. BASURA FUERA DE LOS CONTENEDORES.....	35
FIGURA 2.18. RESIDUOS INORGÁNICOS MEZCLADOS CON DESECHOS DE CONSTRUCCIÓN. ....	36
FIGURA 2.19. RECOLECCIÓN EN LA DICYG. ....	36
FIGURA 2.20. RECORRIDO DE LA RUTA CIRCUITO EXTERIOR.....	37
FIGURA 2.21. ZONA CONTROLADA PARA EL DEPÓSITO Y SEPARACIÓN DE RESIDUOS EN LA FMVZ. ....	38
FIGURA 2.22. CONTENEDORES EN DIFERENTES COLORES PARA CADA TIPO DE RESIDUO EN LA FMVZ.....	38
FIGURA 2.23. BASURA FUERA DE LOS CONTENEDORES EN EL INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR.....	39
FIGURA 2.24. ACCESO CONTROLADO A LOS CONTENEDORES EN EL INSTITUTO DE FÍSICA. ....	40
FIGURA 2.25. LUGARES QUE VISITA LA RUTA DE LOS INSTITUTOS.....	41
FIGURA 2.26. ENTRADA AL INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES. ....	41
FIGURA 2.27. BASURA REVUELTA EN LOS CONTENEDORES DE LA ALBERCA OLÍMPICA DE CU .....	42
FIGURA 2.28. ENORMES CANTIDADES DE BASURA EN LA FCA .....	43
FIGURA 2.29. BASURA NO DEPOSITADA DENTRO DE LOS CONTENEDORES DEBIDO A LAS ACTIVIDADES DE PEPENA. FCA .....	43
FIGURA 2.30. BASURA FUERA DE LOS CONTENEDORES EN LA FCPYS .....	44

FIGURA 2.31. LUGARES QUE VISITA LA RUTA DE LA TARDE. ....	45
FIGURA 2.32. BASURA ORGÁNICA EXTERNA MAL SEPARADA EN LA ESCUELA NACIONAL DE TRABAJO SOCIAL. ....	46
FIGURA 2.33. BASURA ORGÁNICA DEPOSITADA EN EL SUELO Y NO EN SU RESPECTIVO CONTENEDOR EN EL ANEXO DE INGENIERÍA. ....	47
FIGURA 2.34. CAMIÓN RECOLECTOR DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS. ....	47
FIGURA 2.35. RESTOS DE ANIMALES DE LABORATORIO REVUELTOS CON RESIDUOS ORGÁNICOS. ....	48
FIGURA 2.36. RESIDUOS QUÍMICOS QUE NO SON MANEJADOS CORRECTAMENTE Y DEPOSITADOS EN CONTENEDORES ESPECIALES EN EL CONJUNTO E DEL INSTITUTO DE QUÍMICA. ....	49
FIGURA 2.37. RECORRIDO DE LA RUTA DE LA BASURA ORGÁNICA POR LA MAÑANA. ....	51
FIGURA 2.38. RECORRIDO DE LA RUTA DE LA BASURA ORGÁNICA POR LA TARDE. ....	53
FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE LA CIUDAD DE KÖNINGSBERG POR EULER. ....	55
FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE PUNTOS HECHO POR EULER. ....	55
FIGURA 3.3. GRAFO DE LOS PUENTES DE KÖNINGSBERG ....	56
FIGURA 3.4. EJEMPLOS DE GRAFOS ....	57
FIGURA 3.5. CICLO HAMILTONIANO ....	58
FIGURA 3.6. EJEMPLO DE LA SOLUCIÓN A UN PROBLEMA. ....	64
FIGURA 3.7. TÉCNICAS PARA RESOLVER PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA. ....	77
FIGURA 3.8 VIALIDADES Y PUNTOS DE RECOLECCIÓN DENTRO DE CIUDAD UNIVERSITARIA. ....	89
FIGURA 3.9. OPCIÓN DE ROUTING/LOGISTICS EN TRANSCAD. ....	90
FIGURA 3.10. MÓDULO PARA RESOLVER EL VRPTW EN TRANSCAD. ....	91
FIGURA 3.11. PESTAÑA DEPOT DENTRO DEL MÓDULO PARA RESOLVER EL VRPTW EN TRANSCAD ....	91
FIGURA 3.12. PESTAÑA STOP DENTRO DEL MÓDULO PARA RESOLVER EL VRPTW EN TRANSCAD. ....	92
FIGURA 3.13. PESTAÑA MATRIX DENTRO DEL MÓDULO PARA RESOLVER EL VRPTW EN TRANSCAD ....	92
FIGURA 3.14. PESTAÑA <i>VEHICLE</i> DENTRO DEL MÓDULO PARA RESOLVER EL VRPTW EN TRANSCAD ....	93
FIGURA 3.15. OUTPUT FILE SETTINGS EN TRANSCAD. ....	93
FIGURA 4.1. SOLUCIÓN INICIAL PARA LAS RUTAS DE LA MAÑANA. ....	96
FIGURA 4.2. ZONA NORTE DE LA UNIVERSIDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	97
FIGURA 4.3. RECORRIDOS EN LA PARTE CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD EN LA SOLUCIÓN INICIAL. ....	98
FIGURA 4.4. ACERCAMIENTO A LA ZONA DEL JARDÍN BOTÁNICO. ....	98
FIGURA 4.5. ACERCAMIENTO A LA ZONA CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD PARA LAS RUTAS DE LA MAÑANA. ....	99
FIGURA 4.6. CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TLALPAN. ....	100
FIGURA 4.7. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA. ....	106
FIGURA 4.8. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA ....	107
FIGURA 4.9. RECOLECCIÓN EN TRES DE LOS PUNTOS DE MAYOR DEMANDA. ....	108
FIGURA 4.10. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA. ....	110
FIGURA 4.11. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA. ....	110
FIGURA 4.12. PUNTOS QUE VISITAN LOS RECORRIDOS DE LA MAÑANA. ....	116
FIGURA 4.13. PUNTOS QUE VISITAN LOS RECORRIDOS DE LA TARDE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	117
FIGURA 4.14. RECORRIDO DE LA NUEVA RUTA DEPORTIVA. ....	119
FIGURA 4.15. RECORRIDO NORTE DE LA NUEVA RUTA DEPORTIVA. ....	122
FIGURA 4.16. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	122
FIGURA 4.17. RECORRIDO POR EL JARDÍN BOTÁNICO DE LA NUEVA RUTA DEPORTIVA. ....	123
FIGURA 4.18. RECORRIDO HACIA LOS TALLERES DE ZOQUIPA DE LA NUEVA RUTA DEPORTIVA. ....	123
FIGURA 4.19. RECORRIDO DE LA NUEVA RUTA DEPORTIVA. ....	124
FIGURA 4.20. RECORRIDO DE LA RUTA CAMPUS CENTRAL ....	125
FIGURA 4.21. RECORRIDO DE LA RUTA DEL CIRCUITO EXTERIOR. ....	128
FIGURA 4.22. RECORRIDO DE LA RUTA DE LOS INSTITUTOS. ....	131
FIGURA 4.23. RECORRIDO DE LA RUTA DE LOS INSTITUTOS. ....	132

FIGURA 4.24. RECORRIDO DE LA RUTA DE LOS INSTITUTOS CERCA DE LA ZONA DEL CCU.....	132
FIGURA 4.25. RECORRIDO DE LA RUTA DE LA BASURA ORGÁNICA. ....	136
FIGURA 4.26. RECORRIDO DE LA RUTA DE LA BASURA ORGÁNICA POR LA PARTE CENTRAL DE CIUDAD UNIVERSITARIA. .....	137
FIGURA 4.27. RECORRIDO DE LA RUTA DE LA BASURA ORGÁNICA EN LA PARTE DEL CIRCUITO EXTERIOR.....	139
FIGURA 4.28. RECORRIDO DE LA RUTA DE LA BASURA ORGÁNICA EN EL CIRCUITO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA....	139
FIGURA 4.29. RECORRIDO DE LA RUTA DE LA BASURA ORGÁNICA PASANDO POR CIENCIAS POLÍTICAS. ....	140
FIGURA 4.30. RECORRIDO DE LA RUTA DE LA BASURA ORGÁNICA POR CU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	140
FIGURA 4.31. RECORRIDO DE LA RUTA CAMPUS CENTRAL.....	141
FIGURA 4.32. RECORRIDO DE LA RUTA DE LA TARDE. ....	144
FIGURA 4.33. RECORRIDO DE LA RUTA ORGÁNICA. ....	146
FIGURA 4.34. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA. ESCENARIO 1.....	151
FIGURA 4.35. RUTA DEPORTIVA. ESCENARIO 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. ....	153
FIGURA 4.36. RECORRIDO POR LA ZONA DE CAMPOS PUMITAS. ....	154
FIGURA 4.37. RECORRIDO DENTRO DEL JARDÍN BOTÁNICO.....	155
FIGURA 4.38. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA POR EL EJE 10 SUR. ....	156
FIGURA 4.39. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA.....	160
FIGURA 4.40. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA EN LA ZONA DE CAMPOS DEPORTIVOS. ....	162
FIGURA 4.41. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA EN EL JARDÍN BOTÁNICO. ....	163
FIGURA 4.42. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA EN ZOQUIPA. ....	164
FIGURA 4.43. RECORRIDO DE LA RUTA DEPORTIVA EN EL JARDÍN BOTÁNICO. ....	164
FIGURA 4.44. PUNTOS ASIGNADOS AL RECORRIDO DEL CIRCUITO EXTERIOR. ....	166
FIGURA 4.45. PUNTOS ASIGNADOS AL RECORRIDO DEL CIRCUITO EXTERIOR. ....	167
FIGURA 4.46. RECORRIDO DE LA RUTA DEL CIRCUITO EXTERIOR. ....	170
FIGURA 4.47. RECORRIDO HASTA LOS TALLERES DE ZOQUIPA. ....	171
FIGURA 4.48. LLEGADA DEL RECORRIDO AL CENTRO DE TRANSFERENCIA. ....	171

## Índice de Tablas

TABLA 2.1. PUNTOS QUE VISITA LA RUTA DEPORTIVA.....	24
TABLA 2.2. PUNTOS QUE VISITA LA RUTA DEL CAMPUS CENTRAL POR LA MAÑANA.....	30
TABLA 2.3. PUNTOS QUE VISITA LA RUTA DEL CAMPUS CENTRAL POR LA TARDE.....	32
TABLA 2.4.PUNTOS QUE VISITA LA RUTA DEL CIRCUITO EXTERIOR.....	37
TABLA 2.5. PUNTOS QUE VISITA LA RUTA DE LOS INSTITUTOS.....	40
TABLA 2.6. PUNTOS QUE FORMAN PARTE DEL RECORRIDO DE LA RUTA DE LA TARDE.....	44
TABLA 2.7. PUNTOS QUE VISITA EL RECORRIDO DE LA BASURA ORGÁNICA POR LA MAÑANA.....	50
TABLA 2.8. PUNTOS QUE VISITA LA RUTA DE LA BASURA ORGÁNICA POR LA TARDE.....	52
TABLA 3.1. VEHÍCULOS PARA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS EN CU.....	79
TABLA 3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTENEDORES DE BASURA DE CU. FUENTE: DGOYC UNAM.....	80
TABLA 3.3. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DEPORTIVA.....	82
TABLA 3.4. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA CAMPUS CENTRAL.....	83
TABLA 3.5. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA CIRCUITO EXTERIOR.....	84
TABLA 3.6. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DE LOS INSTITUTOS.....	85
TABLA 3.7. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DEL CAMPUS CENTRAL.....	86
TABLA 3.8. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DE LA TARDE.....	86
TABLA 3.9. TABLA DE LA RED VIAL.....	87
TABLA 3.10. TABLA CON LA INFORMACIÓN DEL DEPÓSITO.....	88
TABLA 3.11. TABLA DE STOPS.....	89
TABLA 4.1. VENTANAS DE TIEMPO UTILIZADAS EN LA SOLUCIÓN INICIAL PARA LOS RECORRIDOS MATUTINOS.....	95
TABLA 4.2. ITINERARIO DE LA RUTA NÚMERO UNO DE LA SOLUCIÓN INICIAL.....	101
TABLA 4.3. ITINERARIO DE LA RUTA NÚMERO DOS DE LA SOLUCIÓN INICIAL.....	102
TABLA 4.4. ITINERARIO DE LA RUTA NÚMERO TRES DE LA SOLUCIÓN INICIAL.....	103
TABLA 4.5. ITINERARIO DE LA RUTA NÚMERO CUATRO DE LA SOLUCIÓN INICIAL.....	104
TABLA 4.6. VENTANAS DE TIEMPO UTILIZADAS EN LA SOLUCIÓN GENERAL PARA LOS RECORRIDOS VESPERTINOS.....	105
TABLA 4.7. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DE LA TARDE.....	108
TABLA 4.8. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DE LA TARDE.....	109
TABLA 4.9. RESUMEN DE LOS CUATRO RECORRIDOS MATUTINOS DE LA SOLUCIÓN INICIAL.....	111
TABLA 4.10. RESUMEN DE LOS CUATRO RECORRIDOS VESPERTINOS DE LA SOLUCIÓN INICIAL.....	111
TABLA 4.11. RESUMEN DE LOS RECORRIDOS MATUTINOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	113
TABLA 4.12. RESUMEN DE LOS RECORRIDOS MATUTINOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	113
TABLA 4.13. NUEVO ORDEN DE RECOLECCIÓN DE LA RUTA DEPORTIVA.....	120
TABLA 4.14. CAMBIOS EN EL ORDEN DE RECOLECCIÓN DE LA RUTA DEPORTIVA.....	121
TABLA 4.15. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DEL CAMPUS CENTRAL.....	126
TABLA 4.16. CAMBIOS EN EL ORDEN DE RECOLECCIÓN EN LA RUTA DEL CAMPUS CENTRAL.....	127
TABLA 4.17. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DEL CIRCUITO EXTERIOR.....	129
TABLA 4.18. CAMBIOS EN EL ORDEN DE RECOLECCIÓN EN LA RUTA DEL CIRCUITO EXTERIOR.....	130
TABLA 4.19. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DE LOS INSTITUTOS.....	135
TABLA 4.20. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DE LOS INSTITUTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	134
TABLA 4.21. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA ORGÁNICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	138
TABLA 4.22. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DEL CAMPUS CENTRAL.....	142
TABLA 4.23. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DEL CAMPUS CENTRAL.....	143
TABLA 4.24. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DE LA TARDE.....	145



TABLA 4.25. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA DE LA TARDE.....	145
TABLA 4.26. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA ORGÁNICA. ....	147
TABLA 4.27. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DE LA RUTA ORGÁNICA. ....	148
TABLA 4.28. RESUMEN DE LOS RECORRIDOS MATUTINOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	149
TABLA 4.29. RESUMEN DE LOS RECORRIDOS VESPERTINOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	150
TABLA 4.30. TABLA DE <i>STOPS</i> DE LA RUTA DEPORTIVA.....	152
TABLA 4.31. ITINERARIO DEL ESCENARIO DOS DE LA RUTA DEPORTIVA.....	157
TABLA 4.32. DATOS UTILIZADOS PARA EL ESCENARIO TRES DE LA RUTA DEPORTIVA.....	159
TABLA 4.33. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DEL TERCER ESCENARIO DE LA RUTA DEPORTIVA.....	161
TABLA 4.34. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DEL CUARTO ESCENARIO DE LA RUTA DEPORTIVA. ....	165
TABLA 4.35. RESUMEN DE LOS RECORRIDOS DE LA RUTA DEPORTIVA. ....	168
TABLA 4.36. PUNTOS ASIGNADOS AL RECORRIDO DEL CIRCUITO EXTERIOR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	169
TABLA 4.37. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DEL SEGUNDO ESCENARIO DE LA RUTA DEPORTIVA....	172
TABLA 4.38. TIEMPOS DE SERVICIO Y DEMANDA POR PUNTO DEL ESCENARIO DEL CIRCUITO EXTERIOR.....	173
TABLA 4.39. COMPARACIÓN DE DISTANCIA Y TIEMPO TOTAL DE RECORRIDO DE LA RUTA DEL CIRCUITO EXTERIOR... 174	
TABLA 4.40. COMPARACIÓN DE DISTANCIA Y TIEMPO TOTAL DE RECORRIDO DE LA RUTA DEL CIRCUITO EXTERIOR DE LA MAÑANA.....	174
TABLA 4.41. COMPARACIÓN DE DISTANCIA Y TIEMPO TOTAL DE RECORRIDO DE LA SOLUCIÓN INICIAL CONTRA LA SITUACIÓN ACTUAL.....	175
TABLA 4.42. COMPARACIÓN DE DISTANCIAS Y TIEMPOS TOTALES DE RECORRIDO ENTRE LA SITUACIÓN ACTUAL Y EL MEJOR ESCENARIO. ....	176
TABLA 4.43. COMPARACIÓN DE DISTANCIA Y TIEMPO TOTAL DE RECORRIDO DE LA RUTA DEL CIRCUITO EXTERIOR DE LA MAÑANA.....	177
TABLA 4.44. COMPARACIÓN DE DISTANCIA Y TIEMPO TOTAL DE RECORRIDO DE LA RUTA DEL CIRCUITO EXTERIOR DE LA MAÑANA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	177

## Introducción

Uno de los principales problemas al que la sociedad se enfrenta es a la alta generación de residuos sólidos, mejor conocidos como *basura*; estos residuos sólidos son el resultado de la actividad humana y se generan en todos los sitios en los que existen asentamientos humanos, en una proporción estrechamente relacionada con el número de habitantes, con su capacidad de producir y usar bienes de consumo y con su modo de vida.

En este sentido, la presente investigación ofrece al lector una visión global de la problemática que se presenta actualmente en el proceso de recolección de residuos sólidos que se generan dentro de Ciudad Universitaria, UNAM.

El problema se enfoca únicamente en la parte de las rutas y se buscó reducir el tiempo y distancia de los recorridos actuales, para lograrlo se utilizó el software TransCAD y el modelo de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección que trae incorporado.

La presente tesis se desarrolla de la siguiente manera: objetivo el presente trabajo escrito se desarrolló de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se describe un panorama general del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos, una clasificación de los tipos de residuos así como la gestión que a éstos se les da; una descripción de la recolección y disposición final y el manejo que en México se les da, así como una breve descripción del manejo de residuos en otros países para finalmente introducir el tema del siguiente capítulo sobre el sistema de recolección en Ciudad Universitaria.

El sistema de recolección en Ciudad Universitaria se describe en el capítulo dos, en le está toda la información correspondiente a los ocho recorridos actuales, cada uno con una lista de los puntos que visita e imágenes para mostrar las problemáticas que se encontraron en los puntos durante el trabajo de campo.

En el capítulo tres comienza con una breve reseña histórica de cómo Euler formuló el problema de los puentes de Königsberg y dio origen a la Teoría de Grafos. También se describe el problema del Agente Viajero y el Problema de Rutas de Vehículos con algunas de sus variantes, con ventanas de tiempo, restricciones de capacidad y el de distribución y recolección cada uno con sus respectivas formulaciones matemáticas. El proceso de cómo se creó la base de datos a partir de la información recolectada en campo también se describe en este capítulo así como los pasos a seguir dentro de TransCAD para resolver el Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo.

En el capítulo cuatro se describen las soluciones que se generaron para los recorridos matutinos y vespertinos comenzando con una solución inicial para todos los puntos; después la solución para grupos de puntos que forman parte, actualmente, de los recorridos y con estos resultados se hizo la comparación con el estado actual.

Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas de todo este trabajo de investigación así como las referencias consultadas.

### **a) Descripción del problema**

Todos los días cinco camiones se encargan de realizar la recolección de residuos sólidos en Ciudad Universitaria, para esta labor la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC) a través de los Talleres de Conservación de la UNAM tiene establecidas ocho rutas que atienden un total de 96 puntos distribuidos por todo el campus universitario. La problemática que se presenta en cada uno de estos puntos, de acuerdo al personal encargado de la recolección, son: la mala separación, residuos domiciliarios, falta de contenedores para los residuos orgánicos, actividades de pepena que provocan que los residuos estén fuera de los contenedores, recorridos desbalanceados en tiempo y en distancia, camiones con más de 15 años de antigüedad, puntos que deben ser atendidos de manera prioritaria ya que las ventanas de tiempo para éstos se deben respetar para evitar conflictos dentro de los estacionamientos en donde se encuentran los contenedores, retrasos por parte de la gente que se encarga de darles acceso hacia los puntos de recolección.

Otro problema es que los Jefes de Talleres no cuentan con información actualizada sobre el sistema de recolección, solo tienen un estudio realizado por el PUMA (2006) en el cual se describe una ruta que no corresponde con ninguna de las actuales.

## **b) Objetivo**

Analizar la situación actual de las rutas y proponer un nuevo orden de recolección tomando como base el modelo de Rutas de Vehículos (Vehicle Routing Problem VRP, por sus siglas en inglés) con la finalidad de reducir el tiempo y la distancia de recorrido, así como proporcionar la información obtenida durante el trabajo de campo y las soluciones obtenidas durante el desarrollo de este trabajo de investigación a los Jefes de Talleres.

## **c) Justificación**

El personal de recolección está consciente de que la parte que corresponde a la separación está fuera de su alcance ya que se han mandado cartas a los directivos de las Facultades para que tomen medidas que permitan realizar una adecuada separación de los residuos pero no han tenido respuestas favorables. En este estudio no se busca proponer una solución al problema de separación ya que existen diversos estudios que se abordan ese tema.

Es por eso que tomando en cuenta los problemas descritos anteriormente, esta tesis se enfocó únicamente en reducir el tiempo y la distancia de recorrido actual de cada ruta ya que el personal de recolección considera que su trabajo se puede realizar en menor tiempo y con una mejor organización.

Como se describió anteriormente, el problema se planteó como un Problema de Rutas de Vehículos y para resolverlo se utilizó TransCAD ya que el programa cuenta con un módulo que se encarga de resolver problemas de ruteo de vehículos. A pesar de que se desconoce totalmente el algoritmo o la técnica que emplea el programa para resolver problemas de ruteo, los resultados que se obtuvieron, en la solución por grupos de puntos, representan de manera adecuada la realidad en la que opera el sistema.

## **Capítulo 1. Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en Ciudad Universitaria, UNAM**

En este primer capítulo se hace una descripción de los problemas de recolección de basura, la gestión, el manejo, disposición final y la forma en que se los residuos se clasifican. Los problemas presentes en México en el manejo de residuos sólidos así como en varios países de Europa se describen al inicio del capítulo. El sistema de recolección en Ciudad Universitaria se describe al final del capítulo y se mencionan cuáles son las dependencias encargadas de la recolección de residuos sólidos dentro de la Universidad.

### **1.1 Gestión y tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos en México y en el Mundo**

La Gestión de los Residuo Sólidos Urbanos (RSU) comprende las etapas de manejo generación, disposición inicial, recolección, barrido y aseo urbano, tratamiento, transferencia transporte y disposición final (OPDS, 2010).

El Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible OPDS (2010) propone, para una adecuada gestión de los RSU, se considere

*...la segregación domiciliaria y la recolección diferenciada, como modo de mejorar la calidad y cantidad de los residuos utilizados en los procesos de aprovechamiento, reutilización y reciclado, y como forma de proporcionar la especificidad que necesitan los desechos sujetos a los distintos procesos de tratamiento....*

Lo descrito anteriormente corresponde a las etapas del "ciclo de los residuos" y forma parte de lo que se conoce como "componentes técnico-operativos" de la gestión de Residuos Sólidos Urbanos (OPDS, 2010).

La gestión incluye funciones gerenciales, administrativas y organizacionales, como también consideraciones legales, referentes al desarrollo y cumplimiento de normas específicas, y de coordinación por parte de las instituciones involucradas.

En la Universidad Nacional Autónoma de México, la gestión y el manejo de los Residuos Sólidos que en ella se generan está a cargo de la Dirección General de Obras y Conservación la cual se encarga de la conservación y rehabilitación de los bienes inmuebles; del mantenimiento de vialidades y estacionamientos; del reacondicionamiento de áreas exteriores, como plazas, andadores, zonas deportivas y jardines. Por lo tanto, la tarea de esta Dirección consiste en crear las condiciones materiales para el desarrollo de las funciones sustantivas de la Universidad Nacional Autónoma de México (de Pablo, 2008).

El manejo de los RSU, de acuerdo con la Coordinación General de Ecología de Tlaxcala (CGE,-2010)

*...consiste solamente en la recolección, transporte y disposición final de los residuos. Dentro del manejo no se incluyen la valorización y el aprovechamiento de los residuos. El manejo de los RSU no cumple, la mayoría de las veces, con las medidas sanitarias y de protección ambiental establecidas para la disposición final de los residuos, lo que puede provocar daños a la salud y al medio ambiente.*

En este punto es importante precisar la diferencia que existe en algunos términos que comúnmente se manejan en este tema: *residuo* y *basura* así como entre *segregación* y *separación*. De acuerdo con Orta, et al. (2009), *los residuos* son los desechos que generamos durante nuestras actividades diarias a partir del uso o consumo de diversos productos, mientras que el término *basura*, es la mezcla de todos esos residuos en un mismo lugar.

En el Programa Municipal de Reciclaje 2008-2010, citado por Orta, et al. (2009) se define a la *segregación* como la acción de separar los diferentes tipos de residuos en el momento de la generación para que éstos no se mezclen y se conviertan en *basura*, es una actividad que se realiza en los domicilios. Por otra parte, el término *separación*, se utiliza para referirse a aquella actividad o proceso que tiene por objeto separar los residuos sólidos mezclados y que se encuentran formando parte de la *basura*.

## 1.2 Tipos de Residuos

Se consideran residuos urbanos o municipales aquellos residuos generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas administrativas e instituciones educativas, así como todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades (Gallardo, 2012).

De acuerdo con Gálvez (2003) los residuos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Basura doméstica.** Básicamente debe ser recogida por los servicios de recolección pública.
- **Basura de pequeños establecimientos comerciales o industriales.** Usualmente se retira junto con la basura doméstica.
- **Basura de grandes establecimientos comerciales.** Puede ser recogida por los servicios de limpieza pública, recomendándose el uso de contenedores de gran volumen, pero igualmente pueden encargarse de hacerlo los mismos establecimientos o recurrir a empresas privadas
- **Residuos de grandes industrias.** Cuando no son tóxicos pueden ser retirados por los servicios de limpieza pública, por quienes los producen o por empresas privadas. Cuando son tóxicos, tienen que recogerse con las debidas precauciones y disponer de ellos en forma especial, por lo que es recomendable que su manejo se entregue a la propia industria o a empresas especializadas con control municipal. Una sana política es que se responsabilice de este tipo de residuos a quienes los producen.
- **Animales muertos.** Deben ser recogidos con vehículos pequeños, a menos que ese día haya servicio de recolección de basura doméstica.
- **Residuos hospitalarios.** Su recolección y disposición final requieren de precauciones especiales, exigiéndose a menudo que se incineren, por lo que en general su manejo debe quedar a cargo de los propios hospitales, clínicas o laboratorios. No deben incluirse dentro de los servicios de recolección

pública ordinaria pues constituyen un riesgo grave para las personas encargadas la recolección.

- **Hojarasca.** Las hojas, ramas pequeñas, arbustos y césped pueden o no ser retirados por los servicios de limpieza pública, tanto si provienen de jardines privados como de parques o plazas, pero los troncos de árboles, ramas grandes o piedras no pueden recogerse con los camiones compactadores pues dañarían el sistema de prensado. Para este último caso hay que destinar camiones no compactadores, pudiendo los servicios de limpieza establecer una atención especial, o bien encargar el retiro de estos residuos a empresas privadas.
- **Escombros y residuos provenientes de trabajos de demolición o de construcción.** Su retiro corresponde a las empresas que los producen. Pequeñas cantidades pueden incluirse junto con la recolección de residuos electrónicos.

### **1.3 Descripción de la recolección de los RSU**

La recolección de residuos sólidos puede dividirse en tres grandes tipos: domiciliaria, comercial e industrial (Golden, 2002). En la recolección domiciliaria un mismo camión puede atender, en una misma ruta, varias casas al día. La frecuencia del servicio varía según el lugar, aunque en general las rutas suelen repetirse una vez diariamente. La recolección comercial consiste en atender centros comerciales, restaurantes y grandes edificios. Cada ruta comercial puede atender entre 60 y 400 clientes, con dos o tres visitas al depósito al día. Cada cliente puede tener una ventana de tiempo definida para ser visitado. La recolección industrial consiste en atender fábricas, obras y edificios en construcción. La principal diferencia con la recolección comercial es que los contenedores a ser vaciados suelen ser cuatro o cinco veces más grandes, y en muchos casos un contenedor puede ser atendido solo una vez, lo que convierte al problema en uno muy diferente al de la recolección comercial. Kim (2006) proporciona mayor información sobre el problema de rutas de vehículos con aplicación en la recolección de residuos sólidos.



Existen dos aspectos que definen la recolección de los residuos: el modelo y el sistema de recolección.

Existen dos modelos de recolección (Bonmatí, 2008):

- **Recolección en masa.** En la recolección en masa, los residuos se recogen revueltos, sin que exista una separación y normalmente tampoco una selección posterior. Cuando la recolección de residuos no alcanza a cubrir a toda la población, los residuos que no se recolectan son depositados sin ningún tipo de control en lugares inapropiados como los cauces de los ríos o zonas baldías o son quemados al aire libre. Cabe mencionar que, en estos casos, existe un reciclaje informal de gran parte de los residuos (latas, plásticos, etc.) ya sea en el lugar de origen o en el propio tiradero, de una manera no regulada y con riesgos a la salud para las personas que lo realizan.
- **Recolección selectiva.** La recolección selectiva se refiere a separar materiales reciclables de los que no lo son, por ejemplo se separa vidrio, papel, cartón, latas y envases de plástico de residuos los residuos orgánicos.

Sistemas de recolección. Existen básicamente dos sistemas de recolección: contenedores en la calle y recolección domiciliar o puerta a puerta (Bonmatí, 2008).

- **Contenedores.** Los contenedores son colocados en las calles, de tal manera que la población lleve los residuos que generan hasta los puntos donde se encuentran los contenedores. Existen contenedores únicos que es donde la basura se deposita sin ser previamente separada hasta diferentes contenedores con capacidad suficiente para almacenar vidrio, papel, cartón latas de aluminio, PET y residuos orgánicos. El uso de contenedores ha sido adoptado para grandes ciudades, ya que permite un ordenamiento del sistema de recolección y reduce riesgos a la salud a los que la población está expuesta. Un inconveniente de utilizar contenedores son las quejas de las personas que viven cerca de los puntos de recolección debido a la presencia de fauna nociva (perros, gatos, ratas) o a los malos olores, entre otras.

- **Recolección domiciliar o puerta a puerta.** En este tipo de recolección cada domicilio tiene un contenedor que debe ser colocado en el exterior de la vivienda momentos antes de su recolección. En función de las zonas que se recorren dentro de algún municipio, cada día de la semana se recolecta un determinado tipo de residuos. Este modelo de recolección requiere una mayor participación por parte de la población; los índices de recuperación de materiales para reciclaje son mucho más altos.

Es importante elegir unidades de recolección que se adapten a las características de los residuos a recolectar (capacidad del vehículo, tipo de camión, etc.). Otros aspectos a considerar son la frecuencia de recolección, horarios tanto matutinos como vespertinos e incluso nocturnos, topografía urbana, tráfico para poder determinar la velocidad del vehículo, recorridos que inicien y terminen en el depósito, etc. (Bonmatí, 2008).

### 1.3.1 Centros de Transferencia

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010), las estaciones de transferencia son instalaciones donde se trasvasan o transfieren los residuos sólidos de las unidades de recolección a vehículos de mayor capacidad, para su traslado a las instalaciones de tratamiento o a los sitios de disposición final.

Las estaciones de transferencia se clasifican en:

- Estaciones de transferencia de descarga directa en vehículos de mayor capacidad utilizando la gravedad.
- Estaciones de transferencia de descarga directa utilizando sistemas de compactación para introducir los residuos en vehículos de mayor capacidad.
- Estaciones de transferencia donde se almacenan los residuos para luego ser trasvasados en vehículos de mayor capacidad.

### 1.3.2 Plantas de separación y reciclaje

la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010) define a una planta de separación o de reciclaje como una instalación donde se recuperan, clasifican, separan o segregan los materiales o subproductos reciclables de los residuos sólidos

urbanos o de manejo especial que ingresan a la instalación, para su valorización o utilización como materia prima en los procesos productivos.

Las plantas de separación o reciclaje, se clasifican en:

- Plantas que reciben y procesan residuos crudos o mezclados, o que contienen un porcentaje significativo de residuos orgánicos, y
- Plantas que reciben y procesan residuos potencialmente reciclables, separados previamente en la fuente de origen.

Para lograr una recuperación eficiente es indispensable llevar a cabo primero una adecuada segregación de los residuos sólidos que se generan, y para lograrlo es necesario promover la práctica de la segregación a través de programas educativos. Con ello se reducirán significativamente los volúmenes de generación de basura y por ende, las dificultades que representa la separación de los residuos sólidos y su disposición final (Orta, et al. 2009).

La figura 1.1 ilustra el proceso de selección dentro de las plantas de separación y reciclaje, desde el ingreso del vehículo recolector con los residuos sólidos hasta la disposición final de los mismos.

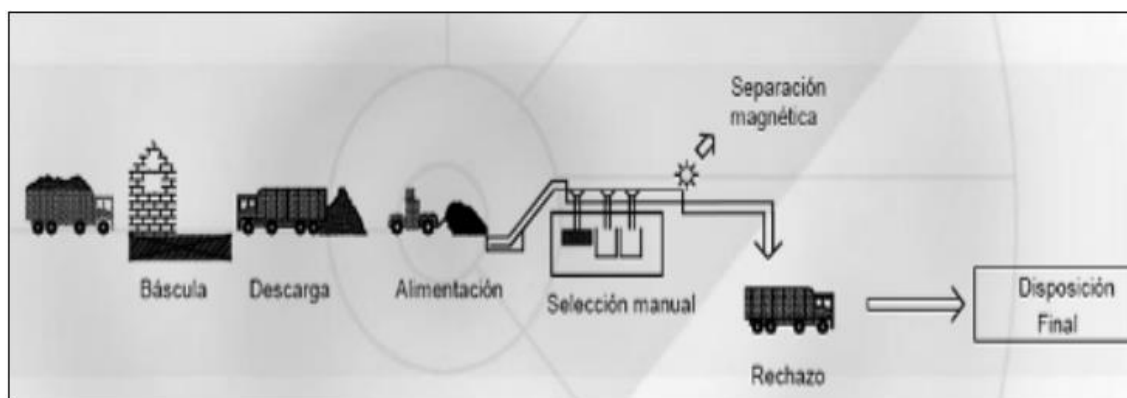


Figura 1.1. Recolección y disposición final de los RSU.

Fuente: Orta et al., 2009.

## **1.4 El Manejo de los RSU en México**

En México no existen tecnologías que permitan dar un adecuado tratamiento y disposición final a los RSU, por lo cual las autoridades municipales y dependencias responsables del manejo de los RSU buscan nuevas alternativas para lograrlo. La aplicación de las tecnologías existentes no es la más adecuada en todos los casos, ya que la eficacia del sistema y la eficiencia de su proceso, depende de ciertas características geográficas, sociales y económicas, además de las características en generación, composición y parámetros fisicoquímicos de los residuos sólidos que se generan en cierto municipio, región o lugar del mundo. Entre las tecnologías más ofertadas se encuentran la incineración, la gasificación y el plasma (Orta, et al. 2009).

En lugares donde existen grandes extensiones de territorio, baja densidad de población y bajo nivel de ingresos, predomina el uso de rellenos sanitarios también llamados métodos territorio-extensivos; mientras que en lugares con escaso territorio, alta densidad de población y alto nivel de ingresos, predomina la incineración o métodos territorio-intensivos (Orta, et al. 2009).

Con respecto a la disposición final, un número importante de empresas transnacionales y nacionales, ofrecen y tienen concesionados los servicios de construcción así como la operación de rellenos sanitarios. En este caso se ofrece la construcción de rellenos sanitarios con nuevas características constructivas y operativas, distintas al diseño convencional que se limita a cumplir con la Norma Oficial Mexicana, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos municipales. (NOM-083-SEMARNAT-2003). A pesar de que existen normas que rigen el manejo de los RSU, las autoridades municipales y dependencias responsables, en muchas ocasiones no cuentan con la información y las herramientas suficientes para la toma de decisiones en el tema del manejo de los residuos sólidos (Velásquez, et al. 2009).

Datos del INEGI (2013) afirman que en el Distrito Federal se recolectan al día en promedio 17,043 toneladas de residuos sólidos urbanos o desechos generados en las viviendas, comercios y edificios públicos, principalmente, que representan una quinta parte de la recolección nacional. Diariamente se recogen 1.9 kilogramos de residuos sólidos urbanos por habitante. La recolección per cápita en promedio por día oscila entre 0.7 y 4.1 kilogramos, siendo las delegaciones Milpa Alta y Cuauhtémoc las que reportan la menor y la mayor recolección, respectivamente (Figura 1.2).

Para realizar la recolección se utilizan 2,346 vehículos, que representan 16 por ciento de todas las unidades del país. Por tipo de vehículo, los de tipo compactador se encuentran en primer lugar, con 1,814 unidades (77 por ciento), los de caja abierta suman 445 (19 por ciento); mientras que los 87 (4 por ciento) restantes se clasifican como de otro tipo. Destaca la delegación Gustavo A. Madero, por concentrar 13 por ciento de todos los vehículos de la entidad (INEGI, 2013).

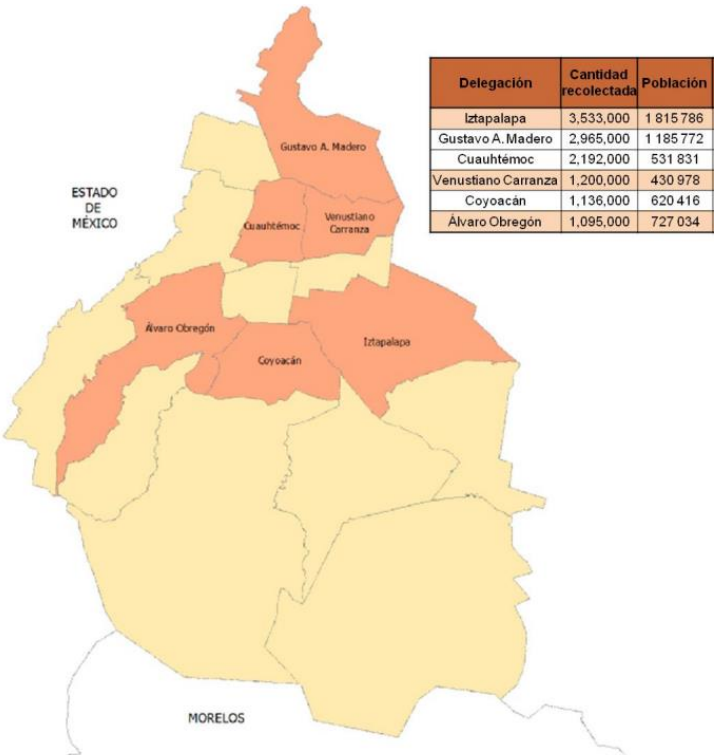


Figura 1.2. Delegaciones con mayor recolección de RSU.

Fuente: INEGI, 2013.

Las tecnologías más utilizadas en el mundo para el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos urbanos son: el Relleno Sanitario, la Incineración, y el Composteo; con la incineración (figura 1.3) se recupera energía y con el composteo materiales orgánicos. Diferentes tipos de compostaje pueden producirse de acuerdo al proceso biológico como es el vermicompostaje. La capacidad de incineración en todo el mundo en el año 2009 se ha situado en 350 millones de toneladas. Alrededor del 80 por ciento de esa capacidad se instaló en los últimos 10 años y la previsión para el 2014 es que la capacidad instalada alcance los 420 millones de toneladas (Waste To Energy, 2011).

Los principales motivos de esos incrementos son, por una parte, la escasez de espacio para construir nuevos tiraderos en las grandes ciudades y, por otra, la normativa ambiental cada vez más exigente en materia de tiraderos. En Asia, el incremento de la capacidad de incineración ha crecido de manera importante, tres veces más que en Europa. China ya ha superado a Japón como el mayor mercado mundial de incineración (Waste To Energy, 2011).

En Europa, la aplicación de la directiva de tiraderos, ha supuesto un importante incremento de la capacidad de incineración, especialmente en Alemania. En la actualidad existe un importante número de proyectos en países como Reino Unido, Noruega o Finlandia (Waste To Energy, 2011).



Figura 1.3. Planta Incineradora de en Noruega.

Fuente: Waste To Energy, 2011.

Existen en la literatura varios trabajos que muestran la aplicación de sistemas basados en técnicas de programación matemática para la recolección de residuos en diferentes ciudades del mundo. Algunos ejemplos son el de Chicago, en los Estados Unidos (Eisenstein, 1997), el de una importante ciudad en Taiwan (Chang, 1997) y el de Lisboa, en Portugal (Mourao, 2000). La mayor parte de los artículos revisados muestran que la solución de problemas reales de recolección de residuos se obtiene mediante la implementación de heurísticas, debido a la complejidad de los problemas. Algunos de estos métodos serán descritos en el capítulo tres, cuando se aborde el tema del Problema de Rutas de Vehículos y sus variantes más utilizadas para la resolución de estos problemas.

### 1.5 El Sistema de Recolección en Ciudad Universitaria

Ciudad Universitaria (figura 1.4) presenta grandes problemas con el Manejo de RSU, la separación, la recolección y su disposición final son algunos de ellos. En la presente tesis se analiza el manejo de los RSU dentro del campus universitario buscando mejorar las rutas de recolección ya establecidas y proponer una mejor planeación reduciendo la distancia total de las rutas de recolección que atienden a toda Ciudad Universitaria. En el trabajo de campo se identificaron los puntos de recolección con mayor demanda y los problemas que presenta cada uno de ellos, que principalmente es la mala separación de los residuos.

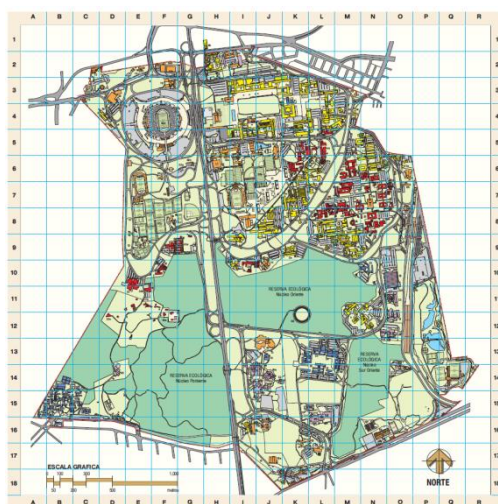


Figura 1.4. Mapa de Ciudad Universitaria

Fuente: [www.unam.mx](http://www.unam.mx)

En el documento de Lizarde (2009) se afirma lo siguiente:

*En los últimos años los problemas de contaminación han adquirido tal magnitud y diversidad que la sociedad ha ido tomando cada vez mayor conciencia de los riesgos actuales, y más aún, de los potenciales que provoca este fenómeno. Sin embargo, la crisis ambiental representa uno de los retos más importantes que enfrenta la sociedad actual. Dentro de esta temática, el problema de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), conocidos comúnmente como basura, no es un aspecto menor, no sólo porque su gestión inapropiada ha ocasionado alteraciones ecológicas como la contaminación de los suelos, del aire y de los cuerpos acuíferos; sino que al generarse desperdicios que no tienen un tratamiento adecuado se dilapidan recursos naturales no renovables afectando al ambiente y la salud de la población.*

En este contexto la educación ambiental juega un papel importante en el desarrollo sustentable reduciendo el deterioro ambiental, lo que obliga a realizar grandes esfuerzos en todas las áreas del quehacer individual y social para cambiar el modelo del desarrollo actual. Es por esto que la Universidad Nacional Autónoma de México se ha enfocado en abordar esta problemática utilizando recursos materiales y humanos desarrollando proyectos, programas y estrategias que promueven acciones que permitan dar solución a los problemas ambientales dentro de Ciudad Universitaria. Con ayuda de los centros de investigación, escuelas, programas universitarios y con las entidades encargadas del manejo de los RSU, se ha conseguido implementar medidas y estrategias que han ayudado a mejorar la gestión de los RSU Ciudad Universitaria (Lizarde, 2009).

Durante aproximadamente un año la UNAM se dedicó a identificar la problemática ambiental dentro de Ciudad Universitaria. Uno de los programas en donde se iniciaron actividades fue el de Manejo de Residuos Sólidos (Hernández, 2007).



El objetivo principal de este programa es (Lizarde, 2009):

*...la reducción de la producción de basura al separarla en fracciones que puedan ser reusadas. Para ello, se busca que todos los que generan residuos o basura comprendan que sus principales componentes provienen de la naturaleza y que, por tanto, al aumentarse la producción de basura por un estilo de vida consumista, los recursos naturales no podrán cubrir la demanda de materiales para producir plásticos, empaques, botellas de vidrio, papel y cartón, latas metálicas y otros materiales*

El 15 de noviembre de 1991, el Rector José Saruhkán fundó el Programa Universitario de Medio Ambiente (PUMA), entre cuyos objetivos se encuentran: vincular las dependencias de la UNAM ocupadas de las Ciencias Ambientales; organizar y promover actividades de docencia, investigación y difusión en este campo, así como representar a la UNAM en foros nacionales e internacionales, reunir a los expertos en el área para proporcionar asesoría interna y externa, y coordinar las acciones académicas y académico administrativas necesarias para la elaboración de un proyecto universitario de posgrado en estas ciencias (Hernández, 2007).

En 1993 se creó la Comisión de Control Ecológico del Campus con el objetivo de lograr un manejo ambientalmente adecuado en cada una de las instalaciones de Ciudad Universitaria. Sin embargo, aun con la implementación de estos programas no se ha conseguido un manejo adecuado de la basura ya que no existe una cultura ecológica por parte de la fuente generadora principal, es decir, hacer del estudiante, académico, administrativo o cualquier persona ajena a la Universidad un hábito el colocar adecuadamente sus desechos en los contenedores dispuestos para este fin, y esto es precisamente un punto crítico para la implementación de un plan universitario de manejo de los RSU (Hernández, 2007).

En este contexto, el presente estudio abarca únicamente la parte encargada de la recolección y la disposición final de los residuos que se generan diariamente dentro de Ciudad Universitaria, ya que existen diversos estudios que describen la fuente de origen, el manejo, la separación y el aprovechamiento de los residuos generados,

mas no de la recolección que se realiza diariamente dentro del campus. Para mayor información ver Hernández (2007), Lizardi (2009), Torres (2010), por mencionar algunos.

Diariamente en CU se producen 16 toneladas de RSU. Se estima que tres Ton/día son generadas por personas externas y que son dispuestas en los contenedores del Campus sin recurrir a sus respectivos servicios de recolección de la Delegación en donde viven (PUMA2006). Esta generación de RSU varía por temporadas debido a los periodos vacacionales de la población teniendo mayores concentraciones en los días que existe mayor actividad académica.



Figura 1.5. Camión recolector de residuos inorgánicos

Fuente: Elaboración Propia.

Ciudad Universitaria cuenta con un sistema de recolección y almacenamiento de basura que consiste de: campanas y tambos en áreas verdes y andadores; artesas o áreas de concentración de basura generada en traspatios de edificios principales y una flotilla de seis camiones recolectores, cuatro que se encargan de la recolección de residuos inorgánicos (figura 1.5), con uno utilizado en caso de que alguno de los otros cuatro presente alguna avería, y uno de volteo que recoge los residuos orgánicos (figura 1.6).



Figura 1.6. Camión recolector de residuos orgánicos

Fuente: Elaboración Propia.

Del total de los residuos, la mayoría son residuos orgánicos, cartón, periódico, papel de impresión, plástico PET, aserrín, etc., sin contar los residuos peligrosos, tanques de gas, animales muertos y material quirúrgico que son revueltos con los demás residuos (Figura 1.7).

Para conocer las ocho rutas de recolección que atienden a CU, fue necesario realizar los recorridos con cada uno de los choferes encargados de su respectiva ruta. Durante los recorridos, y tomando nota de lo que el personal operativo decía, se obtuvo información acerca de los problemas presentes en su recorrido, los más comunes son: basura revuelta, mala separación, contenedores mal ubicados e invasión dentro de los estacionamientos del lugar que les corresponde para realizar la recolección. También se obtuvieron algunas "soluciones" propuestas por ellos, para evitar este tipo de sucesos.

Durante los recorridos fue imposible conocer la cantidad de basura generada en cada uno de los 92 puntos de recolección, ya que no se cuenta con básculas para conocer el total recogido en cada punto, además que pesar bolsa por bolsa hubiera alargado la duración de la recolección.

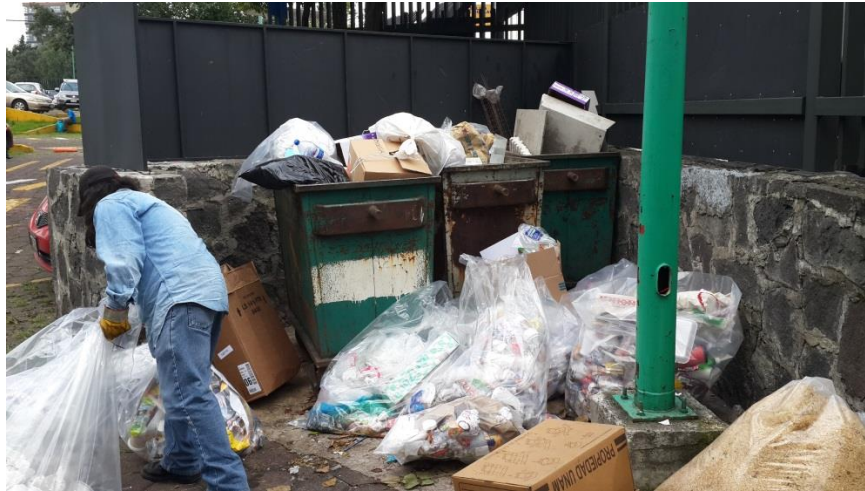


Figura 1.7. Diferentes tipos de residuos generados dentro de CU

Fuente: Elaboración Propia.

El servicio de limpia y recolección de Ciudad Universitaria se lleva a cabo por las personas que trabajan en los Talleres de Conservación (ubicados en Av. Universidad 3500 frente el edificio de la Dirección General de Relaciones Laborales de la UNAM) y a su vez éste se encuentra a cargo de la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC), la cual está constituida por 19 personas del taller que son las encargadas del transporte interno y externo de los residuos orgánicos e inorgánicos.

El personal de intendencia cuenta con aproximadamente 16 personas por dependencia, es decir, se cuenta con más de 1,000 personas encargadas de este servicio. Principalmente este personal se encarga del aseo de oficinas, aulas, pasillos y del vaciado de cestos de basura menores a 200 litros.

El personal del taller de barrido cuenta con 54 personas dedicadas al barrido de las vialidades y áreas verdes, usando como herramienta principal, escobas de vara (de rama de árbol) y dos barredoras mecánicas (figura 1.8), que sirven para efectuar el barrido mecánico de las vialidades en horarios alternados de 12 horas de 7:00 a 19:00 hrs y de 21:00 a 9:00 hrs.



Figura 1.8. Barredora mecánica.

Fuente: Elaboración Propia.

Cabe mencionar que dentro de este estudio no se incluyó la ruta que recorre el Centro Cultural Universitario, ya que la zona de estudio se limitó a las zonas de CU en donde se desarrollan actividades académicas y de investigación que son las que presentan mayores problemas de acumulación de residuos sólidos. Los talleres de la Zona cultural están a cargo, también, de la Dirección General de Obras y Conservación y éstos se encuentran en el Circuito Mario de la Cueva s/n detrás del posgrado de Economía.



Figura 1.9. Talleres de la Zona Cultural

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez que se realizaron los recorridos de las ocho rutas, se identificaron los 92 puntos de recolección y se visitó el Centro de Transferencia, se creó una base de datos con toda la información obtenida. En el siguiente capítulo se presentan las rutas de recolección de Ciudad Universitaria, describiendo cada una y algunos de los problemas durante el recorrido.

## **Capítulo 2. Sistema de Recolección de Residuos en Ciudad Universitaria**

En este capítulo se describen detalladamente las ocho rutas de recolección existentes para mantener limpio el Campus Universitario, los puntos que visitan, la frecuencia y los horarios en los que los camiones realizan los recorridos (mañana o tarde), así como las diferentes problemáticas presentes en cada punto, principalmente dentro de los estacionamientos, y el problema de la basura revuelta.

### **2.1 Descripción de las Rutas de Recolección de Ciudad Universitaria**

Ciudad Universitaria cuenta con ocho rutas de recolección de residuos sólidos en dos diferentes turnos (mañana y tarde). Se realizan cinco recorridos durante el turno de la mañana, cuatro de basura inorgánica y uno de orgánica, mientras que durante la tarde se realizan tres, uno más de basura orgánica y los dos recorridos restantes de inorgánica los cuales atienden, como se verá más adelante, los puntos en donde se acumulan grandes cantidades de basura. Los recorridos de la tarde son importantes para aminorar la recolección de basura durante la mañana siguiente; de no realizarse, la capacidad de los camiones para la recolección matutina sería insuficiente.

El método que se empleó para el diseño de los recorridos actuales fue uno basado en el juicio y la experiencia del jefe de Talleres, aunque en la mayoría de los casos, quien determina los recorridos de recolección es el jefe de limpia, o bien, los choferes de los camiones recolectores. Sin embargo el personal de recolección considera que las rutas actuales no son las mejores ya que difícilmente toman en cuenta aspectos como puntos prioritarios y tiempos de servicio.

A continuación se presentan las ocho rutas actuales, empezando por las del turno matutino, así como los puntos que cada una visita en sus recorridos matutinos y vespertinos. Cabe mencionar que no hay un nombre definido para cada ruta de recolección; a los choferes de los camiones se les asignó la ruta y ellos mismos las han nombrado de acuerdo a los lugares que tienen que visitar. Todas las rutas inician y terminan en los Talleres de Conservación de la UNAM.

Las ocho rutas son: Ruta Deportiva, Ruta del Campus Central (mañana y tarde), Ruta del Circuito Exterior, Ruta de los Institutos, Ruta de la Tarde y las Rutas de la Basura Orgánica (mañana y tarde). A continuación se describen a detalle cada una de ellas.

## **2.2 Ruta Deportiva**

La ruta Deportiva hace su recorrido únicamente en la mañana. El camión (Figura 2.1) sale a las 6:30 de la mañana de los Talleres de conservación; cabe mencionar que el horario de salida es aproximado ya que previamente los trabajadores tienen que checar su entrada, dirigirse a su unidad y esperar a que esté lista para poder salir. La duración aproximada del recorrido es de cinco horas, ya que los Talleres de Zoquipa, que son el último punto del recorrido, se encuentran en la Calzada de la Viga, entre Cuitláhuac y Ixnahualtongo, Delegación Cuauhtémoc, y el trayecto hasta allá es largo y en el tiempo de recorrido intervienen otros factores como el tráfico vehicular sobre diversas avenidas principales, la duración de los semáforos, etc.

Los puntos que la ruta recorre se muestran en la tabla 2.1.





Figura 2.1. Camión recolector de la Ruta Deportiva

Fuente: Elaboración Propia.

<b>Ruta Zona Deportiva</b>
<b>Punto de Recolección</b>
APAAUNAM
Seminario de Estudios de la Facultad de Medicina
Posgrado FFyL
DGADyR
Comisiones Mixtas
Multifamiliar
Planta Incineradora
Campos Pumitas
Medicina del Deporte
Ex reposo de Atletas
Pista el Tartán
Seminarios (Jardín Botánico)
Cabaña
Jardín Botánico Acceso
Instituto Biología
Instituto de Inv. Biomédicas
Estacionamiento 2
Barredora
UDUAL
CEPE
Publicaciones
Gasolinera Eje 10
Talleres Zoquipa

Tabla 2.1. Puntos que visita la Ruta Deportiva.

En la zona donde se deposita la basura que se genera durante los eventos deportivos, dentro del Estadio Olímpico Universitario, conocida como "La Barredora", no hay contenedores; la basura que llega ahí es depositada en el suelo (Figura 2.2) por lo que se tiene que llevar el contenedor que generalmente está ubicado en el ex reposo de atletas (lugar muy cercano a "La Barredora"), para facilitar la recolección en el punto (Figura 2.3).



Figura 2.2. Basura depositada en el suelo dentro de “La Barredora”

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 2.3. Recolección de la basura mediante un contenedor

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez que se termina de recoger la basura, el contenedor es regresado a su lugar de origen (Figura 2.4).



Figura 2.4. Devolución del contenedor a su lugar original

Fuente: Elaboración Propia.

El recorrido que realiza la Ruta Deportiva se muestra en la figura 2.5.

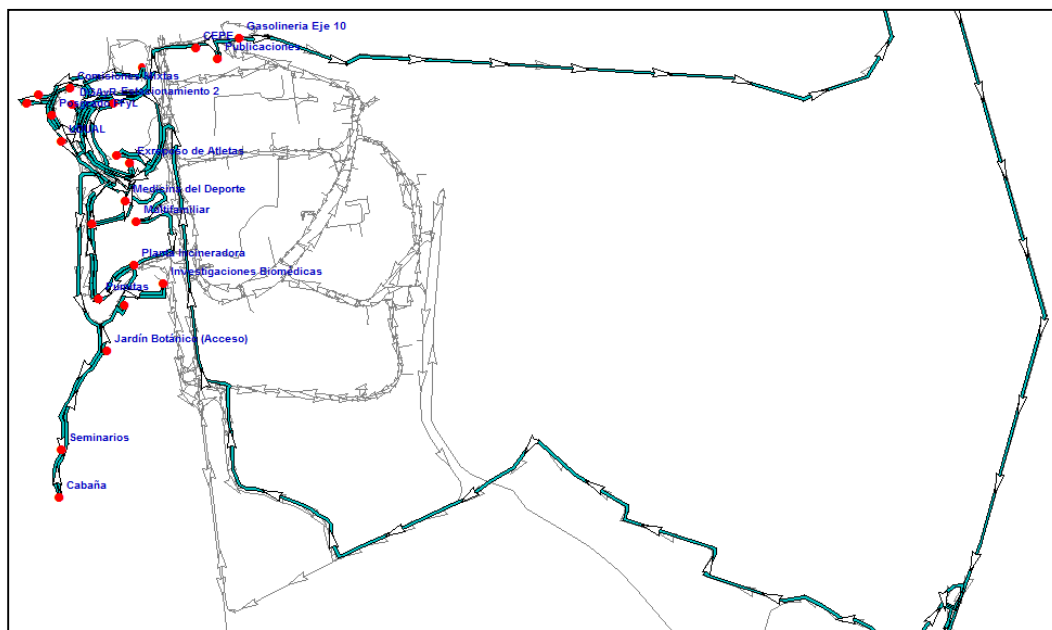


Figura 2.5. Recorrido de la ruta Deportiva en los Talleres de Zoquiapa

Fuente: Elaboración Propia

## 2.3 Ruta del Campus Central

La ruta del Campus Central es una de las más importantes y con mayor carga de trabajo dentro de Ciudad Universitaria, ya que los puntos que visita son los que presentan mayor acumulación de basura (Figura 2.6). La ruta es realizada mañana y tarde, y en ciertas ocasiones tiene un tercer recorrido en la noche debido a las grandes cantidades de basura que se acumulan. La duración de la ruta es de dos horas y media a tres, todo depende de la cantidad de basura a recolectar.



Figura 2.6. Gran acumulación de basura durante el recorrido. Contenedores ubicados en la Facultad de Ingeniería.

Fuente: Elaboración Propia.

El principal problema presentado en el recorrido son los automóviles mal estacionados (figuras 2.7 y 2.8), ya que los contenedores se encuentran, en su mayoría, dentro de los estacionamientos de Ciudad Universitaria, por lo que se complica realizar maniobras adecuadas para poderse estacionar el camión de basura cerca del punto. La causa de esto son las personas encargadas de acomodar los coches, que no respetan el espacio asignado a los camiones de basura. Este problema se presenta con mayor frecuencia en el recorrido realizado durante la tarde, cuando por lo general los estacionamientos están totalmente llenos.



Figura 2.7. Automóviles estacionados en lugares no permitidos.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 2.8. Estacionamientos llenos en Ciudad Universitaria

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 2.2 se muestran los puntos que están asignados a esta ruta:

<b>Ruta Campus Central Mañana</b>
<b>Punto de Recolección</b>
Facultad Psicología
Posgrado Derecho
Estacionamiento Facultad Medicina
Anfiteatro
Estacionamiento Facultad Química
CELE
Paseo Facultades
Facultad Ingeniería
Rectoría
Edificio E Odontología
Facultad Química
Facultad Medicina
La Muela
Facultad Economía
Facultad Derecho
Facultad Filosofía y Letras
Facultad de Arquitectura

Tabla 2.2. Puntos que visita la Ruta del Campus Central por la mañana.

La figura 2.9 muestra el recorrido que realiza en la mañana la Ruta del Campus Central dentro de Ciudad Universitaria.

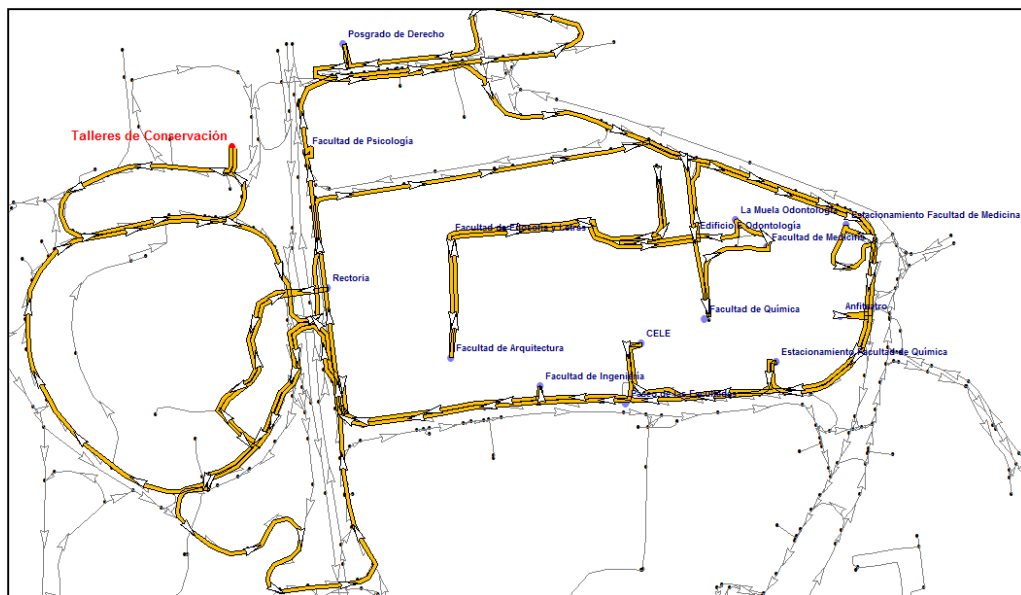


Figura 2.9. Recorrido de la ruta Campus Central. Fuente: Elaboración Propia

A continuación se presentan fotos de diferentes puntos, los cuales muestran la gran cantidad de basura que se acumula y lo mal que se realiza su depósito dentro de los contenedores. En la Facultad de Odontología (Figura 2.10) se revuelve la basura inorgánica con el instrumental médico que ocupan dentro de la Facultad para diversas asignaturas, por lo cual existe riesgo de algún accidente de tipo infeccioso para el personal encargado de realizar la recolección.



Figura 2.10. Basura revuelta en la Facultad de odontología. Fuente: Elaboración Propia.

En la Facultad de Filosofía y Letras (Figura 2.11) diariamente la cantidad de basura acumulada es muy grande, ya que ahí se deposita, aparte de la basura generada dentro de la Facultad, la perteneciente a la Biblioteca Central e incluso se llega a depositar hojarasca.



Figura 2.11. Enormes cantidades de basura acumulada en FFyL. Fuente: Elaboración Propia.

En el punto de recolección del Anfiteatro de la Facultad de Medicina, no se tiene especial cuidado al momento de depositar los residuos en los contenedores; se revuelve el instrumental médico, las batas de quirófano, las agujas, los bisturíes, etc.,



con la basura inorgánica, lo cual representa un peligro para los trabajadores ya que al momento de voltear el contenedor para separar un poco la basura corren el riesgo de enterrarse estos materiales contaminados. Los trabajadores de recolección afirman haber ya presentado una queja a los directivos de la Facultad pero hasta el día de hoy se siguen teniendo los mismos problemas (Figura 2.12).



Figura 2.12. Instrumental médico revuelto entre la basura inorgánica en el Anfiteatro. Fuente: Elaboración Propia.

A diferencia del recorrido de la mañana, el de la tarde no visita dos puntos que son el Posgrado de la Facultad de Derecho y el Anfiteatro. La Tabla 2.3 muestra los puntos en lo que se hace la recolección por la tarde.

<b>Ruta Campus Central Tarde</b>
<b>Punto de Recolección</b>
Facultad Psicología
Edificio E Facultad Odontología
Facultad Química
Facultad Medicina
Facultad Economía
Facultad Derecho
Facultad Filosofía y Letras
Facultad Arquitectura
Facultad Odontología
Estacionamiento Facultad Medicina
Estacionamiento Facultad Química
CELE
Paseo Facultades
Facultad de Ingeniería
Rectoría

Tabla 2.3. Puntos que visita la Ruta del Campus Central por la tarde.

La figura 2.13 muestra el recorrido que realiza en la tarde la Ruta del Campus Central.

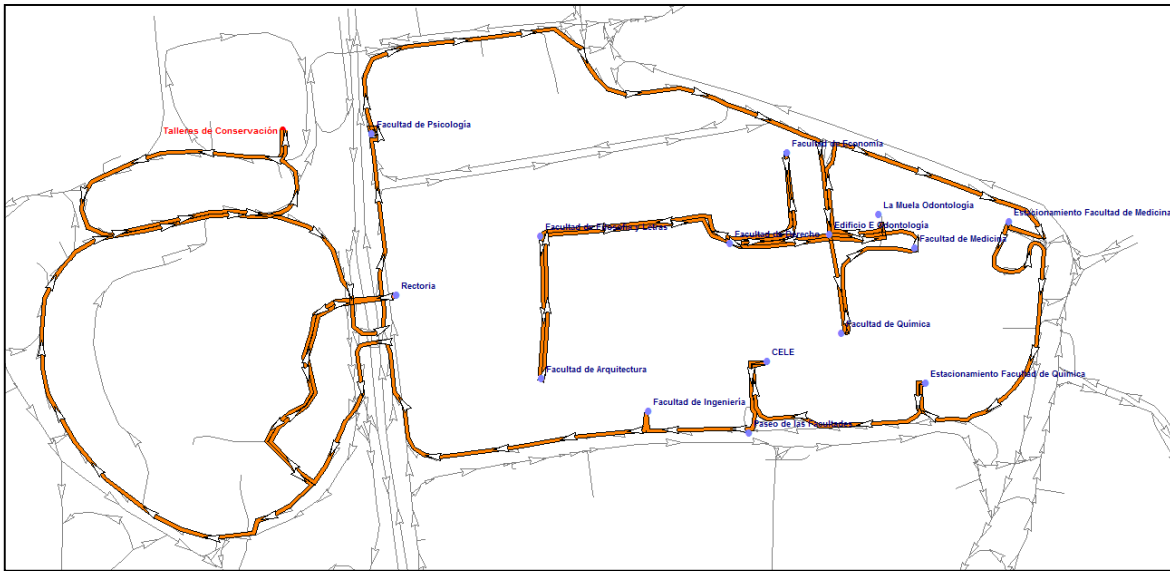


Figura 2.13. Recorrido de la ruta Campus Central.

Fuente: Elaboración Propia

## 2.4 Ruta del Circuito Exterior

La ruta del Circuito Exterior se recorre únicamente por las mañanas. Una de las ventajas que presenta el recorrido es que, al realizar la recolección los estacionamientos a los cuales se tiene que acceder no están llenos de automóviles que impedirían realizar las maniobras para que el camión se coloque cerca de los contenedores (Figura 2.14).



Figura 2.14. Estacionamiento vacío en la Facultad de Contaduría. Fuente: Elaboración Propia.

En la Escuela Nacional de Trabajo Social siempre existe una gran acumulación de residuos y conforme avanza la mañana el estacionamiento del lugar comienza a llenarse y dificulta al camión recolector el acceso al lugar y poder realizar las maniobras correspondientes para llegar al lugar donde se encuentran los contenedores (Figura 2.15).



Figura 2.15. Estacionamiento lleno en la Escuela Nacional de Trabajo Social. Fuente: Elaboración Propia.

Al llegar a los contenedores ubicados dentro de la Dirección General de Servicios Médicos, se presenta nuevamente el problema de residuos bio-sanitarios revueltos con desechos sólidos (Figura 2.16). Las personas de recolección afirman haberse quejado de este problema, sin embargo no le han dado solución, por consecuencia ellos recogen la basura tal y como se encuentra dentro de los contenedores ya que realizar una separación de la misma les "tomaría mucho tiempo y no es parte de su trabajo"- afirman.



Figura 2.16. Residuos revueltos en la DGSM. Fuente: Elaboración Propia.

En los contenedores ubicados en el Instituto de Ingeniería (Figura 2.17) se observa que hay basura regada; esto es por las actividades de pepena que ahí se realizan, ya que los pepenadores cuando sacan la basura de los contenedores para seleccionar lo reciclable, no regresan lo que no necesitan dentro del contenedor. Este problema se presenta también en otros puntos de recolección.



Figura 2.17. Basura fuera de los contenedores. Fuente: Elaboración Propia.

En el Posgrado de Ingeniería (Figura 2.18) los contratistas encargados de realizar remodelaciones o reparaciones dentro de los edificios, depositan sus residuos dentro o en los alrededores de los botes. Este problema se encuentra presente en otros puntos, ya que no existen contenedores y/o lugares en específico para colocar este tipo de residuos. Los trabajadores encargados de la recolección no están autorizados para recoger ese tipo de materiales porque en el Centro de Transferencia no se les permitiría realizar el vaciado del camión.



Figura 2.18. Residuos inorgánicos mezclados con desechos de construcción. Fuente: Elaboración Propia.

En la División de Ingeniería Civil y Geomática (DICyG) las personas que ahí laboran, inclusive algunas ajenas a la Universidad, depositan sus residuos domésticos, por lo que el volumen de estos desechos es mayor que los mismos generados dentro de la División. Sin embargo toda la basura se tiene que recoger por igual y a pesar de que no está permitido depositar residuos domésticos, este problema va en aumento (Figura 2.19).

En la tabla 2.4 se muestran los puntos que recorre la ruta del Circuito Exterior. Y en la Figura 2.20 muestra el recorrido actual que realiza la Ruta del Circuito Exterior.



Figura 2.19. Recolección en la DICyG. Fuente: Elaboración Propia.

<b>Ruta Circuito Exterior</b>
<b>Punto de Recolección</b>
Relaciones Laborales
DGPUNAM
DGOyC
Anexo DG TIC
La Reja
DGSCA
Posgrado FCA
Comedor "el Cafesín"
FCA Estacionamiento
Trabajo Social
DGCCH
DGSM
Alberca
Frontón Cerrado
Gimnasio Techado FCA
Anexo Ingeniería
Instituto Ingeniería
IMASS
DICyG
Red de Agua

Tabla 2.4 Puntos que visita la Ruta del Circuito Exterior.

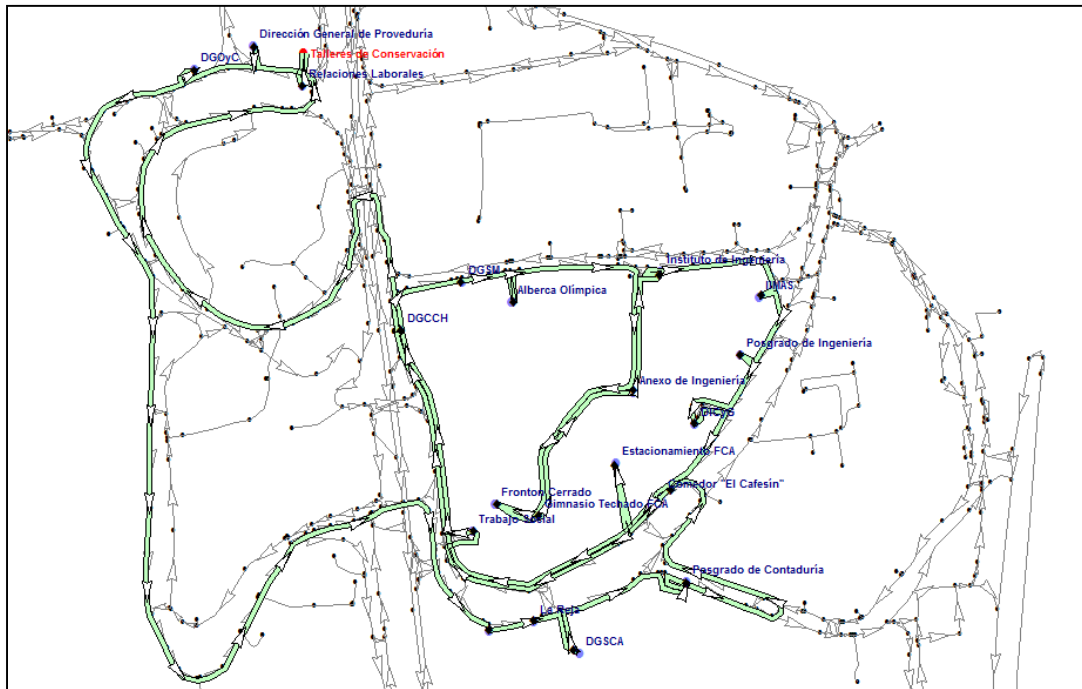


Figura 2.20. Recorrido de la Ruta Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia

## 2.5 Ruta de los Institutos

La Ruta de los Institutos se encarga de la recolección en la zona de Investigación Científica. Entre los puntos que la Ruta de los Institutos recorre se encuentran dos en los que, supuestamente, se lleva un control muy estricto al depositar los residuos ya que deben ser separados adecuadamente al momento evitando así que se revuelvan residuos orgánicos con inorgánicos, (Figura 2.21); éstos son la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (FMVZ) y la Facultad de Ciencias.



Figura 2.21. Zona controlada para el depósito y separación de residuos en la FMVZ. Fuente: Elaboración Propia.

Cada Facultad tiene un lugar asignado para el depósito de los desechos, donde se encuentran contenedores de diferentes colores y rótulos (Figura 2.22) que indican el tipo de desecho que debe depositarse allí.



Figura 2.22. Contenedores en diferentes colores para cada tipo de residuo en la FMVZ. Fuente: Elaboración Propia.

El problema que se presenta dentro del lugar es cuando la persona encargada de verificar que los residuos se depositen en el contenedor que les corresponde, no se encuentra en la entrada del lugar; entonces el personal de intendencia deposita la basura en los contenedores incorrectos o la mayoría de las veces en el piso (Figura 2.23).



Figura 2.23. Basura fuera de los contenedores en el Instituto de Ciencias del Mar. Fuente: Elaboración Propia.

Como una medida para evitar que en algunos puntos de recolección las personas arrojen sus desechos domésticos, los contenedores han sido colocados dentro de lugares especiales que están enmallados y las únicas personas que tienen acceso a ellos son las de intendencia y las que realizan la recolección, que cuentan con la llave que permite el acceso (Figura 2.24).

La tabla 2.5 muestra todos los lugares en los que la recolección se lleva a cabo y en la figura 2.25 muestra el recorrido de la ruta de los Institutos.





Figura 2.24. Acceso controlado a los contenedores en el Instituto de Física.

Fuente: Elaboración Propia.

<b>Ruta de los Institutos</b>
<b>Punto de Recolección</b>
Facultad Ciencias Políticas
CUEC
Filmoteca UNAM
Paradero CU
Ciclopista
DGAE
CENDI
Posgrado de Odontología
Instituto de Geografía
Instituto de Geología
Instituto de Física
Conjunto E Instituto de Química
Facultad de Ciencias
Ciencias Nucleares
Instituto de Materiales
Instituto de Astronomía
Base GEOS
Instituto de Química
Fisiología Celular
Ciencias del Mar
Psiquiatría y Salud Mental
Facultad de Veterinaria
Investigaciones Antropológicas
Hospital Veterinario Banfield
Tienda UNAM

Tabla 2.5. Puntos que visita la Ruta de los Institutos.

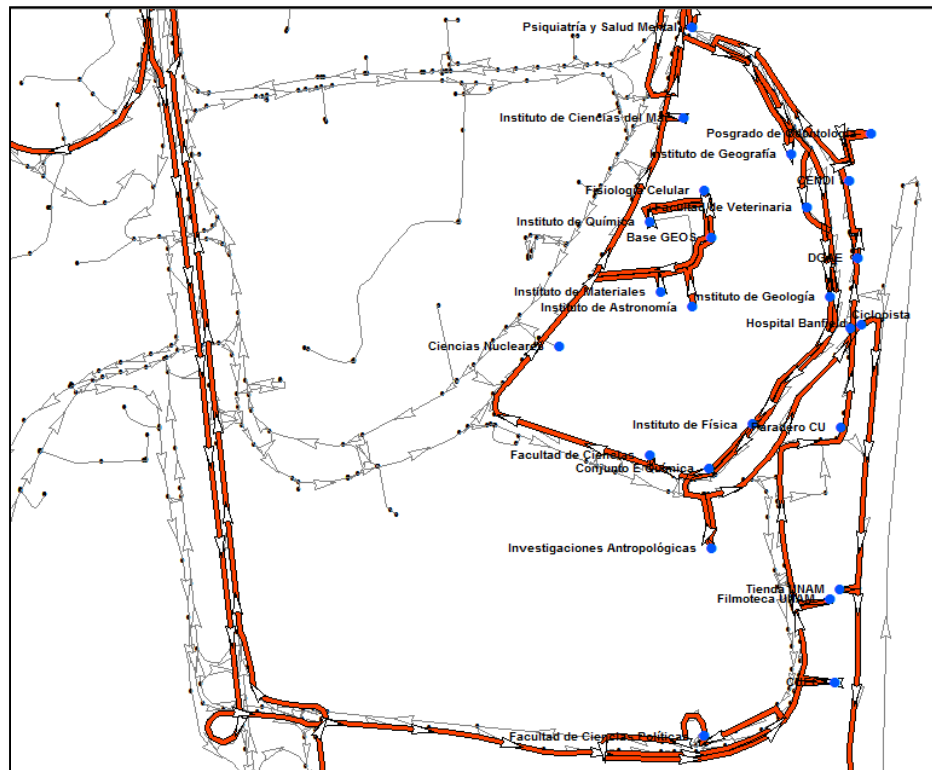


Figura 2.25. Lugares que visita la Ruta de los Institutos.

Fuente: Elaboración Propia

Al llegar al Instituto de Ciencias Nucleares, las personas encargadas de dar acceso al camión recolector tardan mucho tiempo en abrir las puertas. Los trabajadores de recolección comentan que ya es un hecho recurrente y al llegar a ese punto tendrán que esperar hasta 15 minutos para poder acceder al lugar en donde se encuentran los contenedores (Figura 2.26). Esos 15 minutos forman parte de la ventana de tiempo del punto.

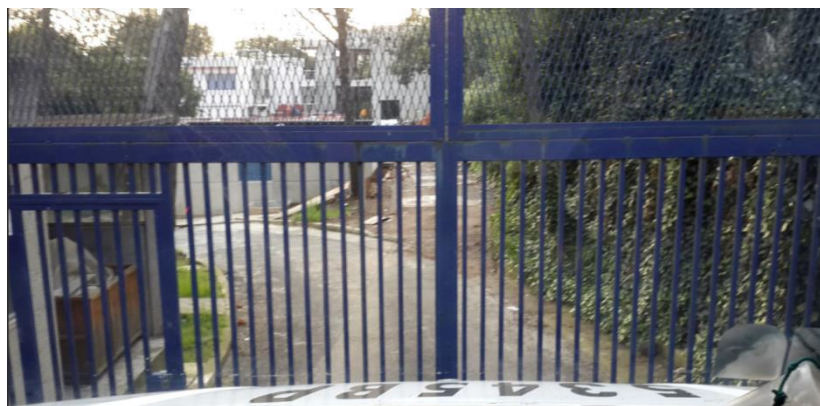


Figura 2.26. Entrada al instituto de Ciencias Nucleares. Fuente Elaboración Propia.

## 2.6 Ruta de la Tarde

La Ruta de la Tarde<sup>1</sup> tiene una duración en tiempo, mayor a las rutas anteriores. Los puntos que recorre son sólo seis, pero ahí los contenedores acumulan una enorme cantidad de basura durante todo el día. Este recorrido ayuda a reducir la cantidad de basura que otras rutas recogen por la mañana. Los problemas presentes, como en otros recorridos, son la mala separación de residuos (Figura 2.27), combinado con residuos domésticos que la gente trae en sus coches y deposita en los contenedores.



Figura 2.27. Basura revuelta en los contenedores de la Alberca Olímpica de CU.

Fuente Elaboración Propia.

En el Gimnasio Techado de la Facultad de Contaduría y Administración (Figura 2.28), las cantidades de basura llegan a ser enormes; en este sitio se observan actividades de pepena que ayudan a disminuir la cantidad de basura a recolectar pero son las mismas personas las que después de obtener los materiales reciclables no vuelven a colocar la basura dentro del contenedor (Figura 2.29).

---

<sup>1</sup> Nombre que se le asignó al recorrido, en este estudio, para poderla identificar de las demás ya que no cuenta con un nombre oficial que la identifique; se conoce así por el nombre que le dio el chofer que se encarga de la recolección en la ruta.



Figura 2.28. Enormes Cantidades de Basura en la FCA.

Fuente Elaboración Propia.



Figura 2.29. Basura no depositada dentro de los contenedores debido a las actividades de pepena. FCA

Fuente: Elaboración Propia.

Esta misma situación se presenta en la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (FCPyS), donde grandes cantidades de residuos son colocados fuera de los contenedores (Figura 2.30).



Figura 2.30. Basura fuera de los contenedores en la FCPyS.

Fuente: Elaboración Propia.

En la ruta de la tarde, el principal problema es la rápida acumulación de residuos en los puntos que visita debido a que los contenedores se encuentran cerca de zonas en donde hay gran afluencia de personas durante todo el día. Es por esto –afirman los trabajadores- que las personas a cargo de los Talleres de Conservación reciben llamadas de quejas de que el camión recolector no ha atendido cierto punto, lo que ocurre cuando el personal de vigilancia o algún Directivo observan llenos los contenedores. Ante esta situación, los trabajadores tienen que regresar al punto, que forma parte del recorrido de la ruta, y volver a realizar la recolección.

En la tabla 2.6 se muestran los puntos que visita la ruta de la tarde.

<b>Ruta Tarde</b>
<b>Punto de Recolección</b>
Alberca Olímpica
Gimnasio Techado FCA
Anexo Ingeniería
Facultad de Veterinaria
Facultad Ciencias
Facultad Ciencias Políticas
Paradero CU

Tabla 2.6. Puntos que forman parte del recorrido de la Ruta de la Tarde

Al ser una ruta que se recorre por la tarde, ésta se ve afectada por la gran cantidad de gente que hay caminando en la Universidad hacia sus clases o que se retiran a sus casas e impiden el libre tránsito del camión recolector hacia los puntos. Los choferes de las unidades deben ser muy cuidadosos para evitar accidentes, ya que la mayoría de las veces las personas hacen caso omiso de que el camión tiene que continuar su recorrido. La Figura 2.31 muestra el recorrido que realiza la Ruta de la Tarde.

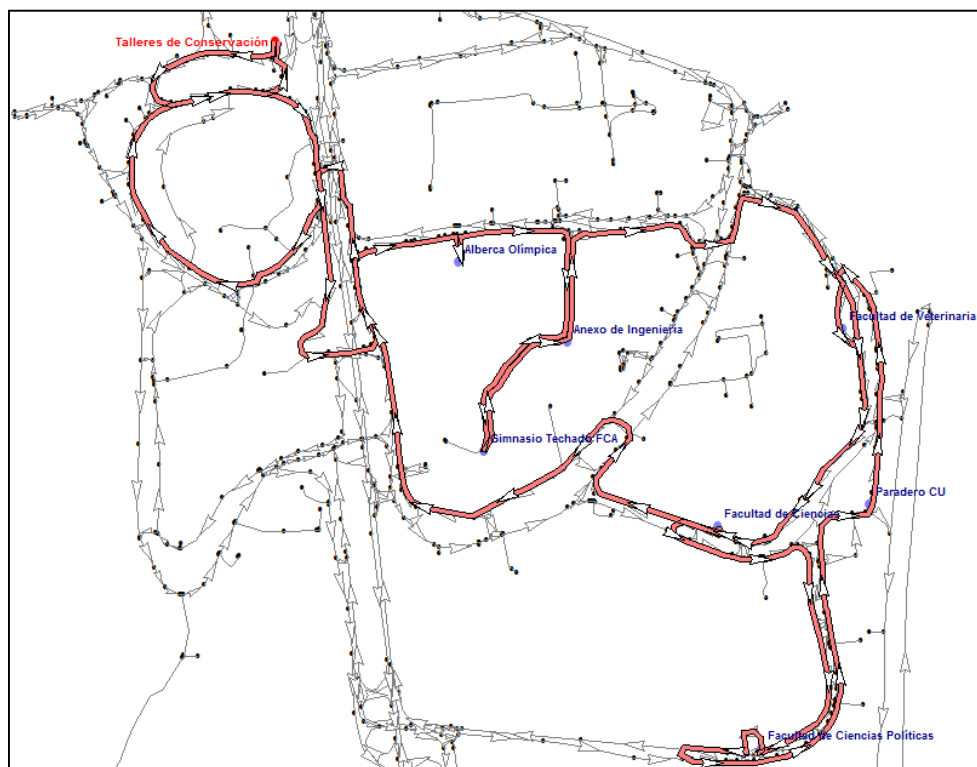


Figura 2.31. Lugares que visita la Ruta de la Tarde.

Fuente: Elaboración Propia

## 2.7 Ruta de la Basura Orgánica

La Ruta de la Basura Orgánica es el recorrido más grande que hay dentro del campus universitario, ya que en total recoge la basura de veintisiete puntos por la mañana y veintitrés por la tarde.



Figura 2.32. Basura orgánica externa mal separada en la Escuela Nacional de Trabajo Social.

Fuente: Elaboración Propia.

La Ruta de La Basura Orgánica presenta una enorme cantidad de problemas; la mala separación de la basura (Figura 2.32), la presencia de fauna nociva, la falta de contenedores para su disposición (Figura 2.33) y aunque los haya, la basura es depositada en bolsas de plástico o en el piso, dando así un mal aspecto en el lugar en el que se encuentra.



Figura 2.33. Basura orgánica depositada en el suelo y no en su respectivo contenedor en el Anexo de Ingeniería.

Fuente: Elaboración Propia.

Para este recorrido se necesitan, por lo menos, cinco personas, ya que las bolsas con la basura orgánica son muy pesadas y el camión en el que se recolecta, uno de volteo de 3 ½ toneladas (Figura 2.34), no cuenta con el sistema de gatos hidráulicos para agilizar el trabajo.



Figura 2.34. Camión recolector de los residuos orgánicos.

Fuente: Elaboración Propia.



En el Instituto de Fisiología Celular, en la Facultad de Química y en la de Medicina se recogen grandes bolsas de aserrín utilizado para la crianza de los ratones empleados en diversos experimentos o pruebas, pero los ratones van dentro de las bolsas (Figura 2.35). El personal de recolección de basura se queja de esa situación ya que para deshacerse de ese tipo de residuos, existe la planta incineradora ubicada en la Facultad de Veterinaria.



Figura 2.35. Restos de animales de laboratorio revueltos con residuos orgánicos.

Fuente: Elaboración Propia.

Entre los residuos que se generan en la Facultad de Química, están las botellas vacías de cloroformo, formol y otros ácidos peligrosos que ahí se utilizan. Este tipo de residuos peligrosos debe ser tratado de forma adecuada y por separado, ya que durante la recolección las botellas se pueden romper poniendo en riesgo la salud de los trabajadores (Figura 2.36). En la tabla 2.7 se muestran los puntos que se visitan en el recorrido de la mañana y su recorrido en la figura 2.37.



Figura 2.36. Residuos Químicos que no son manejados correctamente y depositados en contenedores especiales en el Conjunto E del Instituto de Química.

Fuente: Elaboración Propia.

<b>Ruta Orgánica Mañana</b>
<b>Punto de Recolección</b>
Trabajo Social
Alberca Olímpica
Cibarium
Anexo Ingeniería
Gimnasio Techado FCA
Comedor "El Cafesín"
Estacionamiento FCA
Posgrado FCA
Inv. Antropológicas
Facultad Ciencias Políticas
CENDI
Posgrado Odontología (Comedor)
Posgrado Odontología (Estacionamiento)
Facultad Veterinaria
Instituto Física
Instituto de Química (Conjunto E)
Facultad Ciencias
Fisiología Celular
Facultad de Medicina (Explanada)
Facultad de Odontología (Estacionamiento)
Facultad Derecho
Facultad Filosofía y Letras
Facultad Arquitectura
Facultad de Odontología (La Muela)
Facultad Medicina
Facultad Química
Facultad Ingeniería
Investigaciones Biomédicas

Tabla 2.7. Puntos que visita el recorrido de la basura orgánica por la mañana

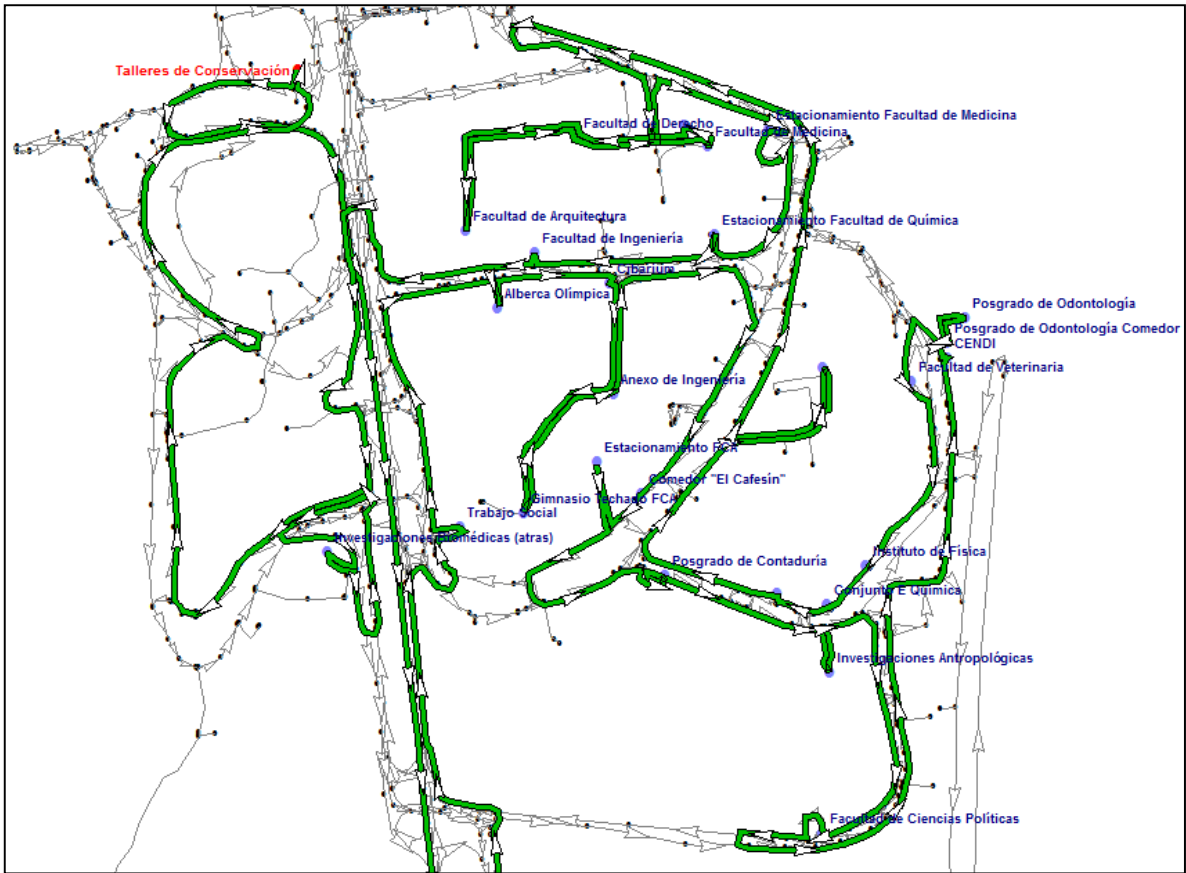


Figura 2.37. Recorrido de la Ruta de la basura orgánica por la mañana.

Fuente: Elaboración Propia

Algunos de los puntos que forman parte de la ruta no se visitan en la mañana, ya que se ha decidido visitarlos hasta la tarde debido a que la cantidad de basura que contienen no es significativa como para detenerse en el punto y recogerla; éste es el caso del Instituto de Física y del Conjunto E del Instituto de Química.

En la tabla 2.8 se muestran los puntos que visita la ruta de la basura orgánica por la tarde y su recorrido en la figura 2.38.

<b>Ruta Orgánica Tarde</b>
<b>Punto de Recolección</b>
Alberca Olímpica
Cibarium
Anexo Ingeniería
Gimnasio Techado FCA
Comedor "El Cafesín"
Fisiología Celular
Facultad Veterinaria
Instituto de Física
Instituto de Química (Conjunto E)
Facultad Ciencias
Inst. Inv. Antropológicas
Facultad Ciencias Políticas
Tienda UNAM (Almacén)
Facultad Psicología
Facultad Química
Facultad Odontología
Facultad Derecho
Facultad Filosofía y Letras
Facultad Arquitectura
Facultad Medicina
Facultad Química
DGADyR
Comisiones Mixtas (Comedor)

Tabla 2.8. Puntos que visita la Ruta de la Basura orgánica por la tarde.

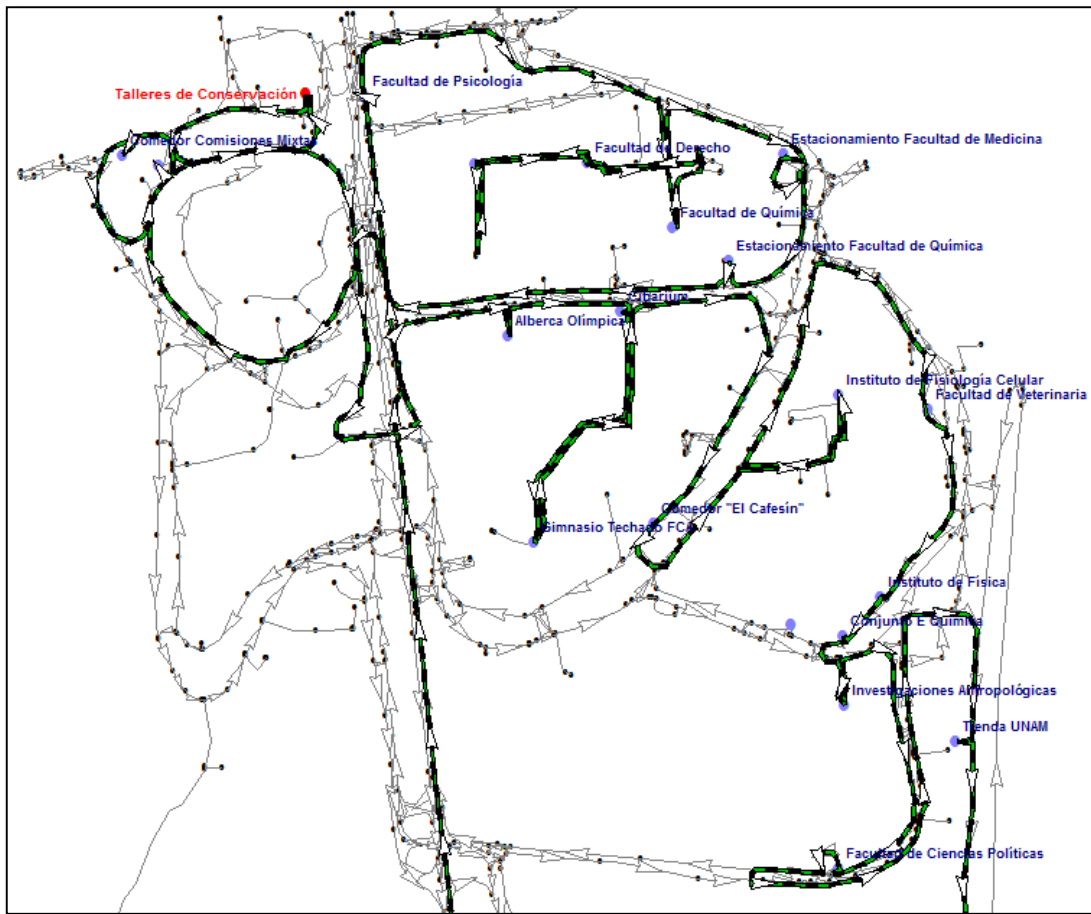


Figura 2.38. Recorrido de la Ruta de la basura orgánica por la tarde.

Fuente: Elaboración Propia

En la Facultad de Ciencias, a pesar de que se tiene un control sobre los desechos que se depositan, los contenedores y las bolsas de plástico deben ser revisados minuciosamente, porque se depositan residuos orgánicos revueltos con inorgánicos. En el Centro de Transferencia no es permitido tirar si el camión no contiene únicamente residuos orgánicos.

El objetivo de este capítulo es describir las ocho rutas de recolección de Ciudad Universitaria, los puntos que recorre cada una de ellas así como los problemas que presentan. En el tercer capítulo se describe el Problema de Rutas de Vehículos con sus variantes más estudiadas y cómo este problema puede ser resuelto para proponer mejoras en la recolección de residuos dentro de CU.

## Capítulo 3. El Problema de Rutas de Vehículos

En este capítulo se describen los principios básicos de la Teoría de Grafos, el Problema del Agente Viajero (TSP) y el Problema de Rutas de Vehículos (VRP). Para este último problema se describe el modelo clásico así como algunos otros modelos importantes como el de Restricciones de Capacidad y el de Ventanas de Tiempo. También se describen algunos de los principales métodos de solución existentes reportados en la literatura, métodos exactos y técnicas heurísticas y meta-heurísticas.

### 3.1 Los puentes de Königsberg y la Teoría de Grafos

La teoría de grafos se ha convertido hoy en día en una herramienta matemática indispensable en campos tan diversos como la investigación de operaciones, la lingüística, la química, la física, la genética, la teoría de redes o la teoría de decisiones. Es por ello que para casi cualquier rama de la ciencia, se hace indispensable el conocimiento, a través de conceptos globales, de las ideas básicas que sustentan a la denominada teoría de grafos (UNEFA, 2010).

Los grafos constituyen una herramienta básica para modelar fenómenos discretos y son fundamentales para la comprensión de las estructuras de datos y el análisis de algoritmos. En matemáticas y ciencias de la computación, la teoría de grafos estudia las propiedades de los grafos, que son colecciones de objetos llamados nodos conectados por líneas llamados arcos que tienen una dirección asignada. Típicamente, un grafo está diseñado por una serie de nodos conectados por arcos (Moreno 2011).

En 1735 Euler expuso el Problema de los Puentes de Königsberg y la solución al mismo. Euler formuló el problema de la siguiente manera (Núñez, 2004):

*...en la ciudad de Königsberg, en Prusia, hay una isla A llamada Kneiphof, rodeada por los dos brazos del río Pregel (Figura 3.1). Hay siete puentes a, b, c, d, e, f y g, que cruzan por los dos brazos del río.*

La cuestión consiste en determinar si una persona puede realizar un paseo de tal forma que cruce cada uno de estos puentes sólo una vez...

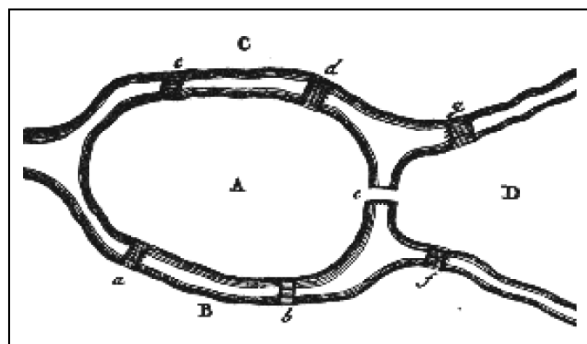


Figura 3.1. Diagrama de la ciudad de Königsberg por Euler.

Fuente: Núñez, 2004

La solución de Euler para el problema de los puentes de Königsberg constituye un claro ejemplo de un proceso de modelización. En primer lugar, Euler reemplazó el mapa de la ciudad por un simple *diagrama de puntos* (representando con las letras *A*, *B*, *C* y *D*, las zonas de la ciudad) y *arcos* entre ellos (que representaban los siete puentes. Así, el arco *a* une las zonas *A* y *B*, la *d*, la *A* y la *C* y así sucesivamente, tal como se observa en la figura 3.2. Este diagrama constituye lo que posteriormente se conocería como *grafo*, razón por lo que muchos autores consideran a Euler como el *padre* de la Teoría de grafos (Núñez, 2004).

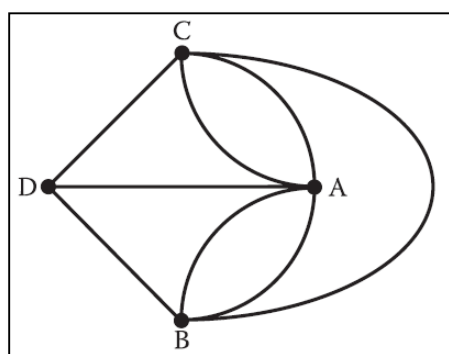


Figura 3.2 Diagrama de puntos hecho por Euler.

Fuente: Núñez, 2004



La condición necesaria y suficiente para que exista una ruta que recorra toda la ciudad de Königsberg sin pasar por el mismo lugar dos veces es que el número de zonas de la ciudad a las que le llega un número impar de puentes sea 0 (en cuyo caso la ruta será cerrada, es decir, comenzará y acabará en la misma ciudad) o sea igual a 2 (en cuyo caso la ruta será abierta, es decir, comenzará en una ciudad y terminará en otra distinta).

A partir de estos dos conceptos básicos, el problema de los puentes de Königsberg se puede formular utilizando la Teoría de Grafos: el objetivo del problema es encontrar un camino (no necesariamente cerrado) sobre un grafo que contenga a cada arco del grafo una y sólo una vez. Un camino de este tipo se denomina camino Euleriano y Euler probó que el grafo de la Ciudad de Königsberg (Figura 3.3) no tenía un camino Euleriano (Bollobas, 1985 citado por Núñez 2004).

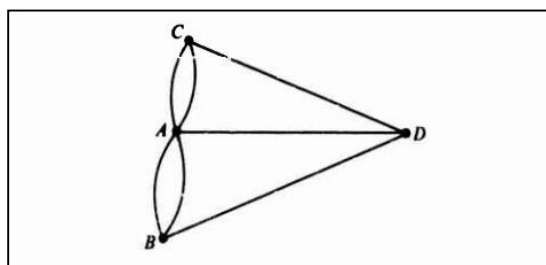


Figura 3.3. Grafo de los Puentes de Königsberg

Fuente: Núñez 2004

### 3.1.1 Grafos

Un grafo es una estructura matemática utilizada para modelar relaciones de emparejamiento entre objetos de una cierta colección. Estos objetos se llaman nodos y las relaciones representadas como parejas de nodos se llaman arcos. Cualquier sistema o estructura que pueda ser considerado abstractamente como un conjunto de elementos y en el que ciertos pares de éstos están relacionados de alguna forma específica, puede representarse como un grafo. Un ejemplo clásico del uso de grafos es la representación de un mapa de carreteras, donde las ciudades están representadas por nodos y los arcos representan las carreteras que unen una ciudad con otra (Caballero, 2008).

Un grafo dirigido  $G = (N, A)$  consiste en un conjunto de  $N$  nodos y un conjunto  $A$  de arcos cuyos elementos son pares ordenados de nodos. Dependiendo el tipo de relación existente entre los nodos, los grafos se clasifican de la siguiente forma. Aquellos grafos en los que no es importante el orden de los nodos reciben el nombre de grafos no dirigidos. Los grafos en los que el orden de los nodos es significativo reciben el nombre de grafos dirigidos y las relaciones entre los nodos son llamadas arcos dirigidos (Caballero, 2008). Un arco dirigido  $(i, j)$  tiene dos nodos finales  $i$  y  $j$ . El nodo  $i$  es llamado la cola del arco y  $j$  la cabeza. Se dice que un arco  $(i, j)$  surge del nodo  $i$  y termina en el nodo  $j$ . Un arco  $(i, j)$  es incidente a los nodos  $i$  y  $j$ . El arco  $(i, j)$  es un arco saliente de  $i$ , y es un arco entrante de  $j$ . Se dice que si existe el arco  $(i, j) \in A$ , entonces el nodo  $j$  es adyacente al nodo  $i$ .

Una forma común de representar un grafo es por medio de un dibujo en el cual los nodos se representan por medio de puntos (usualmente dibujados como círculos) y los arcos son líneas que conectan pares de puntos. Si los grafos son dirigidos los arcos se dibujan con puntas de flecha. Es importante mencionar que la forma de dibujar los nodos y arcos es irrelevante siempre y cuando se conserve la información que relaciona a las parejas de nodos (Caballero, 2008). En la figura 3.4 se muestra un grafo de cada tipo.

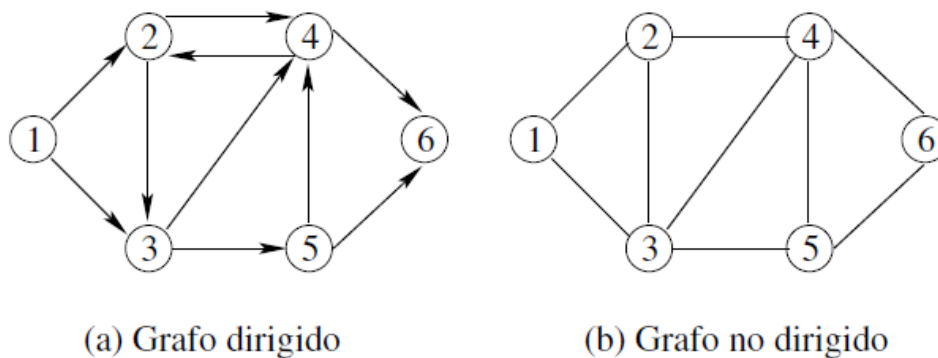


Figura 3.4. Ejemplos de Grafos  
Fuente: Caballero, 2008

### 3.1.2 Circuitos Eulerianos

Un circuito Euleriano es aquel que realiza un recorrido cerrado y cubre todas las líneas (arcos) de un grafo, comenzando y terminando en un mismo nodo, sin repetición y en forma continua (León, 2012).

Carl Hierholzer publicó la primera caracterización completa de los grafos Eulerianos en 1873, probando matemáticamente que de hecho los grafos Eulerianos son exactamente aquellos grafos que están conectados con todos y donde cada uno de los nodos tiene grado par (Menéndez, 1998).

### 3.1.3 Caminos Hamiltonianos

En el campo matemático de la teoría de grafos, un camino Hamiltoniano es una sucesión de arcos adyacentes que visita todos los nodos de un grafo una sola vez. Si además el último nodo visitado es adyacente al primero, el camino es un ciclo Hamiltoniano (Haru, 2011).

Los Ciclos Hamiltonianos se representan matemáticamente de la siguiente manera:

Se dice que un camino  $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n$  del grafo  $G = (N, A)$ , es un camino hamiltoniano si  $V = \{x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n\}$  y  $x_i \neq x_j$  para  $0 \leq i < j < n$ . Se dice que un circuito o ciclo  $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n, x_0$  (con  $n > 1$ ) del grafo  $G = (N, A)$ , es un circuito o ciclo Hamiltoniano si  $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n$  es un camino hamiltoniano. (Figura 3.5)

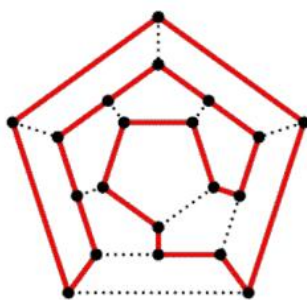


Figura 3.5. Ciclo Hamiltoniano

### 3.2 El Problema del Agente Viajero

El Problema del Agente Viajero (Travelling Salesman Problem TSP, por sus siglas en inglés) es un problema clásico de optimización combinatoria que ha recibido mucha atención en la literatura. El problema básico se formula de la siguiente manera: el viajero parte de una ciudad inicial y el objetivo es visitar  $n$  ciudades, pasando por cada una de éstas sólo una vez. El recorrido debe terminar en la ciudad en la cual inicio. Se busca el mínimo costo del recorrido, ya sea en tiempo, distancia, combustible, etc. Éste es un problema NP-hard por su complejidad computacional (Martí, 2003).

En la teoría de grafos, el Problema del Agente Viajero se representa por medio de una red o un grafo. Una red está compuesta de un conjunto de nodos, un conjunto de arcos que conecta a los nodos, y una distancia conocida asociada con cada arco. Un arco puede ser dirigido o no dirigido. Un arco dirigido permite viajar en una sola dirección, mientras que un arco no dirigido permite viajar en cualquier dirección de la misma longitud. Por lo tanto, cualquier red no dirigida puede ser convertida en una red dirigida sustituyendo cualquier par de arcos no dirigidos por un par opuesto de arcos dirigidos de la misma longitud. En el Problema del Agente Viajero, las ciudades están representadas por nodos, y las conexiones entre esas ciudades son representadas por arcos dirigidos. Si el Problema del Agente Viajero es definido sobre una red con arcos dirigidos, entonces se le llama Problema del Agente Viajero *asimétrico*. Si se define sobre una red compuesta de arcos no dirigidos, se le llama Problema del Agente Viajero *simétrico* (Der-San, et al., 2010).

En el problema del Agente Viajero un ciclo Hamiltoniano es también conocido como un *tour*. Cualquier ciclo que no contenga todos los nodos de la red se llama *subtour*.

Existen una gran variedad de formulaciones para el Problema del Agente Viajero, la que aquí se utiliza es la propuesta por Der-San, et al (2010). Esta formulación se define por el siguiente modelo matemático:

Se establece un conjunto de nodos  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  y definiendo al nodo 1 como el depósito del cual el agente debe salir al iniciar su recorrido y regresar a él al término del mismo. Para cada par de nodos  $(i, j)$ , sea  $x_{ij}$  la variable binaria, que toma el valor de 1 si y sólo si el agente viajero va del nodo  $i$  al  $j$ . Además para  $i = 2, \dots, n$  sea  $u_i$  una variable binaria que representa la posición del nodo  $i$  en el tour.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{\{i:(i,j) \in A\}} x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n, \quad (3.2)$$

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.3)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ó } 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.4)$$

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (3.5)$$

$$i \neq 1, \quad j \neq 1, \quad i \neq j$$

La ecuación 3.1 es la función objetivo que busca a un mínimo costo mandar los productos a todas las ciudades Donde  $c_{ij}$  representan los costos de transportar el producto por los diferentes arcos (que pueden ser segmentos de calles). Los costos se establecen según el criterio que se quiera minimizar.

Las restricciones (3.2) asegura que a cada ciudad  $j$  se debe entra una sola vez. La restricción (3.3) asegura que de cada ciudad  $i$  se debe salir una sola vez. Las restricciones (3.2) – (3.4) corresponden al problema clásico de asignación.

La ecuación (3.5) es conocida como la restricción de eliminación de subtours propuestas por Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) en 1960. En esta ecuación, un nuevo grupo de variables  $U = \{u_i: i \in N, i \neq 1\}$  es requerido.  $u_i$  representa la secuencia en que los nodos son visitados y  $u_j$  es el nodo siguiente a visitar (Pataki, 2003). La restricción (3.5) evita que existan subtours, esto se basa en el hecho de que para cada tour o subtour el número de nodos debe ser igual al número de arcos, sin embargo, para prevenir la formación de subtours pero permitiendo un tour, el número de arcos debe ser menor que el número de ciudades para cada conjunto que consista de 2 a  $n - 1$  ciudades. Cada subtour que no contenga a la ciudad uno viola está restricción.

El procedimiento más directo para resolver el Problema del Agente Viajero, consiste en evaluar todas las posibles combinaciones de recorridos y tomar como solución aquella que utiliza la menor distancia (Ahmed, 2006). Sin embargo, esta técnica no es factible ya que el número de posibles combinaciones viene dado por el número factorial del total de ciudades (Cai et al. 2004), lo cual dificulta obtener una solución para valores de  $n$  grandes. Por ejemplo, si un ordenador calcula la longitud de cada combinación en un microsegundo, tardaría aproximadamente tres segundos en resolver el problema para 10 ciudades, casi medio minuto en resolver el problema para 11 ciudades y 77 años en resolver el problema para sólo 20 ciudades (Cai et al. 2004). Se ha demostrado desde el punto de vista de la complejidad computacional que el Problema del Agente Viajero es del tipo NP-Completo, es decir, se requiere un tiempo muy elevado para obtener la solución óptima, incluso en problemas pequeños (Chatterjee et al., 1998 y Baker, 2003). Debido a las dificultades para

encontrar la solución exacta del Problema del Agente Viajero, en la práctica se emplean técnicas que proporcionan aproximaciones aceptables para resolver el problema (Banzhaf, 1990 citado por Martínez, 2009).

Una técnica que se utiliza para llegar a una solución aproximada del Problema del Agente Viajero consiste en realizar una búsqueda en un grupo de vecinos de una solución inicial, si se encuentra una mejor solución en el entorno, ésta reemplaza la solución inicial y continúa con el proceso hasta que ya no sea posible mejorar la solución actual. Esta técnica permite llegar a soluciones aproximadas muy rápidamente, sin embargo, la solución puede quedar atrapada en óptimos locales y la solución final depende en gran medida de la inicial (Martínez, 2009).

Es por eso que se han desarrollado diferentes métodos para aproximar la solución óptima del Problema del Agente Viajero, es el caso de las técnicas meta-heurísticas, las cuales ofrecen soluciones aproximadas a problemas generales del tipo NP-Completo, sin necesidad de recorrer o explorar todo el espacio de búsqueda. Estas técnicas utilizan la experiencia ganada en búsquedas previas (memoria) para intensificar nuevas búsquedas en regiones prometedoras en dicho espacio, y su potencial radica en que incorporan mecanismos para escapar de óptimos locales (Osman y Kelly, 1996). Algunas de las técnicas meta-heurísticas más utilizadas y reconocidas en la optimización combinatoria son: recocido simulado, búsqueda tabú, búsqueda dispersa, algoritmos genéticos, etc. Una referencia más amplia se puede consultar en Jünger, et al. (1995).

El Problema del Agente Viajero se utilizaría para visitar cada uno de los puntos de recolección de basura que hay dentro de Ciudad Universitaria si se tuviera un solo vehículo, restricciones de capacidad de los vehículos y ventanas de tiempo.

### 3.3 El Problema de Rutas de Vehículos

El problema de Rutas de Vehículos (*Vehicle Routing Problem* VRP, por sus siglas en inglés) fue definido inicialmente por Dantzig y Ramser (1959) cuando describieron una aplicación hacia la distribución de combustible para estaciones de servicio. Ellos propusieron una formulación matemática del problema así como una aproximación algorítmica. Años después, Clarke y Wright desarrollaron un algoritmo llamado voraz (*Greedy Algorithm*) que mejoraba la aproximación del algoritmo de Dantzig y Ramser (Ruiz, 2004).

La distribución de los bienes se refiere al servicio, en un período de tiempo determinado, de un conjunto de clientes por un conjunto de vehículos, que se encuentran en uno o más depósitos, son operados por un conjunto de tripulaciones (conductores), y llevan a cabo sus movimientos mediante el uso de una red de carreteras adecuada. En particular, la solución de un VRP se utiliza para la determinación de un conjunto de rutas, cada una realizada por un solo vehículo que empieza y termina en su propio depósito, de manera que satisfaga la demanda de todos los clientes y que los costos de transporte se minimicen. Este problema pertenece a la clase NP-completo (Martínez, 2010; Choi y Tcha, 2007); esto significa que el esfuerzo de computación que se ha de realizar para encontrar una solución óptima crece de forma exponencial con el tamaño del problema. Por este motivo se emplean métodos aproximados de manera que se puedan encontrar soluciones suficientemente buenas en un tiempo computacional razonable (Macías, 2008). Este tipo de problema es de los más importantes, y de los más estudiados entre los problemas de optimización combinatoria (Daza, 2009).



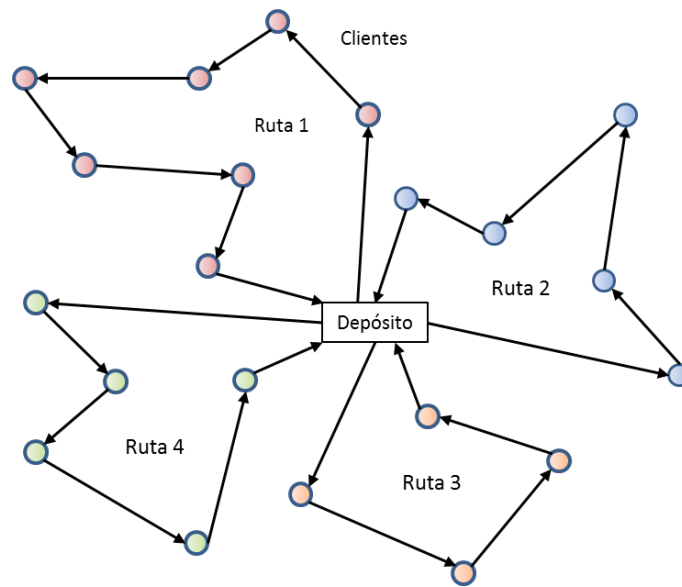


Figura 3.6. Ejemplo de la solución al problema VRP.

Fuente: Elaboración Propia

Algunos documentos que presentan el estado del arte sobre el Problema de Rutas de Vehículos son Toth y Vigo (2002), Cordeau et al. (2001 y 2007 a y b), Mester y Bräysy (2007), Pisinger y Ropke (2007) y Prins (2004), entre otros.

Ruiz (2004) describe brevemente al Problema de Rutas de Vehículos como un conjunto de  $n$  clientes con una demanda conocida  $d_i, i \in 1, \dots, n$ , que tienen que ser atendidos desde un origen central con una flota  $t$  de vehículos con una capacidad  $Q$ . Normalmente el objetivo es minimizar la distancia recorrida por la flota, pero también es común reducir los costos de la ruta (Macías, 2008).

El modelo del Problema de Rutas de Vehículos se formula de la siguiente manera (Ruíz, 2004):

Parámetros

$n$  = Número de clientes,

$d_i$  = Demanda del cliente  $i, i > 0$ ,

$C_{ij}$  = La distancia entre el cliente  $i$  y el cliente  $j$

Variables

$X_{ij} = 1$  Si el vehículo va del cliente  $i$  al cliente  $j$ , 0 en caso contrario

Donde  $i, j \in \{0, \dots, n\}$  siendo 0 el depósito de origen

Función Objetivo

$$\min = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n C_{ij} X_{ij} \quad (3.6)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n X_{ij} = 1, \quad \forall j, j \in \{1, \dots, n\} \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n X_{ij} = 1, \quad \forall i, i \in \{1, \dots, n\} \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \in S}^n X_{ij} \leq |S| - 1, \quad S \subseteq \{1, \dots, n\} \quad (3.9)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \in T}^n X_{ij} \leq |T| - k \quad (3.10)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \begin{array}{l} i = 1, \dots, n; \\ j = 1, \dots, n \end{array} \quad (3.11)$$

La función objetivo (3.6) minimiza la distancia total recorrida por la flota de vehículos. La restricción (3.7) asegura que todos los clientes sean visitados por un vehículo. La restricción (3.8) asegura que el vehículo deje al cliente que visita. La restricción (3.9) asegura que los vehículos comiencen su ruta en el depósito de origen evitando posibles subtours los cuales no contienen al nodo de origen, esta restricción se agrega por cada posible subconjunto  $S$  de clientes ya que los subtours que incluyan al depósito no están incluidas en la solución factible.

La restricción (3.10) considera la capacidad de los vehículos evitando sobrecargarlos, esta restricción se agrega por cada conjunto de clientes  $T$  (cada conjunto que satisface  $\sum_{i \in T} d_i > Q$ ) incluyendo al origen y  $k$  es el número mínimo de los clientes que tienen que ser tomados en el conjunto de clientes  $T$  para evitar sobrecargar (Macías, 2008). La restricción (3.11) puede tomar los valores de 1 si el vehículo va del cliente  $i$  al cliente  $j$ , 0 en caso contrario.

### 3.3.1 Problema de Rutas de Vehículos con Restricciones de Capacidad

El Problema de Rutas de Vehículos con Restricciones de Capacidad (Capacitated Vehicle Routing Problem CVRP) tomado de Chung-Ho (2008), es una extensión del problema clásico de Rutas de Vehículos, en donde los vehículos tienen restricciones de carga. El objetivo del CVRP es minimizar el costo total de la flota de vehículos para atender a un conjunto de clientes con demandas conocidas. Dicho costo se puede ver como una función del tiempo, la distancia total recorrida, o bien el objetivo puede ser minimizar el número de vehículos a utilizar. Una recopilación de algoritmos de solución al problema de ruteo de vehículos capacitado se encuentra en los primeros capítulos del libro de Toth y Vigo (2002).

Se considera que la flota es un número infinito de vehículos.

El problema básico de CVRP considera:

- Cada vehículo tiene la misma capacidad de carga
- Cada vehículo comienza en un solo origen
- Todos los clientes tienen demandas conocidas
- Cada cliente es visitado una vez

- Todos los vehículos tienen que regresar al origen
- La carga de cada vehículo no puede exceder la capacidad de carga máxima

El problema de CVRP se formula de la siguiente manera (Chung-Ho, 2008).

$C_{ij}$  = costo de ir del cliente  $i$  al cliente  $j$

$q_i$  = demanda del cliente  $i$

$Q$  = capacidad de carga del vehículo  $k$

$X_{ij} = 1$  si el vehículo va del cliente  $i$  al cliente  $j$ , 0 en caso contrario

$Y_{ij} = 1$  si el cliente  $i$  es atendido por el vehículo  $k$ , 0 en otro contrario

La Formulación matemática es la siguiente:

Función objetivo:

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (3.12)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n q_i Y_{ik} \leq Q \quad K = 1, \dots, m \quad (3.13)$$

$$\sum_{i,j \in S} X_{ij} \leq |S| - 1 \quad S \subseteq \{2, \dots, n\} \quad (3.14)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = \begin{cases} m, & i = 1 \\ 1, & i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ik} = \sum_{i=1}^n X_{ji} = \begin{cases} m, & j = 1 \\ 1, & j = 2, \dots, n \end{cases} \quad (3.16)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, n; \\ j = 1, \dots, n \end{matrix} \quad (3.17)$$

$$Y_{ik} \in \{0,1\} \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, n; \\ k = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (3.18)$$

La función objetivo (3.12), minimiza el costo total de la ruta. La restricción (3.13) considera la capacidad de los vehículos evitando sobrecargarlos. La restricción (3.14) asegura que los vehículos comiencen su ruta en el depósito de origen evitando posibles sub-rutas, esta restricción se agrega por cada posible subconjunto  $S$  de clientes sin incluir el depósito de origen. La restricción (3.15) asegura que todos los clientes se atiendan por algún vehículo. La restricción (3.16) asegura que los vehículos regresen al depósito.

El CVRP puede ser resuelto por medio de técnicas exactas, heurísticas y meta-heurística. Para el caso de las técnicas exactas el esfuerzo computacional requerido crece de manera exponencial con el tamaño del problema (Macías, 2008).

Los algoritmos exactos son los que producen una solución óptima empleando varias técnicas que permitan explorar el espacio de búsqueda. Estos métodos exactos incluyen los que se basan en técnicas como ramificación y acotamiento, planos de corte y programación lógica de restricciones. Estos algoritmos son razonablemente eficientes para problemas de tamaño medio; aunque con ellos es posible en principio resolver los de cualquier tamaño, en la práctica no es así debido al gran número de soluciones posibles para cualquier problema de tamaño razonable (Ignizio y Cavalier, 1994).

Toth y Vigo (2002) sugirieron que aunque la capacidad de solución de las técnicas meta-heurísticas es superior que las heurísticas convencionales, los algoritmos meta-heurísticos generalmente toman mayor tiempo que las heurísticas

convencionales. Con ayuda de técnicas meta-heurísticas se pueden obtener soluciones óptimas o muy cercanas al óptimo.

### 3.3.2 El Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo

El Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW, por sus siglas en inglés) es un problema de optimización combinatoria de alta complejidad computacional. Puede ser descrito como el problema de diseñar rutas óptimas desde un depósito hacia un conjunto de clientes con demanda conocida, donde todos los vehículos deben salir y regresar al lugar de origen (Macías, 2008). Las rutas deben estar diseñadas de tal manera que todos los clientes sean visitados una vez exactamente por un vehículo dentro de un determinado intervalo de tiempo sin violar las restricciones de capacidad.

En el Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo cada cliente es asociado con un intervalo de tiempo  $[a_i, b_i]$  en el que debe ser atendido,  $a_i$  representa el momento más temprano en que es posible atender al cliente  $i$  si cualquier vehículo llega antes de  $a_i$  el vehículo deberá esperar;  $b_i$  es el último momento en el que el cliente  $i$  puede ser atendido. A este tipo de ventanas de tiempo se les conoce como ventanas de tiempo no flexibles. Las ventanas de tiempo del problema pueden ser flexibles o no flexibles. Para el problema de rutas de vehículos con ventanas flexibles se permite violar la restricción que da inicio al servicio dentro de las ventanas de los clientes; este hecho implica una penalización económica por incumplimiento que afecta negativamente la función de costo. Por otro lado, las ventanas de tiempo no flexibles no admiten el inicio del servicio después del tiempo más lejano en el que algún cliente puede ser atendido (Lozada y Cadena, 2012).

Sea un grafo  $G = (N, A)$  donde  $N = \{0, 1, \dots, n\}$  es el conjunto de nodos y  $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$  el conjunto de arcos. El nodo 0 representa el origen y  $N = \{1, \dots, n\}$  el conjunto de clientes, cada uno con una demanda  $q_i$ . Es posible viajar de  $i$  a  $j$ , incurriendo en un costo  $C_{ij}$  en un tiempo de recorrido  $t_{ij}$ . Cada vehículo tiene una capacidad limitada  $Q$ , y  $h$  es el costo de vehículo. Para atender a cada cliente  $i$  se

requiere un tiempo de servicio  $S_i$ ,  $[a_i, b_i]$  es el intervalo de tiempo para atender al cliente  $i$  donde  $a_i = \max(a_0 + t_{0i}, a_i)$  y  $b_i = \min(b_0 + t_{0i}, b_i)$  (Macías, 2008).

Se asume que el costo depende del tiempo de recorrido, es decir,  $C_{ij} = t_{ij} \forall (i, j) \in A$  y que  $h$  es lo suficiente grande para que en número de vehículos se minimice como lo indica la función objetivo.

Variables:

$X_{ij} = 1$  si el vehículo va del cliente  $i$  al cliente  $j$ , 0 en caso contrario

$Y_i =$  Carga del vehículo a la salida del nodo  $i$

$P_i =$  Principio del servicio en el nodo  $i$

La formulación del Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo es la siguiente (Macías, 2008).

Función objetivo:

$$\min \sum_{j \in N} h x_{0j} + \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} X_{ij} \quad (3.19)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3.20)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3.21)$$

$$P_i + S_i + t_{ij} \leq P_j \quad \forall (i, j) \in N \quad (3.22)$$

$$a_i \leq P_i \leq b_i \quad \forall i \in N \quad (3.23)$$

$$y_i + q_j \leq y_i \quad \forall (i, j) \in N \quad (3.24)$$

$$q_i \leq y_i \leq Q \quad \forall i \in N \quad (3.25)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in N \quad (3.26)$$

La función objetivo (3.19) minimiza el costo total de enviar las mercancías a sus clientes. Las restricciones (3.20) y (3.21) indican que cada cliente va a ser visitado por sólo un vehículo. La restricción (3.22) indica que el tiempo inicial en el nodo  $i$ , más el tiempo de servicio, más el tiempo de viaje del nodo  $i$  al  $j$  debe ser menor que el tiempo de servicio inicial en el nodo  $j$ . La restricción (3.23)  $a_i$  indica el tiempo de inicio del servicio y  $b_i$  el tiempo en el que éste debe terminar. Las restricciones (3.24) y (3.25) indican que la capacidad del vehículo no debe ser superada. La restricción (3.26) toma los valores de 1 si el vehículo va del cliente  $i$  al cliente  $j$ , 0 en caso contrario.

### 3.3.3 El Problema de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección.

El Problema de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección (VRP Pick and Delivery VRPPD, por sus siglas en inglés) es una generalización del problema clásico de rutas de vehículos el cual pertenece a la familia de problemas de recolección y distribución (Pickup and Delivery Problems PDPs). Tres tipos de problemas de distribución y recolección han sido estudiados en la literatura (Cordeau, et al. 2007 a y b). El primero de ellos es el de un solo artículo (*single-commodity*) en el cual un solo tipo de producto se recolecta o se distribuye en cada nodo, por ejemplo, cuando vehículos blindados transportan dinero desde oficinas centrales hacia el banco (para mayor información ver Hernández- Pérez y Salazar-González, 2004). La segunda variante del problema es la distribución de dos artículos (*two-commodity*), en el que en cada nodo se distribuyen y recolectan dos tipos de productos. Un ejemplo de este problema se presenta en la distribución de bebidas embotelladas en donde los vehículos entregan botellas llenas y recogen las vacías (para mayor información ver Gendreau et al, 1999; Baldacci et al., 2003).



Otra variante del modelo de VRP clásico es el Problema de Rutas de Vehículos con *Blackhaults* en el cual todas las entregas deben realizarse antes que cualquier recolección. Finalmente está el problema de *n-artículos* en el cual cada artículo está asociado con un solo nodo de recolección y de distribución. Esto se presenta cuando pasajeros o productos deben ser transportados de un origen hacia un destino. Este problema es conocido como el Problema de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección (VRPPD, Vehicle Routing Problem Pickup and Delivery por sus siglas en inglés) (Cordeau et al., 2007a)

Debido a que la mayoría de las aplicaciones prácticas del Problema de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección incluyen restricciones en el tiempo de visita a cada nodo, es conveniente presentar una variante más general del problema conocido como Problema de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección y con Ventanas de Tiempo (VRPPDTW), el problema se define de la siguiente manera (Cordeau, 2007a):

Sea  $n$  el número de pedidos que necesitan ser atendidos. Suponiendo que todos los vehículos salen de un solo depósito, el Problema de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección y con Ventanas de Tiempo se define en un grafo dirigido  $G = (N, A)$  donde  $N = P \cup D \cup \{0, 2n + 1\}$ ,  $P = \{1, \dots, n\}$  y  $D = \{n + 1, \dots, 2n\}$  son un grupo de nodos, y  $A = \{(i, j): i, j \in N\}$  es un grupo de arcos. Los subconjuntos  $P$  y  $D$  contienen, respectivamente, los nodos de distribución ( $P$ ) y recolección ( $D$ ), mientras que los nodos  $0$  y  $2n + 1$  representan los depósitos de origen y destino. Para cada pedido está asociado un nodo origen  $i$  y un nodo de destino  $n + i$ . Sea  $K$  el grupo de vehículos a realizar los recorridos y sea  $m = |K|$ . Cada vehículo  $k \in K$  tiene una capacidad  $Q_k$  y la duración total del recorrido no debe exceder el tiempo  $T_k$ . A cada nodo  $i \in N$  se le asocia una carga  $q_i$  y un tiempo de servicio, no negativo,  $d_i$  tal que  $q_0 = q_{2n+1} = 0$ ,  $q_i = -q_{n+i}$  ( $i = 1, \dots, n$ ), y  $d_0 = d_{2n+1} = 0$ . La ventana de tiempo  $[e_i, l_i]$  también está asociada con cada nodo  $i \in N$ , en donde  $e_i$  y  $l_i$  representan el tiempo más temprano y más tarde, respectivamente, en el cual el servicio puede comenzar en el nodo  $i$ . A cada arco  $(i, j) \in A$  está asociado un costo  $c_{ij}$  y un tiempo de viaje  $t_{ij}$ . Para cada arco  $(i, j) \in A$  y cada vehículo  $k \in K$ , sea  $x_{ij}^k = 1$  sí y sólo sí el vehículo  $k$  viaja del nodo  $i$  al nodo  $j$ . Para cada nodo  $i \in N$  y cada vehículo  $k \in K$ ,

sea  $B_i^k$  el tiempo en el cual el vehículo  $k$  comienza a dar servicio al nodo  $i$ , y sea  $Q_i^k$  la carga del vehículo  $k$  después de visitar el nodo  $i$ .

Matemáticamente, el Problema de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección y con Ventanas de Tiempo se formula de la siguiente manera (Cardeau, 2007):

Función objetivo:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (3.27)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ij}^k = 1 \quad i \in P \quad (3.28)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij}^k - \sum_{j \in N} x_{n+1,j}^k = 0 \quad i \in P, k \in K \quad (3.29)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0j}^k = 1 \quad k \in K \quad (3.30)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ji}^k - \sum_{j \in N} x_{ij}^k = 0 \quad i \in P \cup D, k \in K \quad (3.31)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,2n+1}^k = 1 \quad k \in K \quad (3.32)$$

$$B_j^k \geq (B_i^k + d_i + t_{ij})x_{ij}^k \quad i \in N, j \in N, k \in K \quad (3.33)$$

$$Q_j^k \geq (Q_i^k + q_j)x_{ij}^k \quad i \in N, j \in N, k \in K \quad (3.34)$$

$$i \in P, k \in K \quad (3.35)$$

$$B_i^k + d_i + t_{i,n} \leq b_{n+1}^k$$

$$B_{2n+1}^k - b_0^k \leq T_k \quad k \in K \quad (3.36)$$

$$e_i \leq B_i^k \leq l_i \quad i \in N, k \in K \quad (3.37)$$

$$\max\{0, q_i\} \leq Q_i^k \leq \min\{Q_k, Q_k + q_i\} \quad i \in N, k \in K \quad (3.38)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad i \in N, j \in N, k \in K \quad (3.39)$$

La función objetivo (3.27) minimiza el costo total del recorrido. Las restricciones (3.28) y (3.29) aseguran que cada pedido sea atendido sólo una vez y que los nodos de distribución y recolección sean visitados por el mismo vehículo. Las restricciones (3.30), (3.31) y (3.32) garantizan que cada vehículo  $k$  comience su recorrido desde el depósito de origen y termine en el depósito de destino. La restricción (3.33) indica que el tiempo de servicio en el nodo  $i$  debe ser mayor que el tiempo total de recorrido en el arco  $(i, j) \in A$ .

La restricción (3.34) indica que la capacidad del vehículo no debe ser superada al momento de realizar la recolección en el nodo  $i$ . La restricción (3.35) obliga al vehículo a visitar primero al nodo de recolección antes que el de distribución. La desigualdad (3.36) establece que la duración del recorrido no debe ser mayor a  $T_k$ . Finalmente, las desigualdades (3.36) y (3.38) establecen la ventana de tiempo en la que el pedido debe ser atendido y que la capacidad de carga debe ser no negativa, y la restricción (3.39) puede tomar los valores de 1 si el vehículo va del cliente  $i$  al cliente  $j$ , 0 en caso contrario.

### **3.4 VRP con aplicaciones en recolección de Residuos Sólidos Urbanos**

El uso de computadoras para resolver problemas de recolección de basura ha sido reportado por varios investigadores durante los últimos quince años (Teemu. et al., 2006).

Ong, et al (1990) desarrollan una ruta heurística first-cluster para la optimización de la recolección de basura en Singapur. Janssens (1993) describe un modelo matemático para determinar el tamaño óptimo de la flota de vehículos para la recolección de aceites quemados en Amberes, Bélgica. El modelo consiste en una estimación de la demanda y en un modelo de recolección que calcula el número de rutas y los tiempos de viaje requeridos. Alvarez-Valdez et al. (1993) sugieren una estrategia donde el dead-heading de los vehículos se reduzca al mínimo permitiendo que algunos contenedores sean movidos por los trabajadores hacia el punto más cercano. Bommisetty, et al (1998) consideran el problema de recolección de materiales reciclables en la Universidad de Illinois. Éste se modela como un VRP periódico, y se resuelve utilizando un método heurístico de dos fases. Minciardi, et al. (2003) describen estrategias heurísticas para la recolección de residuos a gran escala, a nivel distrital, así como la planificación de rutas para realizar el trabajo. Teixeira, et al. (2004) estudian la planificación de rutas de vehículos aplicado en la vida real para la recolección de diferentes tipos de materiales reciclables en la zona urbana de Portugal. Ellos desarrollan técnicas heurísticas para definir la zona geográfica donde se lleva a cabo la recolección, los tipos de residuos que se recogen, por día, y las rutas vehiculares.

### **3.5 Técnicas de solución**

En la actualidad, la atención se ha centrado en el uso de métodos de optimización combinatoria, debido a la complejidad de estos problemas en la obtención de soluciones óptimas en tiempo polinomial. Estas técnicas se dividen en técnicas de optimización local convencional (heurísticas) y técnicas de optimización local inteligente (metaheurísticas). A diferencia de un enfoque algorítmico "exacto", un

método metaheurístico no tiene una base de matemática formal que lo sustente, es desarrollado más o menos por intuición (Ignizio y Cavalier, 1994).

La idea más genérica del término heurística está relacionada con la tarea de resolver inteligentemente problemas reales usando el conocimiento disponible (Narducci, 2005). Heurística proviene de una palabra griega con un significado relacionado con el concepto de encontrar y se vincula a la supuesta exclamación *eureka* de Arquímedes al descubrir su famoso principio (De la Cruz, 2003). Reeves (1996) define el término heurística de la siguiente forma:

*"Una técnica heurística (o simplemente una heurística) es un método que busca buenas soluciones (es decir, soluciones cercanas al óptimo) a un costo computacional razonable sin poder garantizar optimalidad".*

Las técnicas heurísticas para el VRP, en general, pueden ser clasificadas dentro de cuatro categorías según Gaskell (1967) así: *constructivas*, como el método de los ahorros de Clarke y Wright, con base en el ahorro generado por insertar nuevos clientes en cada vehículo hasta completar una solución final; métodos de *agrupar primero, enrutar después*, que agrupan los clientes en varios subconjuntos, asignan cada subconjunto a un vehículo y luego resuelven cada TSP correspondiente, por ejemplo, el método de Fisher y Jaikumar, basado en el problema de asignación generalizado y el algoritmo de barrido de Gillet y Miller (1947); métodos heurísticos de *enrutar primero, luego agrupar*, que empiezan resolviendo el TSP definido por todos los clientes y luego parten la ruta hallada para asignar un tramo a cada vehículo como el método de curvas de llenado de Bowerman, y el método de partición óptima de Beasley (Mario J, et al, 2009).

Las metaheurísticas (también llamadas heurísticas modernas) han aparecido durante las últimas dos décadas (Yu, 1998) y tienen como función tomar inicialmente una solución factible, para luego mejorarla usando heurísticas de mejoramiento embebidas en una estructura más general. La característica común de estos enfoques es el uso de mecanismos para evadir óptimos locales (Moraga, 2002). Glover et al (1997) definen el término "metaheurística" como una estrategia maestra que guía y modifica otras heurísticas para producir soluciones más allá de aquellas



## **3.6 Solución del Problema de Recolección de Basura en CU**

En esta sección se describen los problemas que presentan, de manera general, los puntos que visita cada recorrido, además se incluye un cuadro con las características de los camiones que se encargan de la recolección, y se describe el manejo que se le dio a la demanda. También se hace la descripción de cómo se creó la base de datos, con la que se trabajó para todos los problemas y los escenarios descritos en el capítulo cuatro, para finalmente mostrar los pasos generales que se siguieron dentro de TransCAD para resolver el Problema de Rutas de Vehículos.

### **3.6.1 Restricciones de duración de la ruta**

Cada uno de los ocho recorridos actuales presenta diferentes restricciones como ventanas de tiempo en los puntos y de capacidad en los vehículos, sin embargo cada recorrido comparte problemas como el acceso a los estacionamientos, la separación de los desechos, etc.

La entrada del personal encargado de la recolección de residuos, tanto choferes como ayudantes en general es a las 6:00 horas de lunes a viernes con una tolerancia máxima de 15 minutos. Después de esa tolerancia el Jefe de Talleres decidirá si la persona con retardo puede quedarse a laborar.

Los camiones deben iniciar su recorrido antes de las 7:00 horas dándose prisa al momento de realizar la recolección para evitar obstruir el acceso a los automóviles a los estacionamientos de Ciudad Universitaria.

La visita al centro de transferencia debe hacerse antes de las 14:00 horas ya que el tiempo de espera para descargar el camión es menor (aproximadamente de 15 a 20 minutos) que si se hiciera después de las 16:00 horas, cuando la cantidad de camiones en la fila para ser vaciados es muy grande y el tiempo de espera puede llegar hasta cuatro horas.

Los recorridos que se realizan en la tarde comienzan antes de las 16:00 horas y una vez terminados, los camiones recolectores no se dirigen al centro de transferencia, por el problema descrito anteriormente, sino que lo visitan a la mañana siguiente.

Cada camión debe visitar un punto una sola vez, a menos que haya indicaciones por parte de los jefes de Talleres de atender determinado punto otra vez.

La Dirección General de Obras y Conservación cuenta con una flota de cinco camiones recolectores internos de tipo C3 con una capacidad de carga de 15.3  $m^3$  y un camión de volteo de tres y media toneladas exclusivo para la recolección de la basura orgánica (Ver Tabla 3.1).

La capacidad de los vehículos no es suficiente para atender todos los puntos, por lo cual se realizan dos recorridos o más al día, según la ubicación de los contenedores, ya que hay zonas críticas en donde hay acumulación de residuos todo el día.

<b>MODELO</b>	<b>Cantidad de Vehículos</b>	<b>Capacidad Ton</b>	<b>Capacidad <math>m^3</math></b>
<b>SCII20YD</b>	5	5 Ton	15.3
<b>Volteo</b>	1	3.5 Ton	7

Tabla 3.1. Vehículos para recolección de residuos en CU

Fuente: DGOyC UNAM

La capacidad de los contenedores, en la mayor parte de los puntos de recolección, siempre es superada ya que, como se describió en el Capítulo 2, no hay un manejo adecuado de los residuos lo que provoca que grandes cantidades sean depositados fuera de los contenedores. La Tabla 3.2 muestra las características de los contenedores ubicados en los diferentes puntos de recolección.



	<b>CONTENEDORES</b>
<b>Número</b>	300
<b>Capacidad</b>	0.8 m <sup>3</sup>
<b>Características generales</b>	Fabricados en lámina negra calibre No. 16 con marcos de PTR de 1 1/4" y ruedas tipo tractor de 8" pintados en color verde para material orgánico y gris para material inorgánico

Tabla 3.2. Características de los contenedores de basura de CU. Fuente: DGOyC UNAM

### 3.6.2 Demanda y tiempo de servicio en los puntos de recolección

El tiempo de recorrido de cada ruta varía dependiendo del día de recolección y la cantidad de basura acumulada. El tiempo de servicio está en función de: la cantidad de residuos acumulados en cada punto que se visita y la cantidad de vehículos que se encuentren obstruyendo el acceso a los contenedores de residuos.

La duración de cada ruta varía dependiendo del día de recolección y la cantidad de basura acumulada. El tiempo de servicio en cada punto también depende de la cantidad de residuos en el mismo y la cantidad de vehículos que se encuentren obstruyendo el acceso a los puntos. La cantidad de residuos que se generan sobrepasa la capacidad de los contenedores y tampoco se tiene el dato exacto de la cantidad de basura que se recoge por punto (los trabajadores no pesan la basura debido a que la duración del recorrido aumentaría). Para este problema se hizo un cálculo aproximado de la demanda de cada punto. La única forma de conocer el total de residuos recolectados, por ruta, es al momento de que el camión es pesado en el Centro de Transferencia. Una vez que se conoce este dato, se asignó una parte del total a cada uno de los puntos que forman el itinerario de la ruta. Esta parte del total se asignó en función de la cantidad de residuos observados en cada uno de los puntos visitados durante el trabajo de campo, es decir, se asignó una cantidad mayor de residuos a los puntos en los que se observó mayor acumulación de residuos. Caso contrario en los que se observó menor cantidad de residuos a recolectar.

En esta subsección se muestran los tiempos de recorrido y las demandas asignadas a cada punto que forma cada ruta. En la tabla 3.3 se encuentran todos los puntos que visita la Ruta Deportiva. Si se observa la demanda de los puntos es posible encontrar diferencias significativas que están relacionadas con el tiempo de servicio en cada punto. Por ejemplo, en el CEPE la cantidad de residuos recolectados fue de  $0.9 \text{ m}^3$  en un tiempo de servicio de cinco minutos, mientras que en el Estacionamiento 2 el tiempo fue de dos minutos para recolectar la misma cantidad. Esto se debe a los problemas de acceso al lugar donde se encuentran los contenedores y principalmente a la forma en que los residuos se encuentran depositados en el lugar; por ejemplo, en ocasiones los residuos están fuera del contenedor o en sus alrededores y se tienen que recoger del suelo primero. Por otro lado cuando los residuos se encuentran dentro del contenedor, el trabajo de recolección es más sencillo ya que solo se mueve el contenedor hacia los gatos hidráulicos que tiene el camión para vaciarlo.

En el recorrido del Campus Central (tabla 3.4) se observa la misma situación. Un ejemplo se tiene en el Estacionamiento de la Facultad de Medicina y en la Facultad de Filosofía y Letras, ambas con demanda de  $1.5\text{m}^3$ ; en esta última los residuos se encuentran fuera de los contenedores y están revueltos con hojarasca y materiales de construcción por lo que separarlos del resto lleva un tiempo considerable (10 minutos adicionales).

<b>Ruta Deportiva</b>		
<b>Punto de Recolección</b>	<b>Tiempo de Servicio (min)</b>	<b>Demanda (m<sup>3</sup>)</b>
AAPAUNAM	0:04	0.9
Seminario de Estudios de la Facultad de Medicina	0:00	0.1
Posgrado FFyL	0:02	0.6
Actividades Deportivas	0:04	0.6
Comisiones Mixtas	0:01	0.8
Multifamiliar	0:02	0.6
Planta Incineradora	0:01	1
Campos Pumitas	0:04	1
Medicina del Deporte	0:01	0.6
Ex reposo de Atletas	0:03	0.5
Pista el Tartán	0:01	0.1
Seminarios (Jardín Botánico)	0:02	0.4
Cabaña	0:01	0.1
Jardín Botánico Acceso	0:03	0.90
Instituto Biología	0:03	0.7
Investigaciones Biomédicas	0:04	0.7
Estacionamiento 2	<b>0:02</b>	<b>0.9</b>
Barredora	0:05	0.8
UDUAL	0:02	1
CEPE	<b>0:05</b>	<b>0.9</b>
Publicaciones	0:03	0.5
Gasolinera Eje 10	0:03	0.7
Talleres Zoquipa	0:17	0.8
<b>Total</b>		<b>15.2</b>

Tabla 3.3. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

<b>Ruta Campus Central Mañana</b>		
<b>Punto de Recolección</b>	<b>Tiempo de Servicio (min)</b>	<b>Demanda (m<sup>3</sup>)</b>
Facultad Psicología	0:06	1.3
Posgrado Derecho	0:02	0.5
Estacionamiento Facultad Medicina	<b>0:04</b>	<b>1.5</b>
Facultad Medicina (Anfiteatro)	0:06	1.3
Estacionamiento Facultad Química	0:08	1.8
CELE	0:07	0.5
Paseo Facultades	0:03	0.6
Facultad Ingeniería	0:08	0.8
Rectoría	0:04	0.5
Odontología Edificio E	0:06	0.5
Facultad Química	0:05	0.5
<b>Facultad Medicina</b>	0:05	0.5
Facultad Odontología (La Muela)	0:08	0.9
Facultad Economía	0:05	0.6
Facultad Derecho	0:10	0.8
Facultad Filosofía y Letras	<b>0:14</b>	<b>1.5</b>
Facultad de Arquitectura	0:14	1.1
<b>Total</b>		<b>15.2</b>

Tabla 3.4. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la ruta Campus Central.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 3.5 se muestra el recorrido del Circuito Exterior. Los tiempos de servicio más variables dentro de esta ruta son para la DGSCA y para Trabajo Social, con la misma demanda pero con diferente tiempo debido a que al ser una Dirección General, en la DGSCA se tiene un mejor cuidado al depositar los residuos, sin embargo en Trabajo Social no es así ya que los residuos no son solo los provenientes del lugar, sino que se incluyen residuos externos que son depositados ahí. En el Anexo de Ingeniería y en la Alberca Olímpica sucede algo similar, tienen misma demanda pero diferentes tiempos de servicio; mientras que en el primer punto de recolección se complica por la gran cantidad de personas que se transitan por ahí, en el segundo, el problema son los automóviles que en ocasiones dificultan el acceso al estacionamiento de la Alberca Olímpica.

<b>Ruta Circuito Exterior</b>		
<b>Punto de Recolección</b>	<b>Tiempo de Servicio (min)</b>	<b>Demanda (m<sup>3</sup>)</b>
Relaciones Laborales	0:04	0.6
DGPUNAM	0:03	0.5
DGOyC	0:03	0.4
Anexo DGTIC	0:04	0.3
La Reja	0:02	0.5
DGSCA	<b>0:05</b>	<b>1.1</b>
Posgrado FCA	0:03	1.2
Comedor "el Cafesín"	0:03	0.6
FCA Estacionamiento	0:05	0.5
Trabajo Social	<b>0:08</b>	<b>1.1</b>
DGCCH	0:03	0.8
DGSM	0:02	0.9
Alberca Olímpica	<b>0:03</b>	<b>0.8</b>
Frontón Cerrado	0:02	0.4
Gimnasio Techado FCA	0:04	1.4
Anexo Ingeniería	<b>0:06</b>	<b>0.8</b>
Instituto Ingeniería	0:06	0.9
IMASS	0:05	1.2
Posgrado Ingeniería	0:08	0.8
DICyG	0:02	0.4
<b>Total</b>		15.2

Tabla 3.5. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 3.6 que corresponde al recorrido de la Ruta de los Institutos se observa que la DGAE y el CENDI tienen el mismo tiempo de servicio, sin embargo la cantidad recolectada es diferente. Esto se debe a que en el CENDI los contenedores se encuentran muy cerca del Circuito de Investigación Científica y moverlos hasta donde se estaciona el camión recolector resulta complicado porque en el Circuito pasan automóviles y el PumaBús, por lo que al vaciar los contenedores se debe tener precaución para evitar accidentes.

<b>Ruta de los Institutos</b>		
<b>Punto de Recolección</b>	<b>Tiempo de Servicio (min)</b>	<b>Demanda (<math>m^3</math>)</b>
Facultad Ciencias Políticas	0:03	0.8
CUEC	0:02	0.4
Filmoteca UNAM	0:02	0.3
Paradero CU	0:02	0.6
Ciclopista	0:01	0.4
DGAE	<b>0:03</b>	<b>0.8</b>
CENDI	<b>0:03</b>	<b>1.1</b>
Posgrado Odontología	0:01	0.4
Instituto Geografía	0:01	0.2
Instituto Geología	0:01	0.2
Instituto Física	0:02	1.2
Instituto de Química (Conjunto E)	0:02	0.3
Facultad Ciencias	0:08	1.5
Ciencias Nucleares	0:03	0.7
Instituto Materiales	0:05	0.5
Instituto Astronomía	0:02	0.5
Base GEOS	0:02	0.5
Instituto Química	0:04	0.6
Fisiología Celular	0:01	0.8
Ciencias del Mar	0:10	0.9
Psiquiatría y Salud Mental	0:03	0.7
Facultad Veterinaria	0:01	0.4
Inv. Antropológicas	0:03	0.5
Hospital Veterinario Banfield	0:01	0.1
Tienda UNAM	0:03	0.8
<b>Total</b>		<b>15.2</b>

Tabla 3.6. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta de los Institutos.

Fuente: Elaboración Propia

En la Ruta del Campus Central, en su recorrido vespertino (tabla 3.7), se observa que en cinco puntos se recoge la misma cantidad de residuos ( $1.5 m^3$ ) con diferentes tiempos de servicio. Como ya se explicó antes, esto se debe a que son puntos muy cercanos a los lugares más transitados dentro de Ciudad Universitaria. Los tiempos de recolección cambian mucho en los puntos marcados en negrita a pesar de ser la misma cantidad que se recoge, debido a cómo se encuentran los residuos, dentro o fuera de los contenedores, en bolsas, revueltos, etc.

<b>Ruta Campus Central Tarde</b>		
<b>Punto de Recolección</b>	<b>Tiempo de Servicio (min)</b>	<b>Demanda (m<sup>3</sup>)</b>
Facultad Psicología	0:05	2
Edificio E Facultad Odontología	<b>0:03</b>	<b>1.5</b>
Facultad Química	<b>0:03</b>	<b>1.5</b>
Facultad Medicina	0:01	0.5
Facultad Economía	0:06	0.5
Facultad Derecho	0:05	0.8
Facultad Filosofía y Letras	<b>0:04</b>	<b>1.5</b>
Facultad Arquitectura	<b>0:06</b>	<b>1.5</b>
Facultad Odontología Muela	0:04	0.5
Estacionamiento Faculta Medicina	0:03	0.8
Estacionamiento Faculta Química	<b>0:06</b>	<b>1.5</b>
CELE	0:05	0.5
Paseo Facultades	0:05	0.5
Facultad de Ingeniería	0:08	1.2
Rectoría	0:03	0.4
<b>Total</b>		<b>15.2</b>

Tabla 3.7. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta del Campus Central

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 3.8 que corresponde al recorrido de la Ruta de la Tarde, se observa que las cantidades de residuos son mayores que en los demás recorridos. Son los puntos que presentan mayor acumulación durante el día y requieren ser atendidos forzosamente dos veces al día.

<b>Ruta de la Tarde</b>		
<b>Punto de Recolección</b>	<b>Tiempo de Servicio (min)</b>	<b>Demanda (m<sup>3</sup>)</b>
Alberca Olímpica	0:05	2.2
Gimnasio Techado FCA	0:09	2.5
Anexo Ingeniería	0:02	1.9
Facultad de Veterinaria	0:05	2.3
Facultad Ciencias	0:06	2.5
Facultad Ciencias Políticas	0:14	2.4
Paradero CU	0:03	1.5
<b>Total</b>		<b>15.3</b>

Tabla 3.8. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta de la Tarde.

Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.3 Construcción de la base de datos

En esta sección se muestra la información que se obtuvo del trabajo de campo realizado. La información se organizó y se capturó en forma tabular y con ella se construyó la base de datos para exportarla a TransCAD y poder para realizar su análisis. Con la ayuda de un navegador GPS se guardó cada recorrido realizado y con puntos de control georreferenciados se marcaron los lugares que cada ruta visita, lo que da un total de 92 puntos; después se corrigieron los errores presentes en las vialidades digitalizadas como la sobre posición y la conectividad para formar la red que representa los circuitos de Ciudad Universitaria la cual se muestra en la tabla 3.9. La tabla de la Red Vial contiene un total de 902 registros y está formada por los siguientes campos: un ID el cual es el identificador que se le asigna a cada registro. La distancia de cada vialidad está en el campo *Length*, las unidades de esta distancia están en metros pero fue necesario cambiarla a kilómetros creando un nuevo campo para este dato el cual es el de *Distancia KM*. *Dir* indica el sentido de flujo de cada vialidad, tiene valores de 0, que indica que el flujo es en ambos sentidos de la vialidad, 1 y -1 para que el flujo sea en una sola dirección. El dato de velocidad se encuentra en la columna *Velocidad* y sus unidades están en kilómetros por hora. El tiempo se obtuvo con la ecuación  $v = \frac{d}{t}$  y se obtuvo en horas (*Tiempo Hr*) y se cambió a minutos dentro del campo *Time (min)*.

ID	Length	Dir	Nombre	Velocidad [km/h]	Tiempo [Hr]	Distancia KM	Time [min]
713	7.29	0	Acceso Alberca Olimpica	5	0.00146	0.0073	0.09
561	15.06	0	Acceso Anexo DG TIC	10	0.00151	0.0151	0.09
182	64.42	0	Acceso Anfiteatro	10	0.00644	0.0644	0.39
159	124.80	0	Acceso Antropológicas	10	0.01248	0.1248	0.75
250	143.71	0	Acceso Biomédicas	10	0.01437	0.1437	0.86
254	99.64	0	Acceso Biomédicas	10	0.00996	0.0996	0.60
511	95.99	0	Acceso Biomédicas	15	0.00640	0.0960	0.38
877	3.90	0	Acceso Biomédicas	5	0.00078	0.0039	0.05
876	2.78	0	Acceso Biomédicas	5	0.00056	0.0028	0.03
878	55.08	0	Acceso Biomédicas	10	0.00551	0.0551	0.33
184	95.09	1	Acceso CELE	15	0.00634	0.0951	0.38
486	7.94	0	Acceso CELE	10	0.00079	0.0079	0.05
530	75.92	0	Acceso CELE	10	0.00759	0.0759	0.46
600	26.05	0	Acceso CELE	10	0.00261	0.0261	0.16
703	29.12	0	Acceso CELE	5	0.00582	0.0291	0.35
218	16.77	0	Acceso CENDI	5	0.00335	0.0168	0.20
8	35.09	0	Acceso CEPE	10	0.00351	0.0351	0.21
213	80.60	0	Acceso CUEC	10	0.00806	0.0806	0.48
72	78.40	0	Acceso Campos Deportivos	15	0.00523	0.0784	0.31
470	175.23	0	Acceso Campos Deportivos	15	0.01168	0.1752	0.70
471	39.07	0	Acceso Campos Deportivos	15	0.00260	0.0391	0.16
472	120.55	0	Acceso Campos Deportivos	15	0.00804	0.1206	0.48
473	161.37	0	Acceso Campos Deportivos	15	0.01076	0.1614	0.65
15	70.76	0	Acceso Campus Central	12	0.00590	0.0708	0.35
16	34.63	0	Acceso Campus Central	10	0.00346	0.0346	0.21

Tabla 3.9. Tabla de la Red Vial.

Fuente: Elaboración Propia.



La siguiente tabla que se creó fue la que contiene información acerca del Depósito (tabla 3.10), que es el lugar de donde salen y llegan los camiones recolectores que son los Talleres de Conservación. Esta tabla sólo contiene un registro ya que es el único depósito dentro de Ciudad Universitaria. Contiene los siguientes campos: ID; que es el identificador que se le asignó al punto, *Longitude* y *Latitude* que contienen las coordenadas geográficas del punto. *Name* que indica el nombre del punto, *Open Time* y *Close Time* que son los horarios de apertura y cierre, respectivamente, del punto.

ID	Longitude	Latitude	Name	[Open Time]	[Close Time]	Node_ID
5	-99191177	19335382	Talleres de Conservación	600	1200	1

Tabla 3.10. Tabla con la información del Depósito.

Fuente: Elaboración Propia.

La última tabla es la de *Stops* (tabla 3.11), la cual contiene 92 registros correspondientes a los puntos que se atienden en Ciudad Universitaria. Esta tabla contiene los siguientes campos: un identificador único para cada punto (ID), las coordenadas de cada punto se encuentran en los campos de *Longitude* y *Latitude*. El nombre de cada punto se encuentra en *Name*, el horario de cierre y apertura de cada punto o ventanas de tiempo se encuentran en los campos de *Open Time* y *Close Time* respectivamente. *Node ID* es el identificador del nodo de la red más cercano al depósito. *Fixed Time* es el tiempo mínimo, en minutos, que se requiere para atender a un punto. *Unit Time* es el tiempo de servicio que se requiere, en minutos, por cada unidad de demanda. *Total Time Stop* es el tiempo total que se requiere para atender un punto. *Pickup Demand* es la demanda a recolectar en un punto. *Delivery Demand* que es la demanda a distribuir en un punto.



### 3.6.4 Solución del Problema de Recolección de Basura en TransCAD

Para resolver el problema planteado se utilizó TransCAD con la ayuda del módulo *Routing/Logistics* el cual tiene una serie de opciones para resolver el VRP. En este caso se utilizó la opción de *Pickup and Delivery* ya que en el problema planteado primero se recolectan los residuos y una vez que el camión ha alcanzado su capacidad máxima, éste se dirige al Centro de Transferencia a “distribuir” el total recolectado, para después terminar el recorrido en los Talleres de Conservación. La técnica empleada para dar solución al problema es desconocida, ya que el programa produce una solución pero no se sabe qué tipo de técnica o algoritmo utiliza para hacerlo sin embargo se obtuvieron buenos resultados una vez que se resolvió el Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo en TransCAD son los siguientes:

Primero se utiliza el módulo de *Routing/Logistics* y se siguen los pasos descritos a continuación:

Se accede a la opción de *Vehicle Routing...* (Figura 3.9)

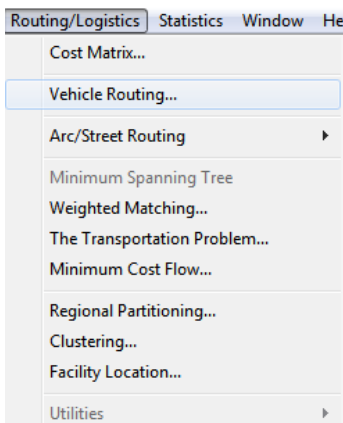


Figura 3.9. Opción de Routing/Logistics en TransCAD.

Para este problema se utiliza la opción de *Mixed Pick Up and Delivery* (figura 3.10) ya que una vez que el camión termina su recorrido, tiene que ir al centro de transferencia y tirar la basura para poder regresar a los Talleres de Conservación.

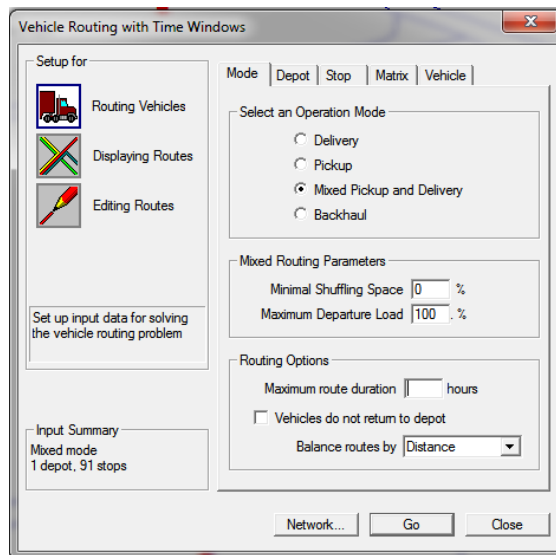


Figura 3.10. Módulo para resolver el VRPTW en TransCAD

En la Pestaña *Depot* (figura 3.11) se le indica al programa los datos del depósito del cual deben salir y llegar todos los vehículos.



Figura 3.11. Pestaña Depot dentro del módulo para resolver el VRPTW en TransCAD

La siguiente pestaña es la de *Stop* (figura 3.12) en donde se debe indicar cuáles serán los puntos que visitará cada ruta, así como la hora en que abren y cierran, los tiempos de servicio y lo más importante, la cantidad que se va a recoger (Pickup) y la cantidad a entregar (Delivery).

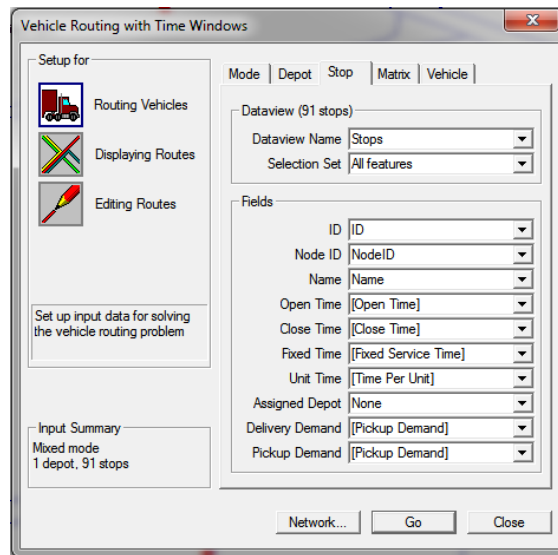


Figura 3.12. Pestaña Stop dentro del módulo para resolver el VRPTW en TransCAD

La siguiente pestaña es la de *Matrix* (figura 3.13) en donde se debe crear la matriz de ruteo. Cuando se crea la matriz en base a la red, TransCAD calcula el tiempo y la distancia entre cada par de *Stops* y entre el depósito y los *Stops* calculando la ruta más corta entre ellos. Para este problema se creó la matriz con base en la red que se obtuvo del navegador GPS y que posteriormente se corrigió.

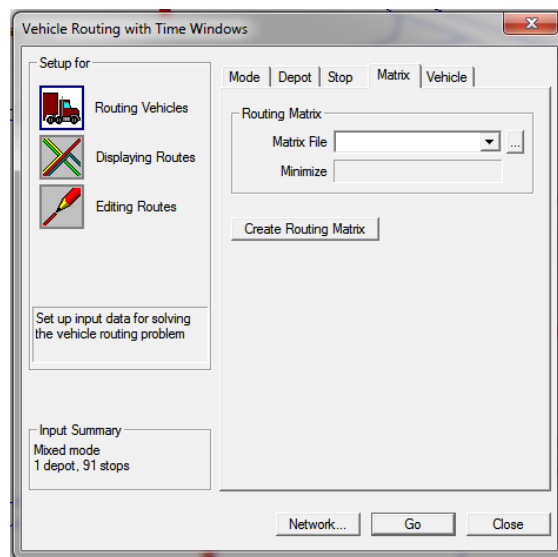


Figura 3.13. Pestaña Matrix dentro del módulo para resolver el VRPTW en TransCAD

Finalmente se crea la tabla de vehículos (figura 3.14) la cual contiene información específica acerca de la flota de vehículos disponibles en el depósito.

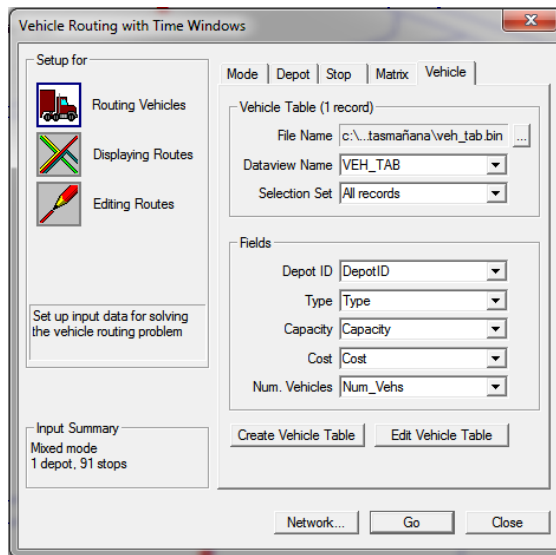


Figura 3.14. Pestaña *Vehicle* dentro del módulo para resolver el VRPTW en TransCAD

Para finalizar, se da clic en *Go* y se guardan los archivos con un nombre apropiado y en la ubicación deseada (figura 3.15).

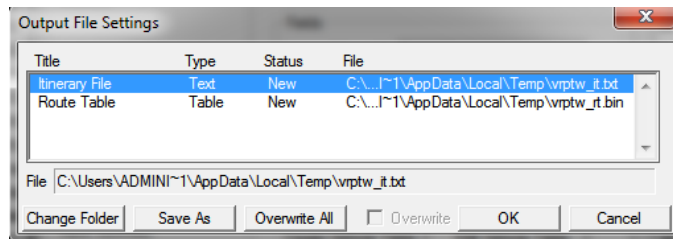


Figura 3.15. Output File Settings en TransCAD

## **Capítulo 4. Mejoras al Sistema de Recolección de Residuos Sólidos en Ciudad Universitaria**

En este capítulo se describe el análisis de la información descrita en el capítulo anterior. En primer lugar se obtuvo una solución inicial para los recorridos matutinos y vespertinos de residuos inorgánicos, dejando que el sistema determinara las rutas entre todos los puntos. Se presenta esta solución junto con los inconvenientes que presenta comparándola con la situación actual. Después se generó una solución a nivel individual, es decir, tomando el grupo de puntos pertenecientes a cada recorrido y estableciendo sus respectivas ventanas de tiempo. Aquí se crearon rutas para cada uno de los grupos de puntos que forman parte de las rutas actuales, y se incluyó la restricción adicional en dos rutas de la mañana de tener que ir al centro de transferencia a dejar la basura recolectada el día anterior por la tarde. La tercera solución se enfocó principalmente en la Ruta Deportiva en donde se modificaron horarios de acceso y ventanas de tiempo para encontrar una buena solución que mejorara el recorrido actual. Un último escenario se realizó sobre la ruta del Circuito Exterior buscando con la modificación realizada, que todos los recorridos tuvieran un balance en su tiempo total de recorrido.

### **4.1 Solución inicial al problema de Recolección de Residuos**

En esta primera solución se consideraron únicamente los seis recorridos de la basura inorgánica, cuatro matutinos y dos vespertinos. Utilizando la información contenida en la base de datos y utilizando TransCAD se resolvió el problema de Rutas de Vehículos. Se obtuvieron dos grupos de soluciones, en la primera se utilizaron los 85 puntos que visitan los recorridos actuales por la mañana, obteniendo cuatro rutas, y en el segundo grupo se obtuvieron dos rutas vespertinas. En las siguientes secciones se explican más a detalle estas soluciones.

#### 4.1.1 Rutas Matutinas

Para la solución inicial de los recorridos matutinos se utilizó la información de la tabla 4.1, en donde se muestran los puntos que se utilizaron así como las ventanas de tiempo de cada uno de ellos las cuales se obtuvieron durante el trabajo de campo. Con base en la información obtenida durante el trabajo de campo, la duración de los recorridos actuales por la mañana no excede de las 11:30 hrs; tomando en cuenta ese límite de horario, las ventanas de tiempo para la mayoría de los puntos fueron establecidas en un horario de 6:00 12:00 hrs., excepto para el AAPAUNAM, el Anexo DGTIC, la Ciclopista, la Alberca Olímpica, el Anfiteatro y la Base GEOS, ya que en esos puntos se debe recoger forzosamente antes de las 9:00 hrs para evitar encontrar los estacionamientos llenos de autos, lo que impediría el libre acceso hasta el punto en cuestión.

Nombre	Name	[Open Time]	[Close Time]	[I
AAPAUNAM	1	600	630	
Anexo DGTIC	3	630	700	
Ciclopista	12	700	730	
Alberca Olímpica	2	730	800	
Anfiteatro	5	820	830	
Base GEOS	6	800	830	
Hospital Banfield	45	800	900	
Tienda UNAM	81	600	1200	
Dirección General de Proveduría	23	600	1200	
Relaciones Laborales	77	600	1200	
DGOyC	19	600	1200	
Semirario de Estudios de La Facultad de Medicina	79	600	1200	
Comisiones Mixtas	15	600	1200	
DGAyR	17	600	1200	
Posgrado FFyL	68	600	1200	
UDUAL	83	600	1200	
Estacionamiento 2	25	600	1200	
La Barredora	59	600	1200	
Exreposito de Atletas	29	600	1200	
Rectoria	76	600	1200	
Medicina del Deporte	62	600	1200	
Pista el Tartan	66	600	1200	
Multifamiliar	63	600	1200	
DGCCCH	18	600	1200	
DGSM	21	600	1200	
Facultad de Arquitectura	30	600	1200	
Facultad de Filosofía y Letras	35	600	1200	
Facultad de Derecho	33	600	1200	
CEPE	9	600	1200	
Posgrado de Derecho	70	600	1200	
Facultad de Psicología	38	600	1200	
Edificio E Facultad de Odontología	24	600	1200	
La Muela Facultad de Odontología	60	600	1200	
Facultad de Química	39	600	1200	

Tabla 4.1. Ventanas de tiempo utilizadas en la solución inicial para los recorridos matutinos





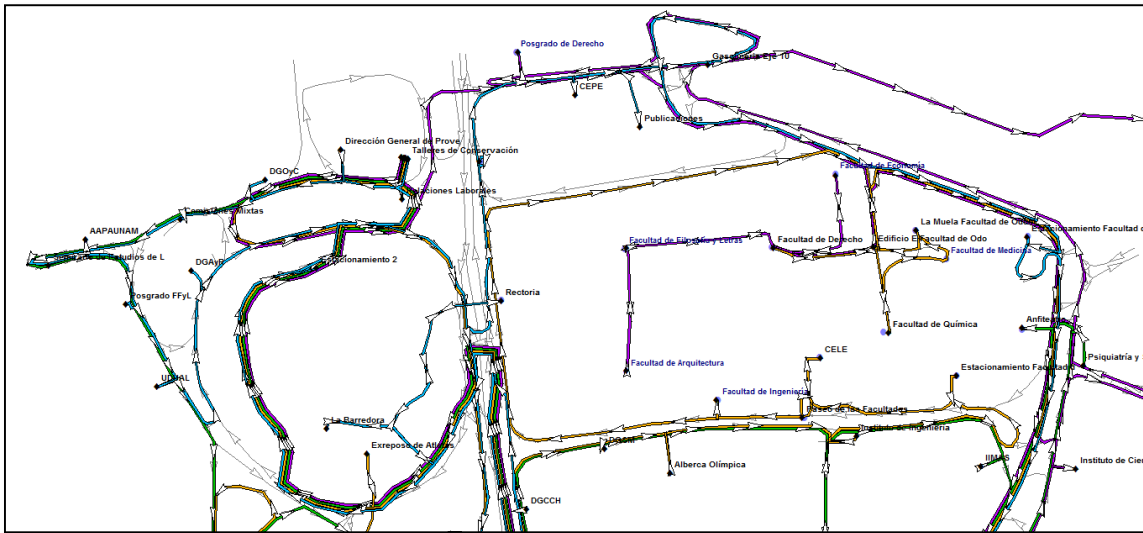


Figura 4.2. Zona norte de la Universidad. Fuente: Elaboración Propia.

En la parte central de la Universidad (figura 4.3) se observa que se siguen partes de algunos de los recorridos actuales, sólo que toman otros puntos para así crear una nueva ruta. En la zona de los Institutos dos recorridos visitan esa zona, que son la ruta de color morado y la verde. En la situación actual, una sola ruta se utiliza para la recolección en esa zona.

En la figura 4.4 se observa que dos rutas son las que atienden la demanda de los puntos ubicados dentro del Jardín Botánico, que son las de color verde y amarillo. Actualmente, la ruta Deportiva es la encargada de visitar esos tres puntos que están dentro del Jardín Botánico.

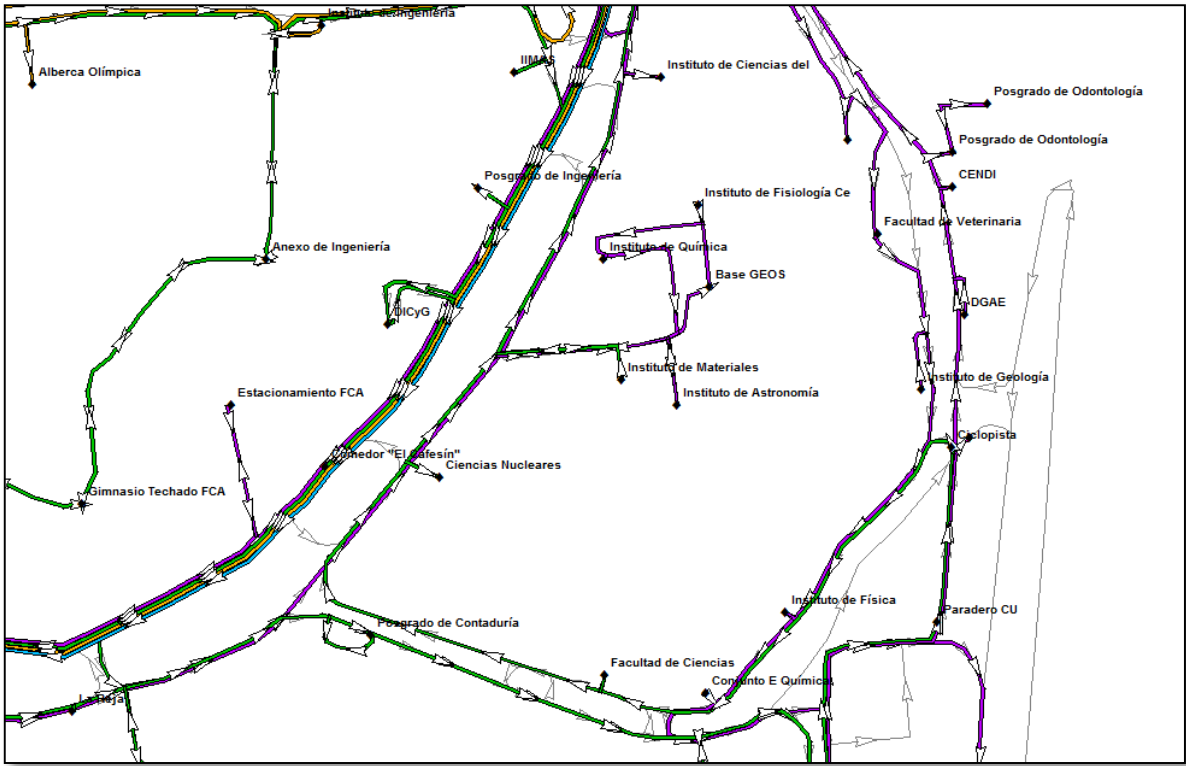


Figura 4.3. Recorridos en la parte central de la Universidad en la solución inicial.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 4.4. Acercamiento a la zona del jardín botánico.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 4.5 se muestra la zona central de la Universidad; se observa que los puntos ubicados dentro de Las Islas y la explanada de Química y Medicina son recorridos por dos rutas, de color morado y amarillo. Actualmente, sólo una ruta hace este recorrido, que es la del Campus Central.

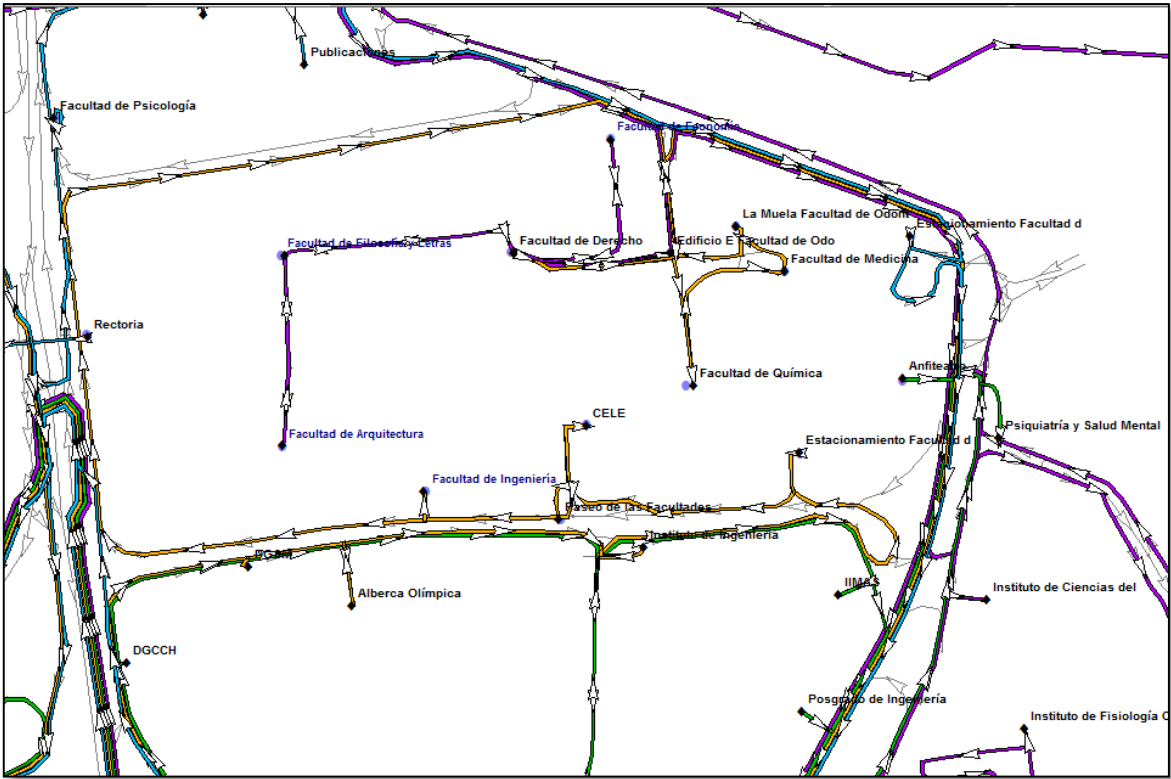


Figura 4.5. Acercamiento a la zona central de la Universidad para las rutas de la mañana.

Fuente: Elaboración Propia.

Las cuatro rutas obtenidas es esta primera solución inicial cumplen con que: salen de los Talleres de Conservación, realizan la recolección en Ciudad Universitaria, van al Centro de Transferencia (figura 4.6) a vaciar los camiones, y regresan a los Talleres.

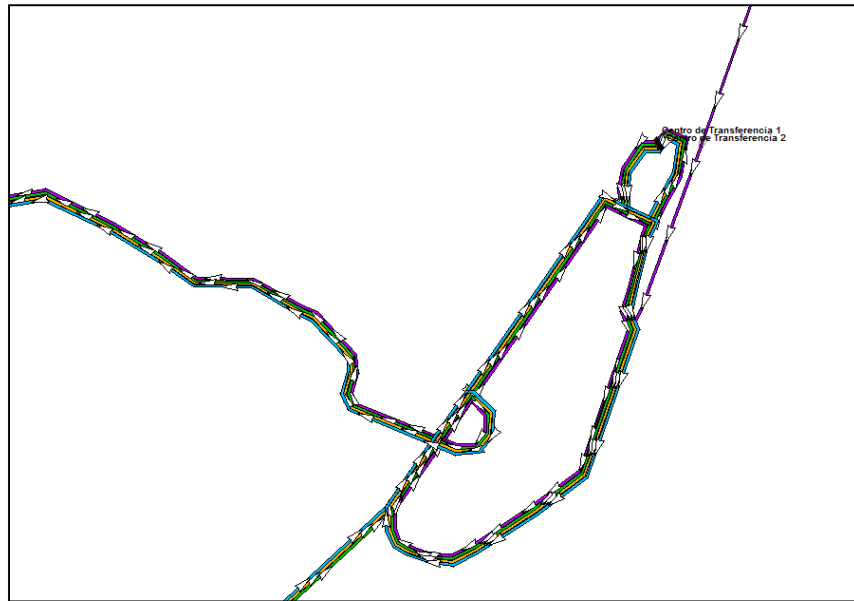


Figura 4.6. Centro de Transferencia de Tlalpan.

Fuente: Elaboración Propia.

En las tablas (4.2) – (4.5) se muestran los puntos que recorren las nuevas rutas. Cada tabla contiene el nombre del recorrido, el tiempo y la distancia total recorrida, la capacidad que tiene el camión y la carga de salida, que en este caso siempre será cero. Las columnas están organizadas de la siguiente manera: *No.* Indica la secuencia en que se visitan los puntos; *Nombre* es el identificador de cada punto; *Llegada* es el tiempo en que el camión arriba al punto; *Salida* el tiempo en el que sale del punto; *Distancia* la distancia recorrida de un punto a otro (en metros); *Recolección* es la cantidad de residuos que se recogen del punto (en metros cúbicos); y *Distribución* es la cantidad que se deja en cada punto (en metros cúbicos), que para este problema sólo se hace en el Centro de Transferencia cuando el camión llega a su capacidad.

Reporte de Itinerario						
Ruta 1		Tiempo Total: 4:33 hrs		Capacidad: 15.3 m <sup>3</sup>		
Color Morado		Distancia Total: 67198.1 m		Carga de Salida: 0		
No.	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		6:46am			
<b>1</b>	Facultad de Filosofía y Letras	6:55am	7:13am	2716.2	1.5	--
<b>2</b>	Facultad de Arquitectura	7:14am	7:29am	243.4	1.1	--
<b>3</b>	Facultad de Economía	7:34am	7:38am	833.4	0.6	--
<b>4</b>	Instituto de Geografía	7:47am	7:48am	1948.5	0.2	--
<b>5</b>	Facultad de Veterinaria	7:50am	7:51am	277.3	0.4	--
<b>6</b>	Instituto de Geología	7:53am	7:54am	244.4	0.2	--
<b>7</b>	Instituto de Física	7:55am	7:58am	530.6	1.2	--
<b>8</b>	Conjunto E Química	7:58am	8:00am	185	0.3	--
<b>9</b>	Tienda UNAM	8:02am	8:05am	940.5	0.8	--
<b>10</b>	Facultad de Ciencias Políticas	8:16am	8:19am	4709	0.8	--
<b>11</b>	Filmoteca UNAM	8:23am	8:24am	1109.3	0.3	--
<b>12</b>	Hospital Banfield	8:27am	8:28am	860.6	0.1	--
<b>13</b>	DGAE	8:29am	8:32am	314.8	0.8	--
<b>14</b>	CENDI	8:33am	8:36am	195.3	1.1	--
<b>15</b>	Posgrado de Odontología	8:37am	8:38am	218.2	0.4	--
<b>16</b>	Posgrado de Odontología	8:39am	8:40am	125.2	0	--
<b>17</b>	Estacionamiento FCA	8:46am	8:50am	1845.8	0.5	--
<b>18</b>	Anexo DGTIC	8:54am	8:56am	1056.3	0.3	--
<b>19</b>	Instituto de Astronomía	9:00am	9:02am	1174.6	0.5	--
<b>20</b>	Base GEOS	9:02am	9:04am	184.9	0.5	--
<b>21</b>	Fisiología Celular	9:04am	9:07am	105.1	0.8	--
<b>22</b>	Instituto de Química	9:08am	9:11am	196.6	0.6	--
<b>23</b>	Instituto de Ciencias del Mar	9:13am	9:23am	884.4	0.9	--
<b>24</b>	Posgrado de Derecho	9:32am	9:33am	2165	0.5	--
<b>25</b>	Talleres de Zoquipa	9:57am	10:13am	17631.9	0.8	--
<b>26</b>	Centro de Transferencia	10:39am	10:55am	15901.6	--	15.3
<b>END</b>	Talleres de Conservación	11:19am		10599		
<b>Total</b>				<b>67198.1</b>	<b>15.2</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.2. Itinerario de la ruta número uno de la solución inicial

Fuente: Elaboración Propia.

Reporte de Itinerario						
Ruta 2		Tiempo Total : 3:20 hrs		Capacidad : 15.3 m <sup>3</sup>		
Color Verde		Distancia total: 42077.7 m		Carga de Salida: 0		
No	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		6:52am			
<b>1</b>	Seminario de Medicina	6:55am	6:56am	883.5	0.1	--
<b>2</b>	Cabaña	7:03am	7:05am	2799.2	0.1	--
<b>3</b>	Pista el Tartán	7:12am	7:13am	2495.4	0.1	--
<b>4</b>	Anexo de Ingeniería	7:19am	7:25am	2374.8	0.8	--
<b>5</b>	Frontón Cerrado	7:28am	7:30am	583.2	0.4	--
<b>6</b>	Gimnasio Techado FCA	7:31am	7:36am	116.5	1.4	--
<b>7</b>	IIMAS	7:40am	7:46am	1216.5	1.2	--
<b>8</b>	CUEC	7:56am	7:57am	3599.4	0.4	--
<b>9</b>	Paradero CU	8:00am	8:01am	772.5	0.6	--
<b>10</b>	Ciclopista	8:02am	8:03am	227.4	0.4	--
<b>11</b>	Facultad de Ciencias	8:05am	8:14am	650.2	1.5	--
<b>12</b>	Ciencias Nucleares	8:16am	8:18am	649.1	0.7	--
<b>13</b>	Instituto de Materiales	8:20am	8:21am	425.6	0.5	--
<b>14</b>	Psiquiatría y Salud Mental	8:24am	8:27am	953.4	0.7	--
<b>15</b>	Anfiteatro	8:28am	8:34am	205.2	1.3	--
<b>16</b>	Posgrado de Ingeniería	8:36am	8:44am	593.8	0.8	--
<b>17</b>	DICyG	8:45am	8:47am	323.7	0.4	--
<b>18</b>	Comedor "El Cafesín"	8:48am	8:50am	399.8	0.6	--
<b>19</b>	La Reja	8:54am	8:55am	1097	0.5	--
<b>20</b>	DGSCA	8:56am	9:01am	199.6	1.1	--
<b>21</b>	Posgrado de Contaduría	9:04am	9:07am	516.1	1.2	--
<b>22</b>	Investigaciones Antropológicas	9:10am	9:12am	736.9	0.5	--
<b>23</b>	Centro de Transferencia	9:32am	9:48am	9658.6	--	15.3
<b>END</b>	Talleres de Conservación	10:12am		10599		
<b>Total</b>				<b>42077.7</b>	<b>15.3</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.3. Itinerario de la ruta número dos de la solución inicial.

Fuente: Elaboración Propia

Reporte de Itinerario						
Ruta 3		Tiempo Total: 3:22 hrs		Capacidad: 15.3 m <sup>3</sup>		
Color amarillo		Distancia Total: 36410.3m		Carga de Salida: 0		
No	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		6:46am			
<b>1</b>	DGSM	6:52am	6:54am	2313.1	0.9	--
<b>2</b>	Alberca Olímpica	6:55am	6:58am	225.7	0.8	--
<b>3</b>	Instituto de Ingeniería	7:00am	7:06am	490.8	0.9	--
<b>4</b>	Estacionamiento Facultad Química	7:08am	7:13am	719.6	1.8	--
<b>5</b>	CELE	7:15am	7:21am	475.9	0.5	--
<b>6</b>	Paseo de las Facultades	7:22am	7:25am	164.3	0.6	--
<b>7</b>	Facultad de Ingeniería	7:26am	7:33am	318.7	0.8	--
<b>8</b>	Edificio E Odontología	7:38am	7:43am	1835.4	0.5	--
<b>9</b>	Facultad de Derecho	7:44am	7:52am	217.2	0.6	--
<b>10</b>	Facultad de Química	7:54am	7:59am	377.9	0.5	--
<b>11</b>	Facultad de Medicina	8:00am	8:04am	259.4	0.5	--
<b>12</b>	La Muela Facultad de Odontología	8:05am	8:12am	97.2	0.9	--
<b>13</b>	Trabajo Social	8:21am	8:29am	2556.1	1.1	--
<b>14</b>	Pumitas	8:32am	8:36am	1344.4	1	--
<b>15</b>	Ex reposo de Atletas	8:40am	8:42am	1105.6	0.5	--
<b>16</b>	Medicina del Deporte	8:43am	8:44am	245.2	0.6	--
<b>17</b>	Seminarios	8:51am	8:52am	2619.8	0.4	--
<b>18</b>	Jardín Botánico (Acceso)	8:55am	9:00am	735.1	0.9	--
<b>19</b>	Instituto de Biología	9:01am	9:03am	483.1	0.7	--
<b>20</b>	Investigaciones Biomédicas	9:06am	9:09am	490.9	0.7	--
<b>21</b>	Centro de Transferencia	9:27am	9:44am	8735	--	15.3
<b>END</b>	Talleres de Conservación	10:08am		10599		
<b>Total</b>				<b>36410.3</b>	<b>15.2</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.4. Itinerario de la ruta número tres de la solución inicial.

Fuente: Elaboración Propia



Reporte de Itinerario						
Ruta 4		Tiempo Total: 2:45 hrs		Capacidad: 15.3 m <sup>3</sup>		
Color Cian		Distancia Total: 32141.6 m		Carga de Salida: 0		
No	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		8:09am			
1	Relaciones Laborales	8:10am	8:13am	87.7	0.6	--
2	Dirección General de Proveeduría	8:14am	8:17am	201.1	0.5	--
3	DGOyC	8:18am	8:19am	306	0.4	--
4	Comisiones Mixtas	8:20am	8:22am	220.1	0.8	--
5	AAPAUNAM	8:22am	8:26am	246.1	0.9	--
6	Posgrado FFyL	8:28am	8:29am	463.3	0.6	--
7	UDUAL	8:30am	8:38am	230.8	1	--
8	DGAyR	8:39am	8:43am	485.6	0.6	--
9	Facultad de Psicología	8:45am	8:52am	1175.6	1.3	--
10	CEPE	8:53am	8:58am	415.7	0.9	--
11	Publicaciones	9:00am	9:02am	252.8	0.5	--
12	Gasolinera Eje 10	9:03am	9:06am	316.1	0.7	--
13	Estacionamiento Facultad	9:13am	9:18am	1466.6	1.5	--
14	DGCCH	9:25am	9:28am	2501	0.8	--
15	La Barredora	9:31am	9:35am	911.6	0.9	--
16	Rectoría	9:38am	9:40am	537.2	0.5	--
17	Estacionamiento 2	9:45am	9:48am	1403.1	0.9	--
18	Multifamiliar	9:52am	9:54am	1305.5	0.6	--
19	Planta Incineradora	9:56am	9:58am	706.8	1	--
20	Centro de Transferencia	10:14am	10:30am	8308.8	--	15.3
END	Talleres de Conservación	10:54am		10599		
<b>Total</b>				<b>32141.6</b>	<b>15</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.5. Itinerario de la ruta número cuatro de la solución inicial.

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.2 Rutas Vespertinas

Al ser sólo dos rutas vespertinas, la organización en la recolección en los principales puntos es más sencilla que la solución obtenida para la mañana. Los puntos que presentan mayor acumulación durante la tarde son visitados en una nueva ruta, que no se enfoca únicamente en éstos sino que abarca otros puntos sin excederse de la capacidad del camión. En la figura 4.7 se muestran las dos rutas del turno vespertino, en colores verde y morado.

En la tabla 4.6 se muestra la información que se utilizó para resolver el problema de Rutas de Vehículos en TransCAD, para los puntos que se visitan durante la tarde. Las ventanas de tiempo se fijan comenzando desde las 15:00 hrs teniendo como hora de término las 19:00 hrs, que son las horas de salida y de llegada del turno vespertino.

Name	[Open Time]	[Close Time]
Rectoría	1500	1900
Faculta de Arquitectura	1500	1900
Faculta de Filosofía y Letras	1500	1900
Facultad de Derecho	1500	1900
Facultad de Economía	1500	1900
Facultad de Psicología	1500	1900
"Edificio E" Facultad de Odontología	1500	1900
"La Muela" Facultad de Odontología	1500	1900
Facultad de Química	1500	1900
CELE	1500	1900
Paseo de las Facultades	1500	1900
Facultad de Ingeniería	1500	1900
Alberca Olímpica	1500	1900
"Estacionamiento" Facultad de Química	1500	1900
Facultad de Medicina	1500	1900
"Estacionamiento" Facultad de Medicina	1500	1900
Facultad de Veterinaria	1500	1900
Paradero CU	1500	1900
Facultad de Ciencias	1500	1900
Anexo Ingeniería	1500	1900
Gimnasio Techado FCA	1500	1900
Facultad de Ciencias Políticas	1500	1900

Tabla 4.6. Ventanas de tiempo utilizadas en la solución general para los recorridos vespertinos

Fuente: Elaboración Propia

Name	[Open Time]	[Close Time]
Rectoría	1500	1900
Faculta de Arquitectura	1500	1900
Faculta de Filosofía y Letras	1500	1900
Facultad de Derecho	1500	1900
Facultad de Economía	1500	1900
Facultad de Psicología	1500	1900
"Edificio E" Facultad de Odontología	1500	1900
"La Muela" Facultad de Odontología	1500	1900
Facultad de Química	1500	1900
CELE	1500	1900
Paseo de las Facultades	1500	1900
Facultad de Ingeniería	1500	1900
Alberca Olímpica	1500	1900
"Estacionamiento" Facultad de Química	1500	1900
Facultad de Medicina	1500	1900
"Estacionamiento" Facultad de Medicina	1500	1900
Facultad de Veterinaria	1500	1900
Paradero CU	1500	1900
Facultad de Ciencias	1500	1900
Anexo Ingeniería	1500	1900
Gimnasio Techado FCA	1500	1900
Facultad de Ciencias Políticas	1500	1900

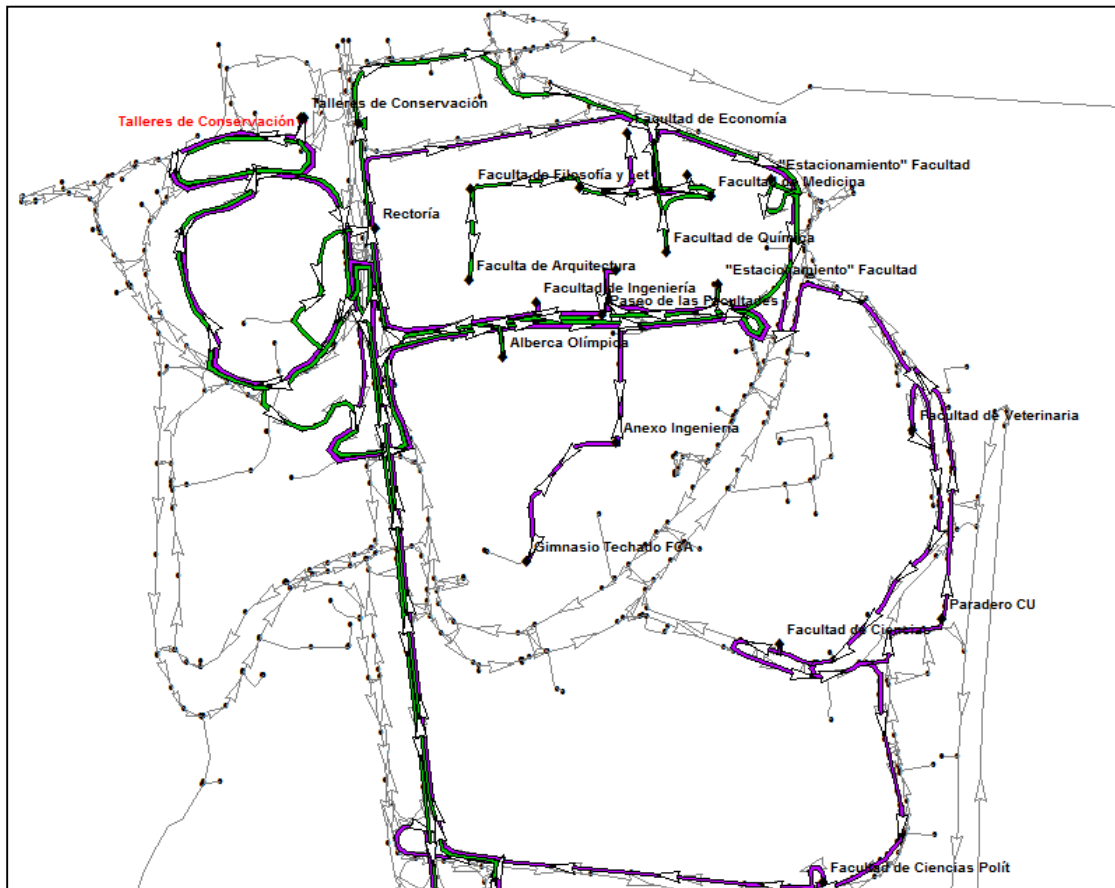


Figura 4.7. Recorrido de la ruta Deportiva

Fuente: Elaboración Propia

En la parte central de la Universidad (figura 4.8) se observa que dos rutas son las encargadas de la recolección en las Islas y la explanada de la Facultad de Medicina. Esta situación se ha presentado también en las soluciones matutinas.

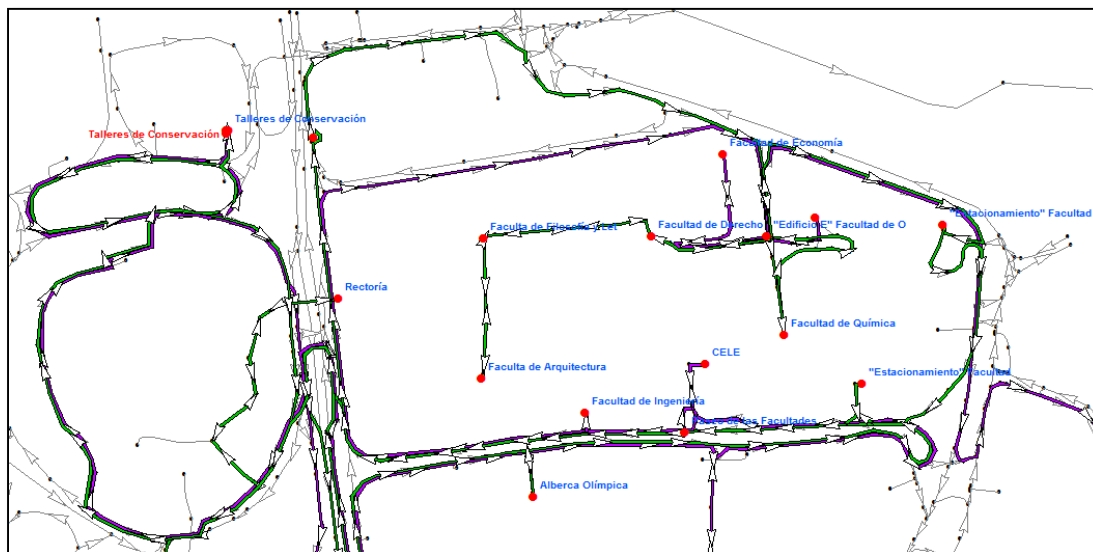


Figura 4.8. Recorrido de la Ruta Deportiva

Fuente: Elaboración Propia

Tres de los principales puntos en donde se registra la mayor acumulación de residuos, que son la Alberca Olímpica, el Anexo de Ingeniería y el Gimnasio Techado de la Facultad de Contaduría y Administración (figura 4.9), son atendidos dentro del recorrido satisfaciendo la demanda que presentan en un tiempo de nueve minutos para la Alberca (tabla 4.7), tres minutos para el Anexo, y 16 para el Gimnasio, como se observa en la tabla 4.8.

Reporte de Itinerario						
Ruta 1		Tiempo Total: 3:27		Capacidad: 15.3 m <sup>3</sup>		
Color Morado		Distancia Total: 33987.2 m		Carga de Salida: 0		
No	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		2:51pm			
1	Anexo Ingeniería	3:00pm	3:03pm	3056.6	2.2	--
2	Gimnasio Techado FCA	3:05pm	3:21pm	466.7	2.2	--
3	CELE	3:28pm	3:32pm	1757	0.4	--
4	Paseo de las Facultades	3:33pm	3:37pm	164.3	0.4	--
5	Facultad de Ingeniería	3:38pm	3:45pm	318.7	0.7	--
6	Facultad de Economía	3:54pm	3:57pm	2252.3	0.2	--
7	La Muela	4:01pm	4:04pm	541	0.5	--
8	Facultad de Ciencias	4:12pm	4:22pm	2688.3	2.2	--
9	Paradero CU	4:24pm	4:28pm	822.9	2.2	--
10	Facultad de Veterinaria	4:31pm	4:40pm	888.8	2.2	--
11	Facultad de Ciencias Políticas	4:44pm	5:07pm	1763.8	2.2	--
12	Centro de Transferencia	5:22pm	5:55pm	8675.2	--	15.3
END	Talleres de Conservación	6:18pm		10591.1		
<b>Total</b>				<b>33987.2</b>	<b>15.3</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.7. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta de la Tarde.

Fuente: Elaboración Propia

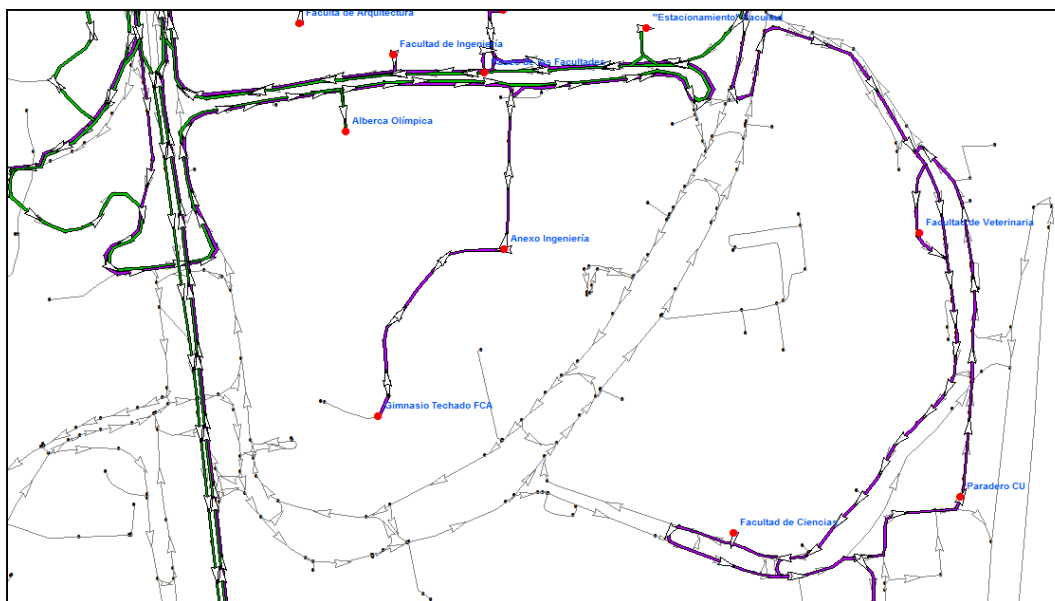


Figura 4.9. Recolección en tres de los puntos de mayor demanda.

Fuente: Elaboración Propia

Ruta 2		Tiempo Total: 2:49		Capacidad: 15.3 m <sup>3</sup>		
Color Verde		Distancia Total: 31683.9 m		Carga de Salida: 0		
No	Nombre	Llegada	Salida	Distancia m	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		2:54pm			
<b>1</b>	Rectoría	3:00pm	3:03pm	1845.4	0.5	--
<b>2</b>	Alberca Olímpica	3:10pm	3:19pm	2062.2	2.2	--
<b>3</b>	Facultad de Psicología	3:25pm	3:31pm	2464.2	1.5	--
<b>4</b>	Facultad de Derecho	3:37pm	3:41pm	1414.7	0.8	--
<b>5</b>	Faculta de Filosofía y Letras	3:42pm-	3:47pm	313.7	1.5	--
<b>6</b>	Faculta de Arquitectura	3:49pm	3:55pm	243.4	0.9	--
<b>7</b>	Facultad de Química	3:59pm	4:03pm	935.1	1.5	--
<b>8</b>	Facultad de Medicina	4:05pm	4:08pm	259.4	1.5	--
<b>9</b>	Edificio E Odontología	4:08pm	4:12pm	172	1.5	--
<b>10</b>	Estacionamiento de Medicina	4:15pm	4:19pm	664.2	1.5	--
<b>11</b>	Estacionamiento de Química	4:22pm	4:30pm	698.9	1.5	--
<b>12</b>	Centro de Transferencia	4:48pm	5:20pm	10018.9	--	15.3
<b>D</b>	Talleres de Conservación	5:44pm		10591.1		
<b>al</b>	Total			<b>31683.9</b>	<b>14.9</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.8. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta de la Tarde.

Fuente: Elaboración Propia

El último punto que recorre la ruta de color morado de la tarde es la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales (figura 4.10). Una vez que se hizo la recolección, el camión se dirige al Centro de Transferencia a tirar los residuos; aunque la gente encargada de los camiones prefiere hacerlo a la mañana siguiente, ya que les toma mucho tiempo esperar su turno para vaciar el camión dentro del Centro de Transferencia; sin embargo, para la solución vespertina presentada en esta sección, una vez que se termina de hacer la recolección, se asume que el camión se dirige hacia el Centro de Transferencia a tirar los residuos, como se muestra en la figura 4.11.

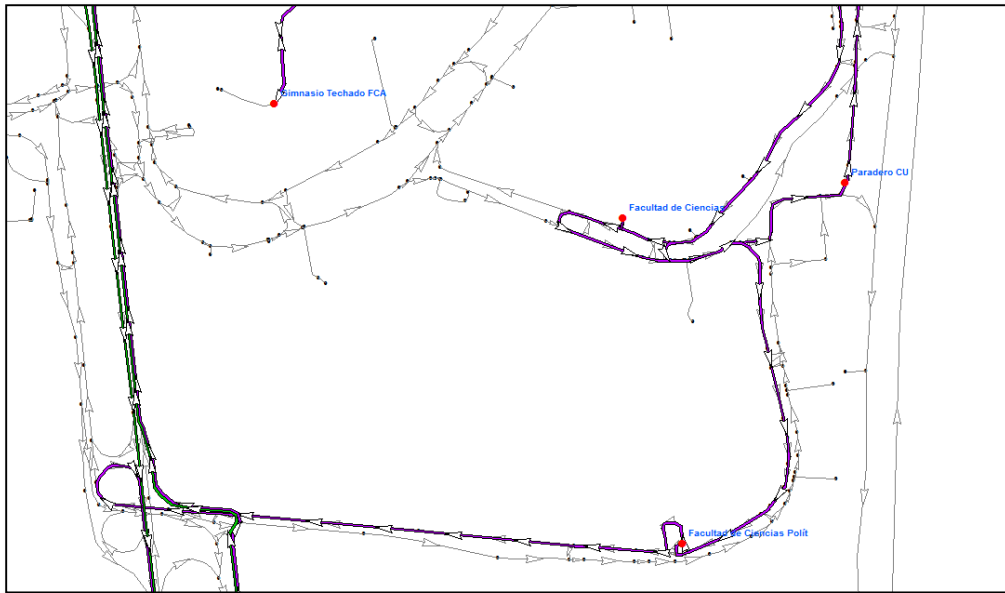


Figura 4.10. Recorrido de la ruta Deportiva

Fuente: Elaboración Propia

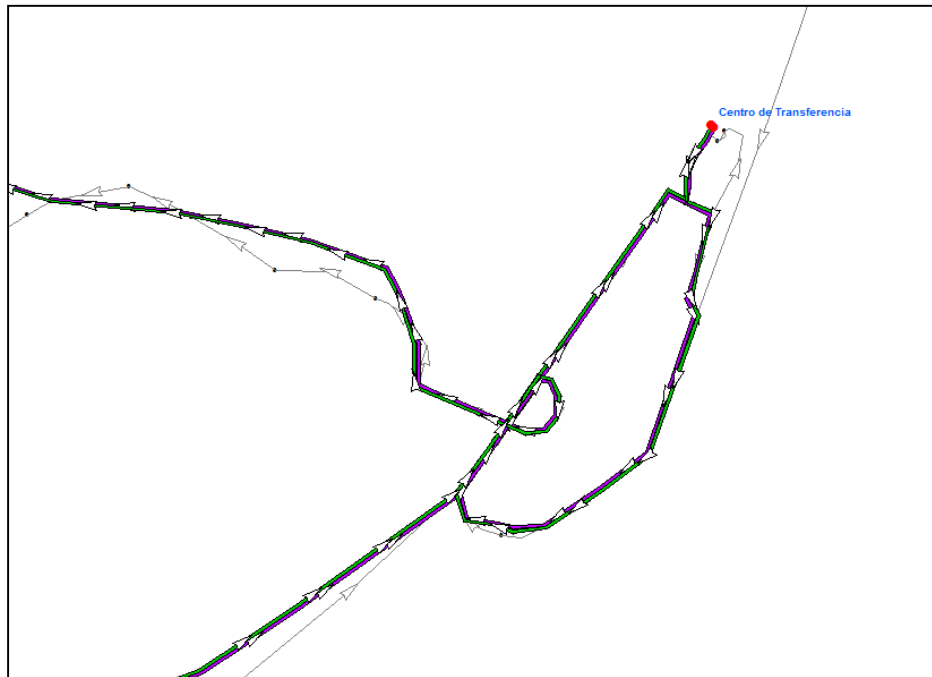


Figura 4.11. Recorrido de la ruta Deportiva

Fuente: Elaboración Propia.

En la primera ruta se cubren seis de los siete puntos que presentan mayor acumulación de residuos durante la tarde.

Durante el recorrido de la segunda ruta vespertina se visita la Alberca Olímpica, que también presenta grandes acumulaciones de residuos, y se visitan puntos de media-alta concentración como las Facultades de Psicología, Filosofía y Letras, Química, Medicina, etc.

#### 4.1.3 Resumen de la solución inicial (mañana y tarde)

En las tablas 4.9 y 4.10 se muestran los resultados de cada uno de los itinerarios. En ellas se encuentra la distancia y el tiempo total de los cuatro recorridos. Para las cuatro rutas de residuos inorgánicos.

<b>Rutas Inorgánicas</b>					
<b>Ruta</b>	<b>Tiempo Inicio</b>	<b>Tiempo Fin</b>	<b>Tiempo Total (Horas)</b>	<b>Distancia Total (km)</b>	<b>Puntos Visitados</b>
<b>1</b>	6:46	11:19	4:33	67.1981	25
<b>2</b>	6:52	10:12	3:20	42.0777	22
<b>3</b>	6:46	10:08	3:22	36.4103	20
<b>4</b>	8:09	10:54	2:45	32.1416	19
<b>Total</b>			<b>14:00</b>	<b>177.8277</b>	<b>86</b>

Tabla 4.9. Resumen de los cuatro recorridos matutinos de la solución inicial.

Fuente: Elaboración Propia.

<b>Rutas Inorgánicas Tarde</b>					
<b>Ruta</b>	<b>Tiempo Inicio</b>	<b>Tiempo Fin</b>	<b>Tiempo Total (Horas)</b>	<b>Distancia Total (km)</b>	<b>Puntos Visitados</b>
<b>1</b>	2:51	6:18	3:27	33.9872	12
<b>2</b>	2:54	5:44	2:50	31.6839	12
<b>Total</b>			<b>6:17</b>	<b>65.6711</b>	<b>24</b>

Tabla 4.10. Resumen de los cuatro recorridos vespertinos de la solución inicial.

Fuente: Elaboración Propia



#### 4.1.4 **Inconvenientes de las soluciones iniciales de la mañana y tarde**

Una vez que se obtuvieron las dos soluciones llamadas iniciales, se realizó un análisis de éstas. Para la solución de la mañana, se observa que en la parte central del campus se traslapan dos rutas que realizan la recolección, lo cual es un inconveniente para los choferes de los camiones recolectores ya que actualmente es uno solo el encargado de realizar la visita a esa zona de la Universidad (figura 4.18). También se observa que para llegar a los Talleres de Conservación, los cuatro camiones utilizan una vialidad que forma parte del recorrido del PumaBus, donde además se encuentran los estacionamientos dos, tres, cuatro y cinco, y no está permitido el paso de este tipo de unidades. El camino que actualmente utilizan los camiones de basura para llegar a los Talleres, es por el Circuito Escolar 2 que es el que rodea al Estadio Olímpico Universitario.

Otro problema que se observa es que los puntos dentro del Jardín Botánico son visitados igualmente por dos rutas traslapadas. Aquí el inconveniente es que en esa zona hay una gran cantidad de personas que visitan el lugar, ya sea para realizar actividades recreativas o de esparcimiento, y el permitir el acceso a dos camiones al lugar sería muy riesgoso. La zona del Jardín Botánico es visitada actualmente por la Ruta Deportiva y el chofer encargado debe ser muy cuidadoso al momento de hacer la recolección ya que el camino hacia los contenedores es muy angosto y las maniobras resultan complicadas.

En la tabla 4.11 se muestra la comparación de las Rutas Actuales contra la Solución Inicial para los recorridos de la mañana. Se observa que la diferencia en los tiempos de recorridos sigue siendo menor que en la situación actual, y que la Ruta Deportiva tiene casi la misma duración que la Ruta de color Morado ya que la distancia total recorrida considera que ese recorrido visita los Talleres de Zoquipa (fuera de Ciudad Universitaria). Los tiempos de recorrido disminuyeron en la solución inicial, excepto en la Ruta de color Verde la cual, si se compara con la del Circuito Exterior, aumentó casi una hora. Es importante señalar que esta tabla es para fines comparativos, pero las rutas de la solución inicial no incluyen la restricción de ir por la mañana a dejar la basura recogida en la tarde, para dos de las rutas.

Rutas Actuales			Solución Inicial		
	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)		Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)
<b>Ruta Deportiva</b>	4:58	70.3	<b>Ruta1: Morada</b>	4:33	67.2
<b>Ruta Campus Central</b>	4:46	36	<b>Ruta 2: Amarilla</b>	3:20	42.1
<b>Ruta Circuito Exterior</b>	2:28	16.8	<b>Ruta 3: Verde</b>	3:22	36.4
<b>Ruta de los Institutos</b>	4:09	47.4	<b>Ruta 4: Cian</b>	2:45	32.1
<b>TOTAL</b>	<b>16:21</b>	<b>170.5</b>	<b>Total</b>	<b>14:00</b>	<b>177.8</b>

Tabla 4.11. Resumen de los recorridos matutinos. Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 4.12 se muestra la comparación de las rutas actuales y la solución inicial para los recorridos de la tarde. En esta tabla las diferencias, tanto en la distancia y el tiempo, son muy grandes. Esto se debe a que en la solución inicial, una vez que el camión termina la recolección éste se dirige al Centro de Transferencia cuando en la situación actual no es así.

Situación Actual			Solución Inicial		
	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)		Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)
<b>Ruta Tarde</b>	1:46	15.9	<b>Ruta 1: Morada</b>	3:27	34.0
<b>Ruta Campus Central</b>	2:33	14	<b>Ruta 2: Verde</b>	2:50	31.7
<b>Total</b>	<b>04:19</b>	<b>29.9</b>	<b>Total</b>	<b>06:17</b>	<b>65.8</b>

Tabla 4.12. Resumen de los recorridos matutinos. Fuente: Elaboración Propia.

## 4.2 Solución para los grupos de puntos actuales

En esta sección se describe la segunda solución obtenida para los ochos recorridos. Se resolvió el Problema de Rutas de Vehículos para cada grupo de puntos que actualmente recorre cada ruta, estableciendo ventanas de tiempo de manera muy estricta a determinados puntos los cuales, como menciona el personal encargado de la recolección, tienen que ser atendidos antes que otros para evitar conflictos, principalmente el de estacionamientos llenos. Dentro de esta solución se incluyen también los recorridos de la basura orgánica, mañana y tarde.

Estas soluciones tienen rutas que sí consideran que dos camiones que tienen recolección en la tarde, no van a dejar la basura al centro de transferencia después de su recorrido por la tarde, sino hasta la mañana siguiente.

La figura 4.12 muestra los 85 puntos actuales que visitan los recorridos matutinos. Son cuatro grupos de puntos en diferentes colores; el color azul corresponde a los puntos que visita la Ruta Deportiva; los de color naranja a los de la Ruta del Circuito Exterior, los verdes a la Ruta del Campus Central y los Amarillos de la Ruta de los Institutos.

Se observa que los puntos asignados para cada recorrido están agrupados por zona. La ruta del Campus Central se encarga de atender la zona del Circuito Escolar en donde se encuentran la mayoría de las Facultades y también los contenedores de Las Islas. La Ruta de los Institutos atiende el Circuito de Investigación Científica y la zona de los Institutos; en el Circuito Mario de la Cueva, muy cerca del Centro Cultural Universitario, visita la Facultad de Ciencias Políticas, el CUEC y la Filmoteca de la UNAM. La Ruta del Circuito Exterior comienza la recolección en el Circuito Escolar 2, comenzando por tres de los puntos más cercanos a los Talleres de Conservación que son: Relaciones Laborales, la Dirección General de Proveduría y la Dirección General de Obras y Conservación, para después seguir hacia el anexo DGTIC, la Reja, DGSCA, y el Posgrado de Contaduría que están ubicados en el Circuito Escolar. La ruta continúa la recolección por el mismo Circuito pero del lado de la Alberca Olímpica, entrando por el Estacionamiento del Campo de Fútbol Americano para dirigirse al Anexo de Ingeniería, El Gimnasio Techado de FCA y El Frontón Cerrado visitando,

antes de salir de ésta zona, el Instituto de Ingeniería. El recorrido sigue por el Circuito Escolar hacia el IIMAS y el último punto que visita es la DICyG. La Ruta Deportiva comienza su recorrido con los puntos ubicados sobre el Circuito Escolar 2, AAPAUNAM, Seminario de Medicina, el Posgrado de FFyL, y el UDUAL y de ahí hacia la zona de los campos deportivos Pumitas y entrando por el camino que va al Ex reposo de Atletas atendiéndolo junto con Medicina del Deporte. La siguiente zona en la que la ruta hace la recolección es la del Jardín Botánico y al salir pasa por los Institutos de Biología y el de Investigaciones Biomédicas y después se dirige hacia el Estadio Olímpico Universitario visitando la Barredora y el Estacionamiento 2. Cuando el recorrido deja la zona del Estadio Olímpico éste continúa por Eje 10 y recolecta los residuos del CEPE, Publicaciones y la Gasolinera para seguir hacia los Talleres de Zoquipa ubicados en Calzada de la Viga.

Como se observa en la figura 4.12 Relaciones Laborales, la Dirección General de Proveeduría y la Dirección General de Obras y Conservación se encuentran dentro del Circuito Escolar 2 que es por donde la Ruta Deportiva (color azul) inicia su recorrido; estos puntos podrían ser atendidos por esta ruta ya que están cerca de los primeros puntos que atiende, sin embargo estos tres puntos están asignados a la Ruta del Circuito Exterior porque le quedan de camino para llegar a su zona de recolección.

El CEPE, Publicaciones y la Gasolinera podrían ser asignados a la Ruta del Campus Central (color verde) para ser visitados después que la Facultad de Psicología y antes del Posgrado de Derecho, ya que están dentro de la misma zona muy cerca de Eje 10, sin embargo fueron asignados a la Ruta Deportiva ya que estos quedan en el camino que toma el chofer de la Ruta Deportiva para llegar a los Talleres de Zoquipa.

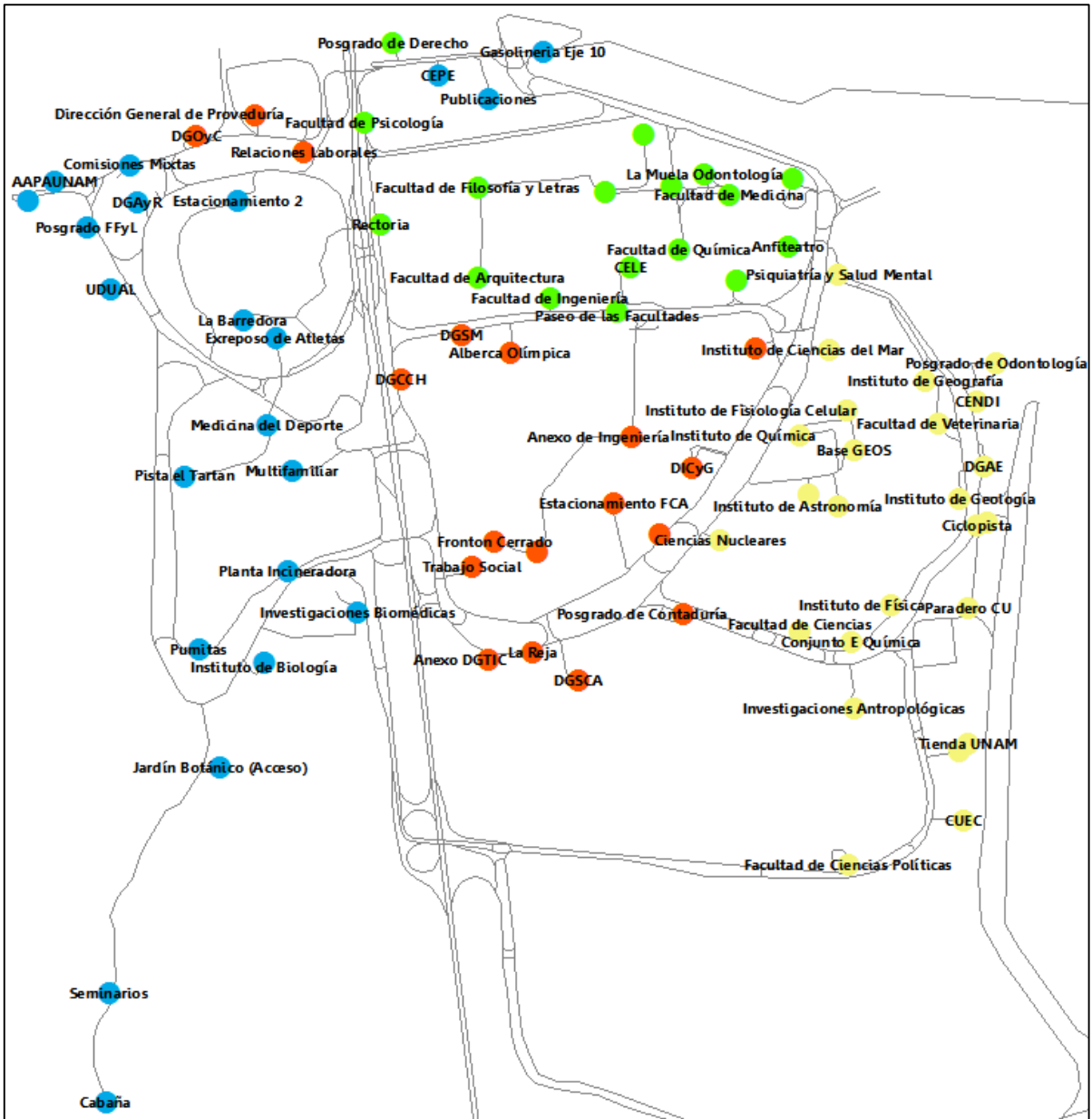


Figura 4.12. Puntos que visitan los recorridos de la mañana.

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 4.13 se muestran los 23 puntos que se visitan durante los recorridos de la tarde.

Para los recorridos de la tarde el orden de cómo fueron asignados los puntos es el mismo, la Ruta del Campus Central por la tarde se encarga, al igual que en la mañana, de visitar la zona del Circuito Escolar y Las Islas de la Universidad, con excepción del Posgrado de Derecho y el Anfiteatro los cuales sólo se visitan en la mañana. Los

puntos de la Ruta de la Tarde fueron asignados de acuerdo con la cantidad de residuos acumulados en esos puntos.

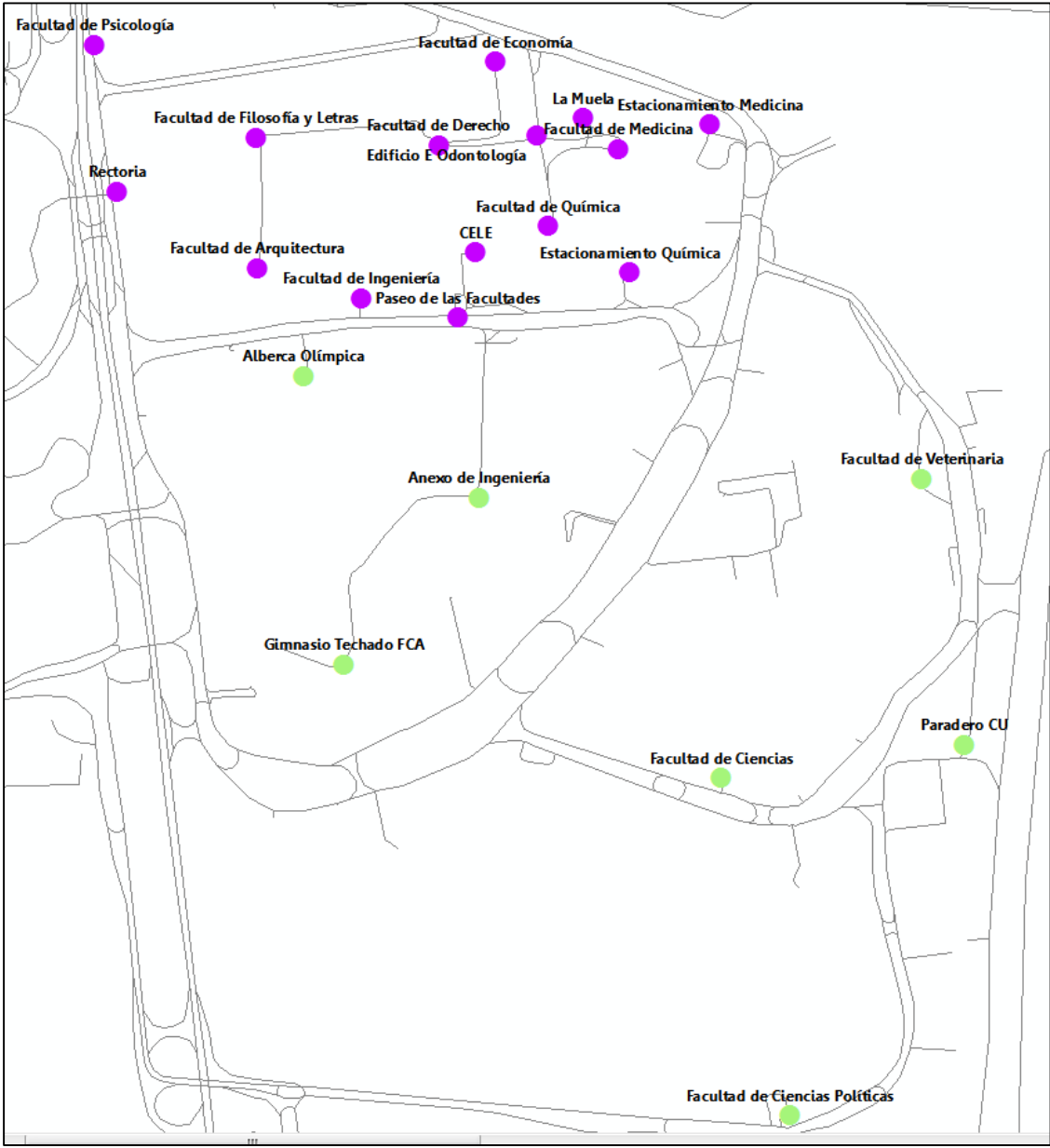


Figura 4.13. Puntos que visitan los recorridos de la tarde. Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.2.1 **Rutas de la mañana de basura inorgánica**

En la solución para las rutas de la mañana, de basura inorgánica, se tomaron en cuenta únicamente el grupo de puntos que pertenecen al recorrido actual. Las ventanas de tiempo definidas para este problema se describen en cada subsección correspondiente al recorrido en cuestión. Las rutas de la basura orgánica se describen dentro de este grupo de soluciones.

##### 4.2.1.1 **Ruta Deportiva**

Para este recorrido se disminuyó la distancia total de 70.3 km a 57.65 km. Una reducción de 12.65 km, únicamente atendiendo en diferente orden los puntos que visita. El problema presente dentro de esta ruta es que el UDUAL tiene una ventana de tiempo muy estricta, abre las 8:30 am todos los días. Éste se encuentra dentro de los primeros puntos del recorrido, lo que hace que el camión tenga que dar varias vueltas hasta que esté abierto, lo cual quita tiempo y en ese lapso de espera se podrían atender otros puntos. La figura 4.14 muestra el nuevo recorrido de la ruta Deportiva.

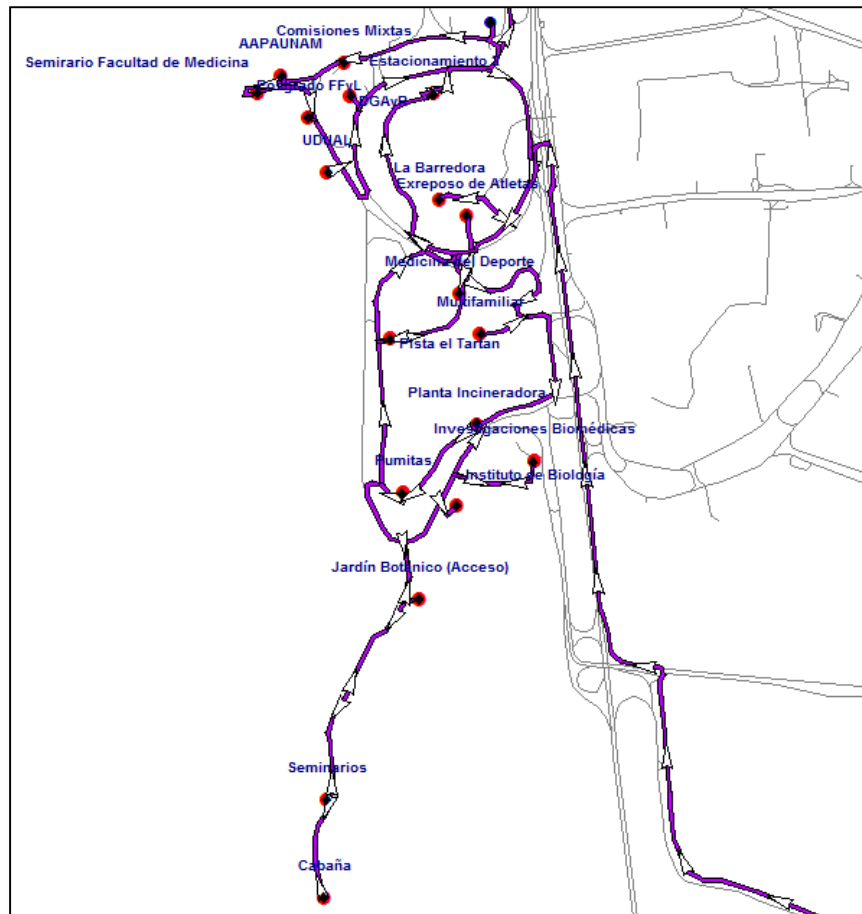


Figura 4.14. Recorrido de la nueva ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 4.13 muestra el orden en que se visitan los puntos. El problema que se presenta es la hora de la salida del camión; la solución obtenida indica que el comienzo de la recolección es a las 8:17 hrs, cuando todas las rutas deben empezar antes de las 7:00 hrs forzosamente (como se indicó en el capítulo 2). El retraso se debe a la ventana de tiempo del UDUAL, que abre a las 8:30 hrs y es uno de los primeros puntos de la recolección, por lo que la solución obtenida retrasa la salida del camión hasta las 8:17 hrs para poder recoger ese punto a la hora indicada.



Reporte de Itinerario						
Ruta Deportiva		Tiempo Total: 3:45 hrs		Capacidad: 15.3 m <sup>3</sup>		
		Distancia Total: 7647.2 m		Carga de Salida: 0		
No.	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		8:17am			
1	Comisiones Mixtas	8:19am	8:21am	518	0.8	--
2	AAPAUNAM	8:21am	8:25am	246.1	0.9	--
3	Seminario Facultad de Medicina	8:26am	8:27am	191.7	0.1	--
4	Posgrado FFyL	8:28am	8:29am	278.5	0.6	--
5	UDUAL	8:30am	8:38am	230.8	1	--
6	DGAyR	8:39am	8:43am	485.6	0.6	--
7	La Barredora	8:46am	8:51am	1277.9	0.8	--
8	Multifamiliar	8:55am	8:56am	1112.4	0.6	--
9	Planta Incineradora	8:58am	9:00am	706.8	1	--
10	Pumitas	9:01am	9:05am	346	1	--
11	Jardín Botánico (Acceso)	9:07am	9:09am	591.6	0.9	--
12	Seminarios	9:12am	9:13am	735.1	0.4	--
13	Cabaña	9:14am	9:16am	318.3	0.1	--
14	Instituto de Biología	9:21am	9:23am	1434.1	0.7	--
15	Investigaciones Biomédicas	9:25am	9:29am	490.9	0.7	--
16	Pista el Tartán	9:33am	9:34am	1353.5	0.1	--
17	Ex reposo de Atletas	9:36am	9:38am	535.5	0.5	--
18	Medicina del Deporte	9:39am	9:40am	245.2	0.6	--
19	Estacionamiento 2	9:44am	9:48am	1499.5	0.9	--
20	CEPE	9:50am	9:55am	908.2	0.9	--
21	Publicaciones	9:57am	9:58am	252.8	0.5	--
22	Gasolinera Eje 10	9:59am	10:02am	316.1	0.7	--
23	Talleres de Zoquipa	10:23am	10:40am	17070.8	0.8	--
24	Centro de Transferencia	11:06am	11:38am	15882.3	--	15.3
END	Talleres de Conservación	12:02pm		10618.3		
<b>Total</b>				57647.2	15.2	15.3

Tabla 4.13. Nuevo orden de recolección de la Ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.14 se muestra el cambio que hubo en el orden de recolección con respecto a cómo se hace actualmente y cómo se haría con esta solución que toma grupos de puntos.

<b>Ruta Zona Deportiva puntos de recolección</b>	
<b>Actual</b>	<b>Solución para grupos de puntos</b>
APAAUNAM	Comisiones Mixtas
Seminario de la Facultad de Medicina	AAPAUNAM
Posgrado FFyL	Seminario Facultad de Medicina
DGADyR	Posgrado FFyL
Comisiones Mixtas	UDUAL
Multifamiliar	DGADyR
Planta Incineradora	La Barredora
Campos Pumitas	Multifamiliar
Medicina del Deporte	Planta Incineradora
Ex reposo de Atletas	Pumitas
Pista el Tartán	Jardín Botánico (Acceso)
Seminarios (Jardín Botánico)	Seminarios
Cabaña	Cabaña
Jardín Botánico Acceso	Instituto de Biología
Instituto Biología	Investigaciones Biomédicas
Instituto de Inv. Biomédicas	Pista el Tartán
Estacionamiento 2	Ex reposo de Atletas
Barredora	Medicina del Deporte
UDUAL	Estacionamiento 2
CEPE	CEPE
Publicaciones	Publicaciones
Gasolinera Eje 10	Gasolinera Eje 10
Talleres Zoquipa	Talleres de Zoquipa

Tabla 4.14. Cambios en el orden de recolección de la ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se presentan acercamientos sobre la ruta Deportiva, para una mejor apreciación. La parte que cubre la zona del Estadio Olímpico y los puntos ubicados en el Eje 10 sur se muestran en la figura 4.15.

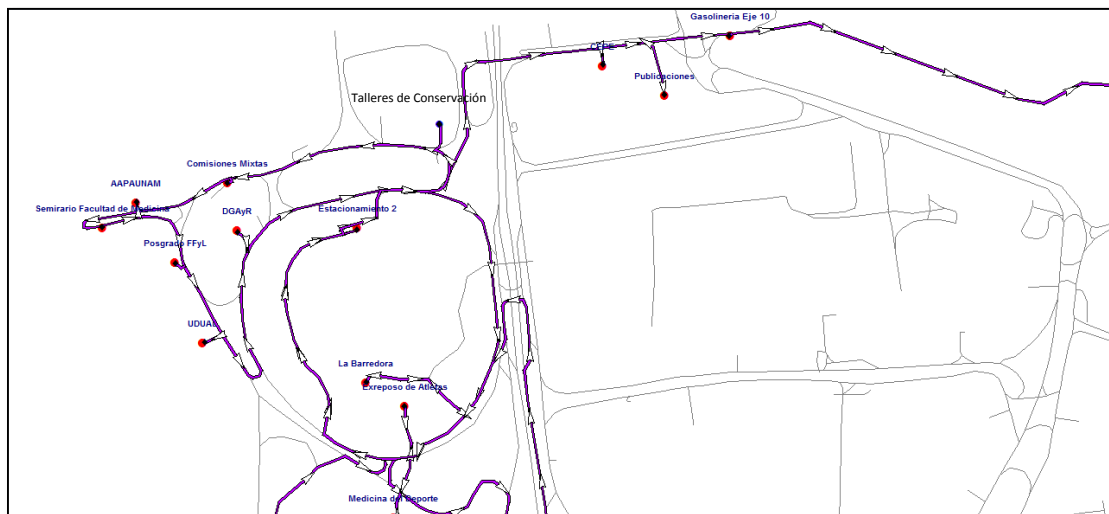


Figura 4.15. Recorrido norte de la nueva ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

La parte de los campos deportivos se muestra en la figura 4.16.

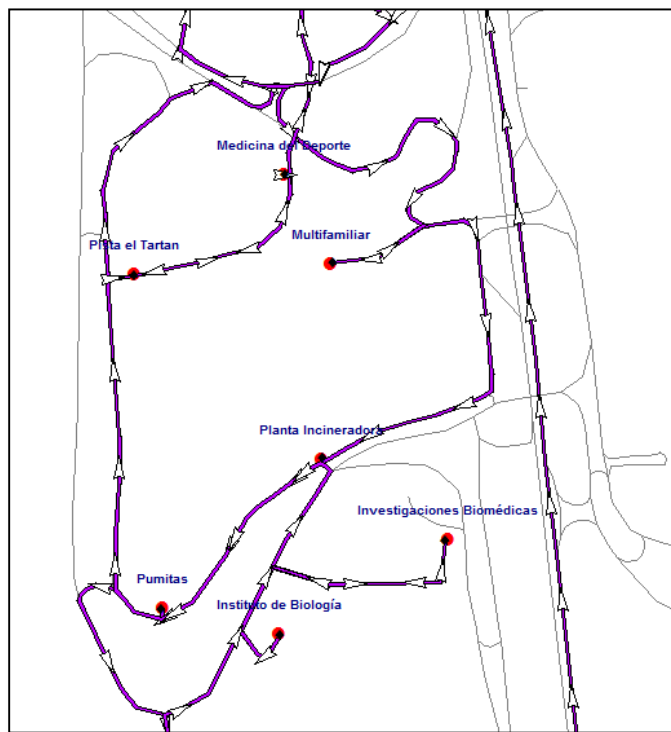


Figura 4.16. Recorrido de la Ruta Deportiva. Fuente: Elaboración Propia

En el recorrido, la zona del jardín botánico sigue siendo la actual, no cambió (Figura 4.17).

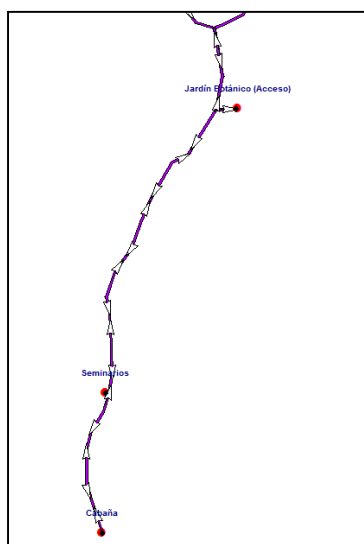


Figura 4.17. Recorrido por el jardín botánico de la nueva ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

Los Talleres de Zoquipa siguen siendo parte de la ruta Deportiva y es el punto más alejado a la Universidad que tiene que atenderse (Figura 4.18).



Figura 4.18. Recorrido hacia los Talleres de Zoquipa de la nueva ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que el camión sale de Zoquipa, se dirige hacia el Centro de Transferencia, como se observa en la figura 4.19.

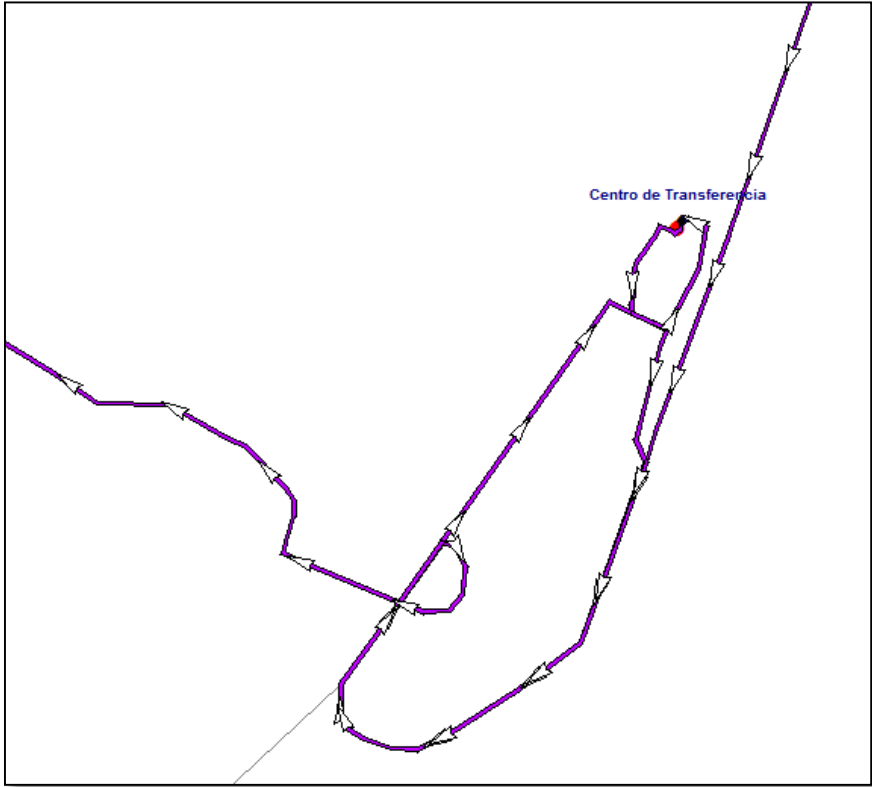


Figura 4.19. Recorrido de la nueva ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.1.2 Ruta Campus Central

Para este recorrido se redujo la distancia total de 36 a 30.3 kilómetros. El orden en que se hace la recolección cambió dando prioridad a la zona de las islas y la explanada de Medicina y Química, como se muestra en la figura 4.20.

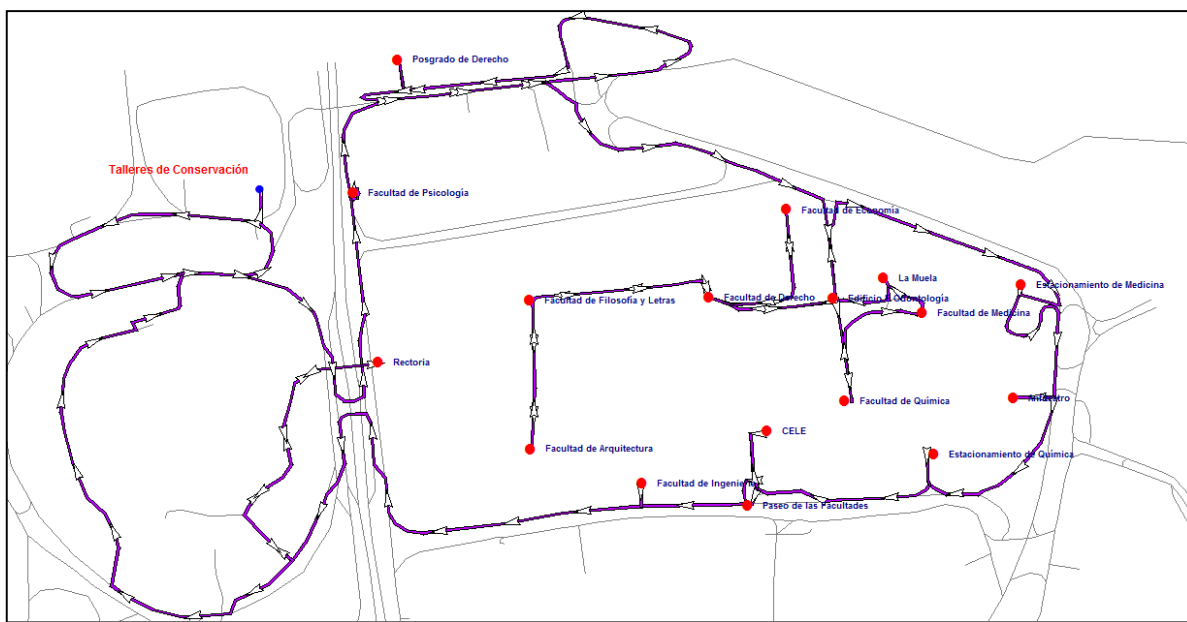


Figura 4.20. Recorrido de la ruta Campus Central

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.15 se observa que, a comparación de la ruta Deportiva, el inicio de la Ruta del Campus Central comienza a las 6:00 hrs, ya que no cuenta con ventanas de tiempo tan estrictas y todos los lugares a visitar abren desde muy temprano. Cabe mencionar que todas las mañanas, antes de comenzar la recolección, el camión se dirige al Centro de Transferencia a tirar los residuos que recoge durante la tarde. Es por eso que en la tabla 4.15 aparece, como primer punto, el Centro de Transferencia.

<b>Reporte de Itinerario</b>						
<b>Ruta: Campus Central Mañana</b>		Tiempo Total: 4:41 hrs		Capacidad: 15.3 [m <sup>3</sup> ]		
		Distancia Total: 30.3 [km]		Carga de Salida: 15.3 [m <sup>3</sup> ]		
<b>No.</b>	Nombre	Llegada	Salida	Distancia km	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		6:00am			
<b>1</b>	Centro de Transferencia	6:18am	6:35am	6.1		15.3
<b>2</b>	Facultad de Psicología	6:56am	7:02am	5.8	1.3	--
<b>3</b>	Posgrado de Derecho	7:09am	7:11am	0.8	0.5	--
<b>4</b>	Facultad de Química	7:16am	7:20am	0.8	0.5	--
<b>5</b>	Facultad de Medicina	7:22am	7:25am	0.1	0.5	--
<b>6</b>	La Muela	7:26am	7:34am	0	0.9	--
<b>7</b>	Facultad de Economía	7:38am	7:42am	0.3	0.6	--
<b>8</b>	Arquitectura	7:47am	8:02am	0.5	1.1	--
<b>9</b>	Facultad de Filosofía y Letras	8:03am	8:21am	0.1	1.5	--
<b>10</b>	Facultad de Derecho	8:22am	8:30am	0.2	0.8	--
<b>11</b>	Edificio E Odontología	8:32am	8:37am	0.1	0.5	--
<b>12</b>	Estacionamiento Medicina	8:39am	8:44am	0.4	1.5	--
<b>13</b>	Anfiteatro	8:47am	8:52am	0.2	1.3	--
<b>14</b>	Estacionamiento Química	8:54am	8:59am	0.2	1.8	--
<b>15</b>	CELE	9:01am	9:07am	0.3	0.5	--
<b>16</b>	Paseo Facultades	9:08am	9:10am	0.1	0.6	--
<b>17</b>	Facultad de Ingeniería	9:12am	9:19am	0.2	0.8	--
<b>18</b>	Rectoría	9:23am	9:26am	0.9	0.5	--
<b>19</b>	Centro de Transferencia	9:45am	10:17am	5.9	--	15.3
<b>END</b>	Talleres de Conservación	10:41am		6.6		
<b>Total</b>				<b>30.3</b>	<b>15.3</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.15. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta del Campus Central.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.16 se observan los cambios en el orden de la recolección como se hace actualmente y como resulta de la solución para grupos de puntos.

<b>Ruta Campus Central Mañana puntos de recolección</b>	
<b>Actual</b>	<b>Solución para grupos de puntos</b>
Facultad Psicología	Facultad de Psicología
Posgrado Derecho	Posgrado de Derecho
Estacionamiento Facultad Medicina	Facultad de Química
Anfiteatro	Facultad de Medicina
Estacionamiento Facultad Química	La Muela
CELE	Facultad de Economía
Paseo Facultades	Arquitectura
Facultad Ingeniería	Facultad de Filosofía y Letras
Rectoría	Facultad de Derecho
Edificio E Odontología	Edificio E Odontología
Facultad Química	Estacionamiento Medicina
Facultad Medicina	Anfiteatro
La Muela	Estacionamiento Química
Facultad Economía	CELE
Facultad Derecho	Paseo Facultades
Facultad Filosofía y Letras	Facultad de Ingeniería
Facultad de Arquitectura	Rectoría

Tabla 4.16. Cambios en el orden de recolección en la ruta del Campus Central.

Fuente: Elaboración Propia



### 4.2.1.3 Ruta del Circuito Exterior

Para esta ruta la distancia se redujo 2.62 km, muy poco en comparación con las rutas anteriores. Pasó de 16.8 de recorrido actual a 14.18 km. En la figura 4.21 se observa el mapa con la nueva ruta.

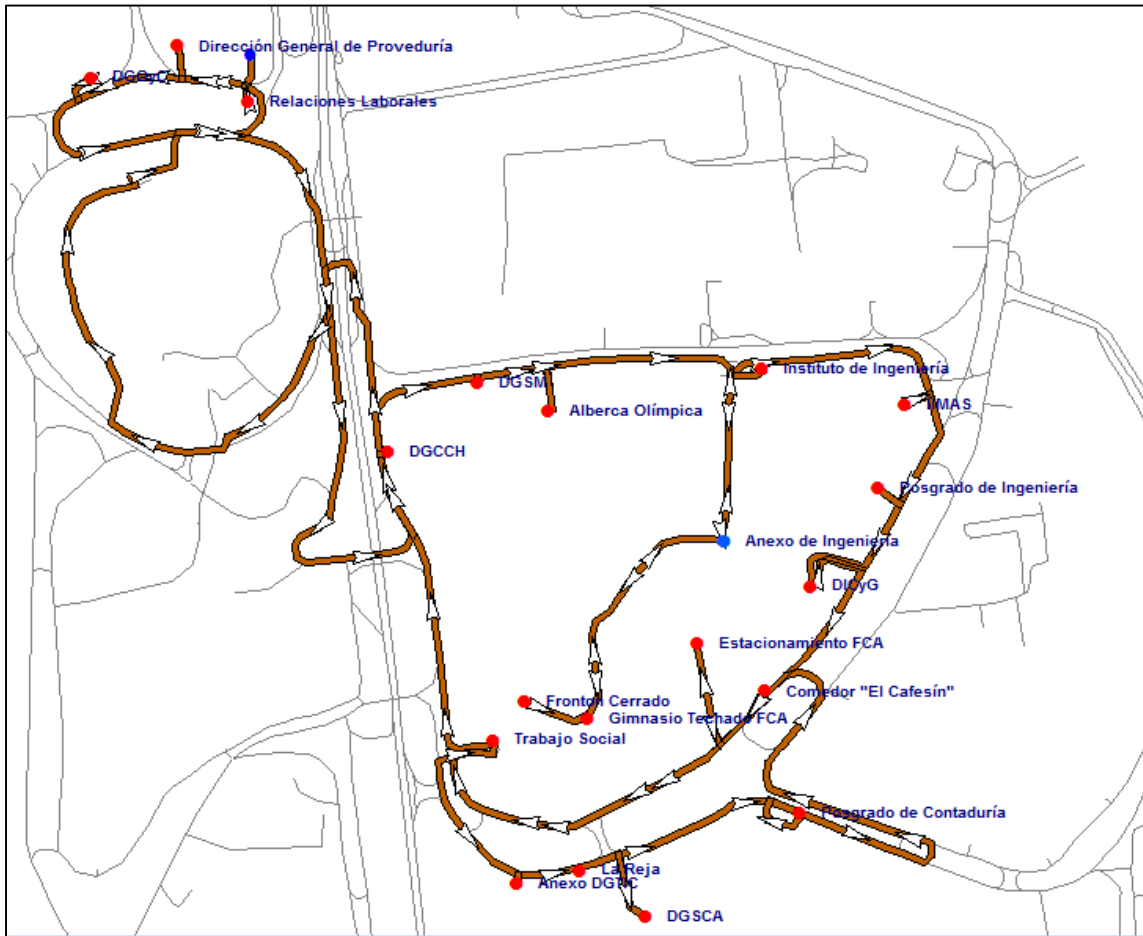


Figura 4.21. Recorrido de la ruta del Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia.

Este recorrido también empieza antes de las 7:00 hrs teniendo una duración menor. Actualmente la ruta es una de las más rápidas en ser recorridas, es por eso que la distancia total disminuye muy poco. (Tabla 4.17).

<b>Reporte de Itinerario</b>					
<b>Ruta:: Circuito Exterior</b>		<b>Tiempo Total: 2:03 hrs</b>		<b>Capacidad: 15.3 [m<sup>3</sup>]</b>	
		<b>Distancia Total: 14176.9 [m]</b>		<b>Carga de Salida: 0</b>	
	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		6:34am		
<b>1</b>	DGSM	6:40am	6:42am	2313.1	1.2
<b>2</b>	Alberca Olímpica	6:43am	6:46am	225.7	0.9
<b>3</b>	Anexo de Ingeniería	6:49am	6:54am	718.6	0.7
<b>4</b>	Gimnasio Techado FCA	6:56am	7:01am	466.7	1.4
<b>5</b>	Frontón Cerrado	7:02am	7:04am	116.5	0.4
<b>6</b>	Instituto de Ingeniería	7:09am	7:14am	937.8	0.9
<b>7</b>	IIMAS	7:16am	7:22am	521.9	1.2
<b>8</b>	Posgrado de Ingeniería	7:23am	7:31am	308.2	0.8
<b>9</b>	DICyG	7:32am	7:33am	323.7	0.4
<b>10</b>	Comedor "El Cafesín"	7:35am	7:37am	399.8	0.5
<b>11</b>	Anexo DGTIC	7:40am	7:43am	993.7	0.3
<b>12</b>	La Reja	7:43am	7:45am	133.3	0.5
<b>13</b>	DGSCA	7:46am	7:51am	199.6	1.1
<b>14</b>	Posgrado de Contaduría	7:53am	7:57am	516.1	1.2
<b>15</b>	Estacionamiento FCA	8:01am	8:05am	1380.3	0.5
<b>16</b>	Trabajo Social	8:08am	8:17am	867.7	1.1
<b>17</b>	DGCCH	8:18am	8:21am	634.8	0.8
<b>18</b>	Dirección General de Proveduría	8:26am	8:29am	2083.7	0.5
<b>19</b>	DGOyC	8:30am	8:31am	306	0.4
<b>20</b>	Relaciones Laborales	8:33am	8:36am	640.8	0.5
<b>END</b>	Talleres de Conservación	8:37am		87.7	
<b>Total</b>				14176.9	15.3

Tabla 4.17. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la ruta del Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.18 se encuentran los puntos de la forma en que se recorren actualmente y como resulta de la solución para grupos de puntos.

<b>Ruta Circuito Exterior puntos de recolección</b>	
<b>Antes</b>	<b>Después</b>
Relaciones Laborales	DGSM
Dirección General de Proveeduría	Alberca Olímpica
DGOyC	Anexo de Ingeniería
Anexo DGTIC	Gimnasio Techado FCA
La Reja	Frontón Cerrado
DGSCA	Instituto de Ingeniería
Posgrado FCA	IIMAS
Comedor "el Cafesín"	Posgrado de Ingeniería
FCA Estacionamiento	DICyG
Trabajo Social	Comedor "El Cafesín"
DGCCH	Anexo DGTIC
DGSM	La Reja
Alberca	DGSCA
Frontón Cerrado	Posgrado de Contaduría
Gimnasio Techado FCA	Estacionamiento FCA
Anexo Ingeniería	Trabajo Social
Instituto Ingeniería	DGCCH
IIMAS	Dirección General de Proveeduría
DICyG	DGOyC
Red de Agua	Relaciones Laborales

Tabla 4.18. Cambios en el orden de recolección en la ruta del Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.1.4 Ruta de los Institutos

La distancia total de este recorrido cambió de 47.4 a 50.1kilometros (aumentó ligeramente). A diferencia del recorrido actual, este nuevo comienza por el Hospital Veterinario Banfield, punto que actualmente se atiende en penúltimo lugar. El nuevo recorrido se muestra en la figura 4.22.

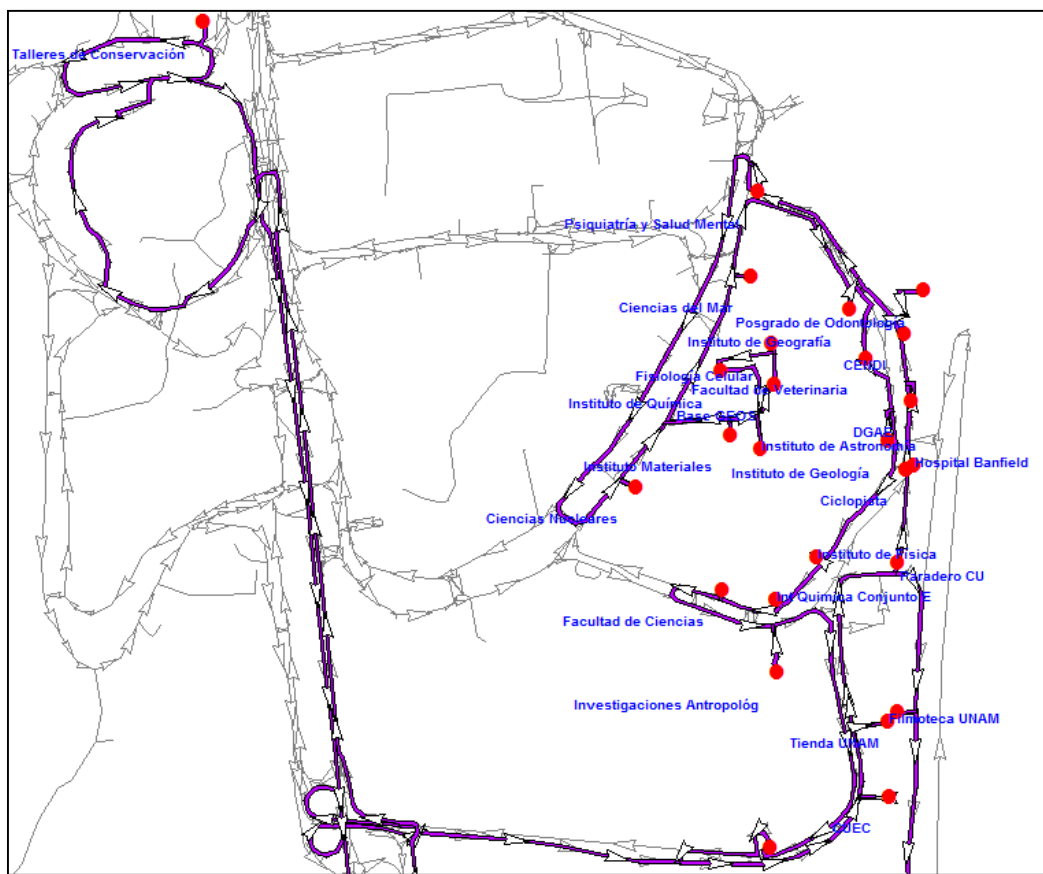


Figura 4.22. Recorrido de la ruta de los Institutos.

Fuente: Elaboración Propia

Las figuras 4.23 y 4.24 son acercamientos a las zonas que se recorren, ya que en la figura 4.22 se distingue muy poco como está organizada la visita a los puntos.

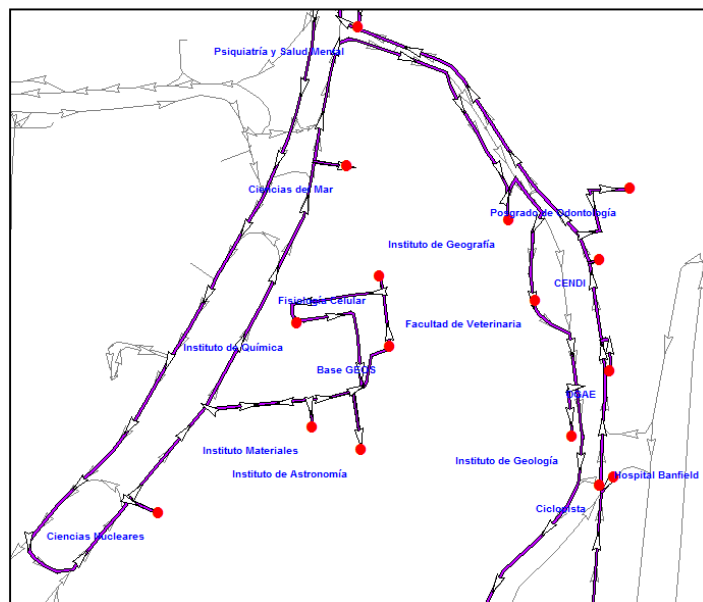


Figura 4.23. Recorrido de la ruta de los Institutos.

Fuente: Elaboración Propia

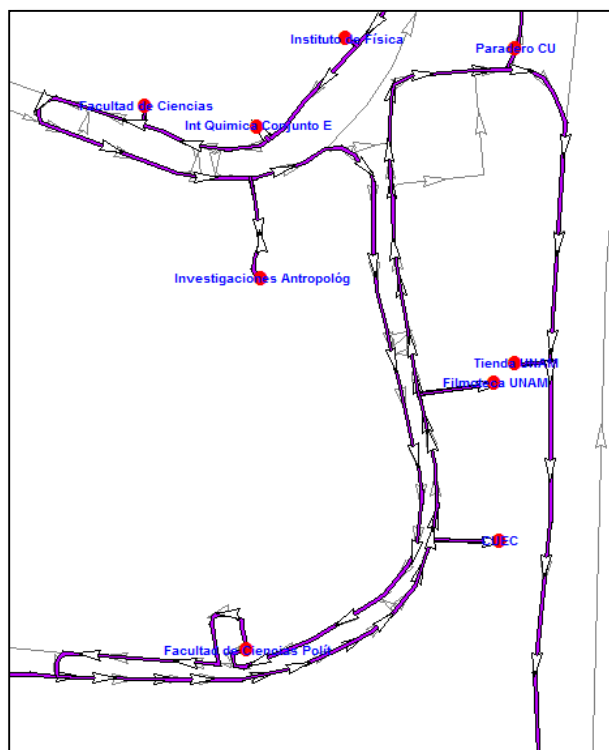


Figura 4.24. Recorrido de la ruta de los Institutos cerca de la zona del CCU.

Fuente: Elaboración Propia

En este recorrido se visita dos veces el Centro de Transferencia, en la mañana antes de iniciar la recolección y al final de la misma. El mismo camión se utiliza para la Ruta de la Tarde, la cual no va al Centro de Transferencia debido al gran tiempo de espera para lograr tirar los residuos por la tarde, por lo que se tiran a la mañana siguiente. La segunda vez que el recorrido visita el Centro de Transferencia es cuando termina la recolección del recorrido descrito.

En la tabla 4.19 se observan los tiempos y la demanda por punto que componen el recorrido. Éste empieza a las 6:00 hrs mucho antes que la hora normal de salida que es entre 6:30 y 7:00 hrs. En la tabla 4.20 se muestra cómo cambió el orden de visita a los puntos.

<b>Reporte de Itinerario</b>						
<b>Ruta de los Institutos</b>		Tiempo Total: 3:55		Capacidad: 15.3		
		Distancia total: 50140.3		Carga de Salida: 15.3		
<b>No.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Llegada</b>	<b>Salida</b>	<b>Distancia</b>	<b>Recolección</b>	<b>Distribución</b>
	Talleres de Conservación		6:00am			
<b>1</b>	Centro de Transferencia	6:18am	6:35am	9930.7		15.3
<b>2</b>	Hospital Banfield	6:51am	6:52am	7083.2	0.1	--
<b>3</b>	Ciclopista	6:53am	6:54am	38.4	0.4	--
<b>4</b>	DGAE	6:55am	6:58am	276.3	0.8	--
<b>5</b>	CENDI	6:59am	7:02am	195.3	1.1	--
<b>6</b>	Posgrado de Odontología	7:03am	7:04am	218.2	0.4	--
<b>7</b>	Psiquiatría y Salud Mental	7:07am	7:10am	794.1	0.7	--
<b>8</b>	Ciencias Nucleares	7:14am	7:18am	1375.6	0.7	--
<b>9</b>	Instituto de Astronomía	7:20am	7:21am	541.8	0.5	--
<b>10</b>	Base GEOS	7:22am	7:23am	184.9	0.5	--
<b>11</b>	Fisiología Celular	7:24am	7:26am	105.1	0.1	--
<b>12</b>	Instituto de Química	7:27am	7:29am	196.6	0.6	--
<b>13</b>	Instituto Materiales	7:31am	7:32am	321.1	0.5	--
<b>14</b>	Ciencias del Mar	7:34am	7:45am	649.4	1.5	--
<b>15</b>	Instituto de Geografía	7:49am	7:50am	645.1	0.2	--
<b>16</b>	Facultad de Veterinaria	7:51am	7:52am	277.3	0.4	--
<b>17</b>	Instituto de Geología	7:54am	7:55am	244.4	0.2	--
<b>18</b>	Instituto de Física	7:57am	7:59am	530.6	1.2	--
<b>19</b>	Conjunto E Química	7:59am	8:01am	185	0.3	--
<b>20</b>	Facultad de Ciencias	8:02am	8:11am	195.4	1.5	--
<b>21</b>	Investigaciones Antropológicas	8:13am	8:15am	548.9	0.5	--
<b>22</b>	Facultad de Ciencias Políticas	8:18am	8:21am	1022.1	0.8	--
<b>23</b>	CUEC	8:24am	8:26am	928.5	0.4	--
<b>24</b>	Filmoteca UNAM	8:27am	8:29am	341.7	0.3	--
<b>25</b>	Paradero CU	8:31am	8:32am	612.5	0.6	--
<b>26</b>	Tienda UNAM	8:35am	8:37am	957.4	0.8	--
<b>27</b>	Centro de Transferencia	9:00am	9:31am	11140.3	--	15.3
<b>END</b>	Talleres de Conservación	9:55am		10599		
<b>Total</b>				<b>50140.3</b>	<b>30.4</b>	<b>30.6</b>

Tabla 4.19. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta de los Institutos. Fuente: Elaboración Propia

<b>Ruta de los Institutos Puntos de Recolección</b>	
<b>Actual</b>	<b>Solución para grupos de puntos</b>
Facultad Ciencias Políticas	Hospital Banfield
CUEC	Ciclopista
Filmoteca UNAM	DGAE
Paradero CU	CENDI
Ciclopista	Posgrado de Odontología
DGAE	Psiquiatría y Salud Mental
CENDI	Ciencias Nucleares
Posgrado de Odontología	Instituto de Astronomía
Instituto de Geografía	Base GEOS
Instituto de Geología	Fisiología Celular
Instituto de Física	Instituto de Química
Conjunto E Instituto de Química	Instituto Materiales
Facultad de Ciencias	Ciencias del Mar
Ciencias Nucleares	Instituto de Geografía
Instituto de Materiales	Facultad de Veterinaria
Instituto de Astronomía	Instituto de Geología
Base GEOS	Instituto de Física
Instituto de Química	Conjunto E Química
Fisiología Celular	Facultad de Ciencias
Ciencias del Mar	Investigaciones Antropológicas
Psiquiatría y Salud Mental	Facultad de Ciencias Políticas
Facultad de Veterinaria	CUEC
Investigaciones Antropológicas	Filmoteca UNAM
Hospital Veterinario Banfield	Paradero CU
Tienda UNAM	Tienda UNAM

Tabla 4.20. Cambios en el orden de recolección en la Ruta de los Institutos.

Fuente: Elaboración Propia



#### 4.2.2 Ruta de la basura orgánica por la mañana

Las rutas de la basura orgánica son las más grandes en comparación a las otras seis, ya que tienen que recorrer toda Ciudad Universitaria y visitar una gran cantidad de puntos en los cuales la basura no está colocada en contenedores, sino en grandes bolsas de plástico y la mayoría de las veces en el suelo (como se explicó en el capítulo dos). Para realizar la recolección se utiliza un vehículo de volteo con capacidad de  $3\frac{1}{2}$  toneladas. Para manejar las mismas unidades, ( $m^3$ ), se buscó la equivalencia llegando a la cantidad de  $7 m^3$ . En la figura 4.25 se muestra el nuevo recorrido de la mañana.

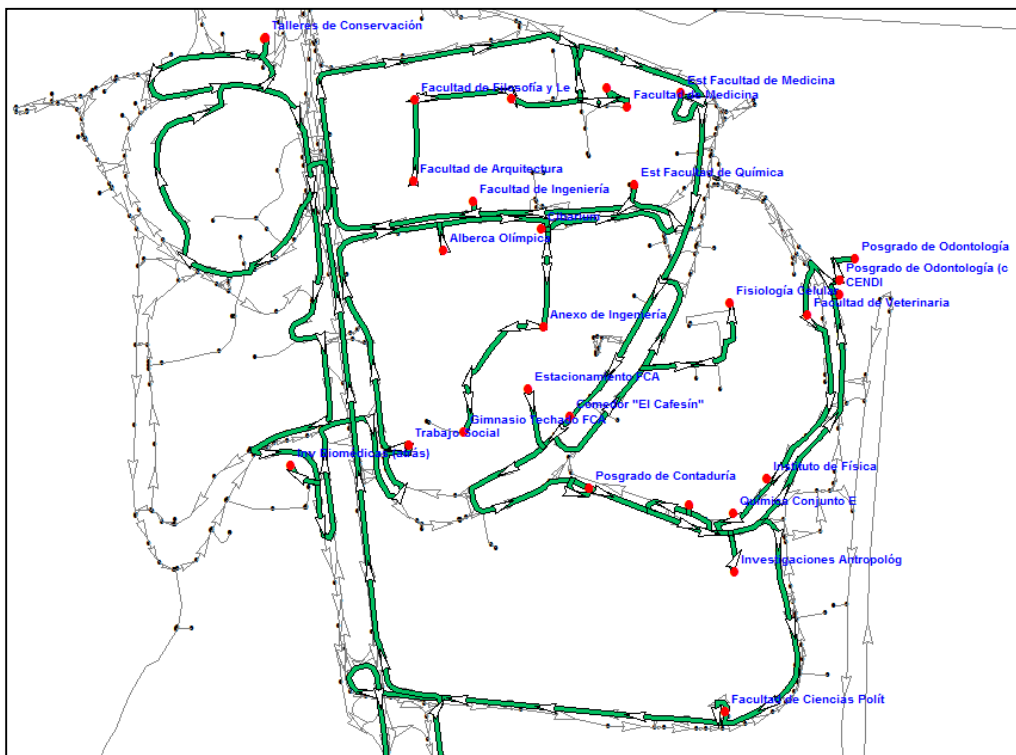


Figura 4.25. Recorrido de la ruta de la basura orgánica.

Fuente: Elaboración Propia

Cabe señalar que el camión recolector de basura orgánica es uno para los dos turnos, el cual tiene una capacidad, en metros cúbicos, de siete. En la tabla 4.21 se muestra el nuevo recorrido. La ruta no presenta complicaciones en cuanto a ventanas de tiempo; como se explicó en el capítulo dos, existen ciertos lugares donde debido a

la gran cantidad de automóviles dentro de los estacionamientos es difícil realizar las maniobras adecuadas para llegar al punto a recoger.

Las siguientes figuras muestran acercamientos a diferentes zonas que visita la ruta, ya que en la figura 4.25 se alcanzan a distinguir muy poco. La figura 4.26 muestra el recorrido en la parte central de la Universidad.

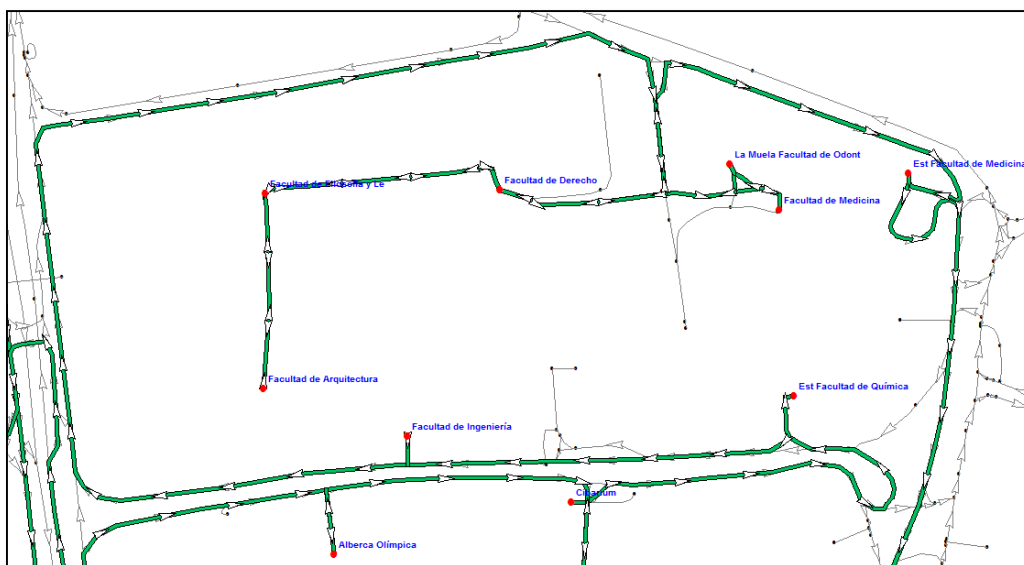


Figura 4.26. Recorrido de la ruta de la basura orgánica por la parte central de Ciudad Universitaria.

Fuente: Elaboración Propia

Reporte de itinerario						
Ruta Orgánica Mañana		Tiempo Total: 3:43 hrs		Capacidad: 7 [m <sup>3</sup> ]		
		Distancia Total: 35.3 km		Carga de Salida: 7[m <sup>3</sup> ]		
No.	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m]	Distribución [m]
	Talleres de Conservación		6:00am			
1	Centro de Transferencia	6:17am	6:25am	6.1		7
2	CENDI	6:42am	6:44am	4.5	0.3	--
3	Posgrado de Odontología	6:45am	6:46am	0.1	0.1	--
4	Posgrado de Odontología (comedor)	6:47am	6:48am	0	0.1	--
5	Facultad de Veterinaria	6:49am	6:51am	0.2	0.3	--
6	Instituto de Física	6:52am	6:53am	0.3	0.1	--
7	Química Conjunto E	6:54am	6:56am	0.1	0.1	--
8	Facultad de Ciencias	6:57am	6:59am	0.1	0.2	--
9	Fisiología Celular	7:03am	7:04am	0.7	0.1	--
10	Comedor "El Cafesín"	7:07am	7:08am	0.7	0.1	--
11	Estacionamiento FCA	7:10am	7:11am	0.1	0.2	--
12	Posgrado de Contaduría	7:15am	7:16am	0.5	0.2	--
13	Investigaciones Antropológicas	7:18am	7:19am	0.4	0.1	--
14	Facultad Ciencias Políticas	7:23am	7:24am	0.6	0.1	--
15	Alberca Olímpica	7:30am	7:33am	1.7	0.2	--
16	Cibarium	7:35am	7:39am	0.2	0.3	--
17	Gimnasio Techado FCA	7:42am	7:45am	0.4	0.3	--
18	Anexo de Ingeniería	7:47am	7:48am	0.2	0.1	--
19	Estacionamiento Química	7:51am	7:54am	0.5	0.5	--
20	Facultad de Ingeniería	7:56am	8:00am	0.3	0.3	--
21	Facultad de Filosofía y Le	8:07am	8:11am	1.4	0.9	--
22	Arquitectura	8:12am	8:15am	0.1	0.5	--
23	Facultad de Derecho	8:17am	8:20am	0.3	0.3	--
24	Facultad de Medicina	8:22am	8:23am	0.2	0.1	--
25	La Muela	8:24am	8:28am	0	0.3	--
26	Estacionamiento Medicina	8:31am	8:35am	0.4	0.9	--
27	Trabajo Social	8:41am	8:44am	1.2	0.1	--
28	Biomédicas (atrás)	8:47am	8:49am	0.8	0.3	--
29	Centro de Transferencia	9:04am	9:19am	4.9	--	7
END	Talleres de Conservación	9:43am		6.5		
<b>Total</b>				<b>35.3</b>	<b>7</b>	<b>14</b>

Tabla 4.21. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta Orgánica. Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 4.27 se muestra el recorrido de la Ruta de la Basura Orgánica en la zona del Circuito Exterior así como en la zona de Frontones en la Facultad de Contaduría y Administración.

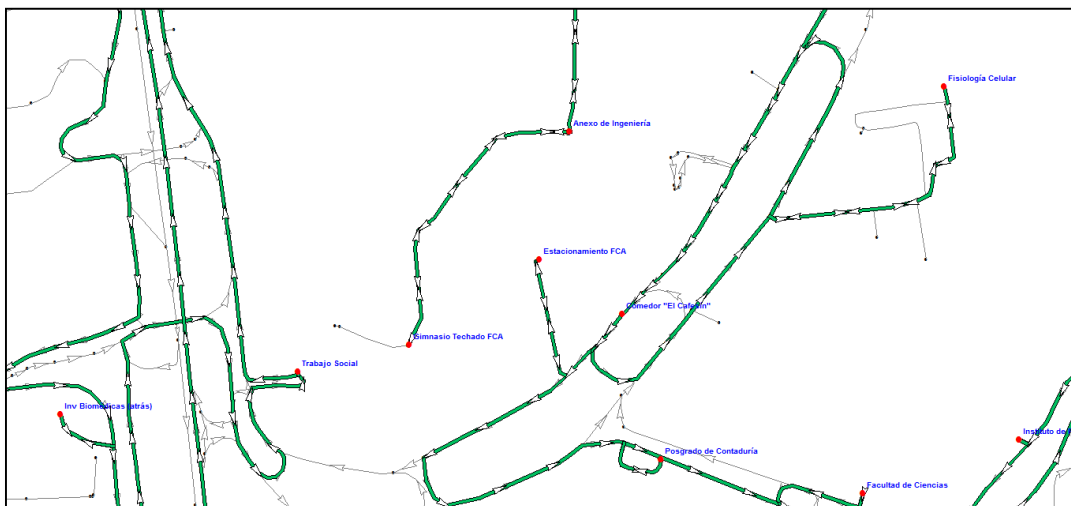


Figura 4.27. Recorrido de la ruta de la basura orgánica en la parte del Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 4.28 se muestra, desde otro ángulo, el recorrido por el Circuito Exterior así como por el Circuito de Investigación Científica.

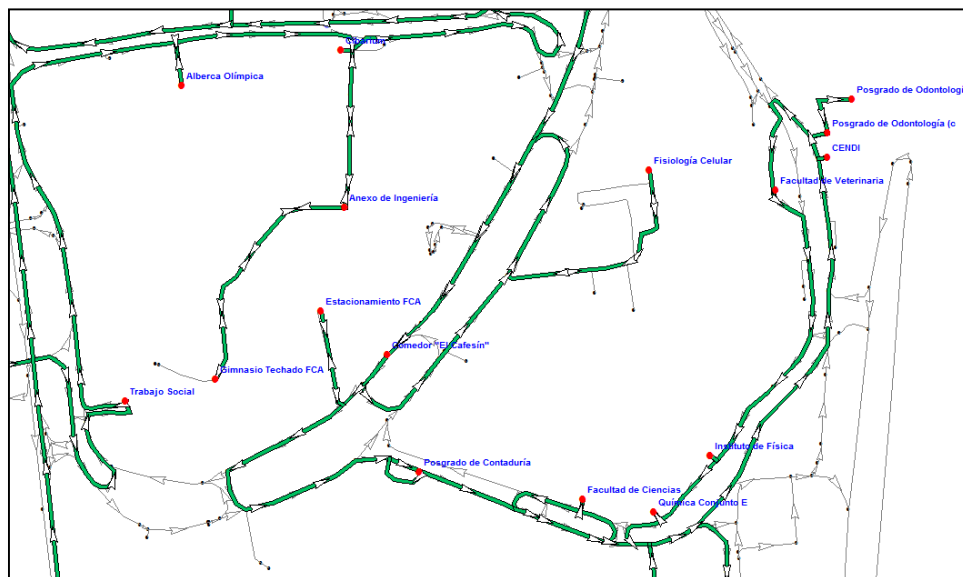


Figura 4.28. Recorrido de la ruta de la basura orgánica en el Circuito de Investigación Científica.

Fuente: Elaboración Propia

Esta ruta recorre el Circuito Mario de la Cueva para llegar a la Facultad de Ciencias Políticas, como se muestra en la figura 4.29.

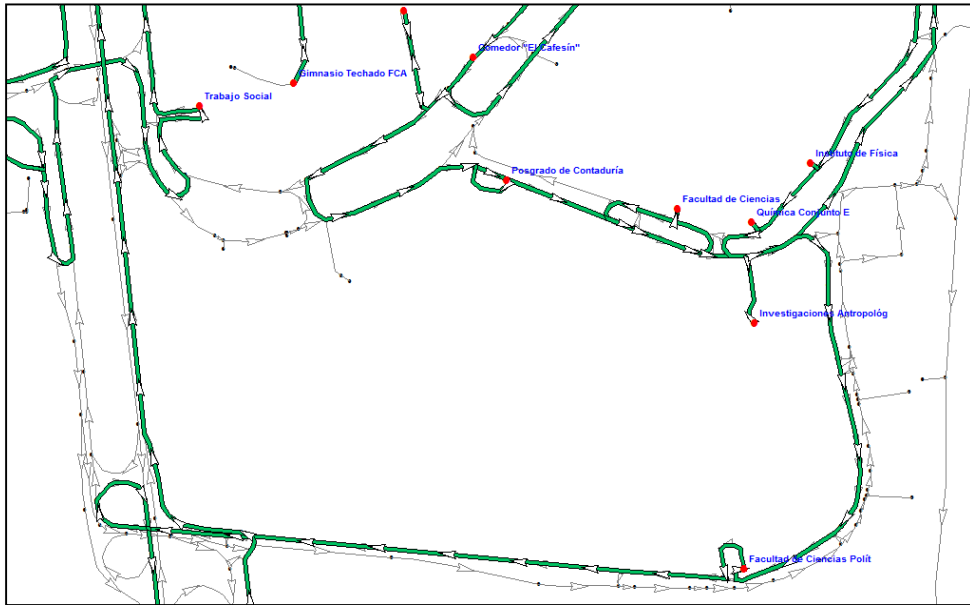


Figura 4.29. Recorrido de la ruta de la basura orgánica pasando por Ciencias Políticas.

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente en la figura 4.30 se muestra otra perspectiva del recorrido dentro de Ciudad Universitaria.

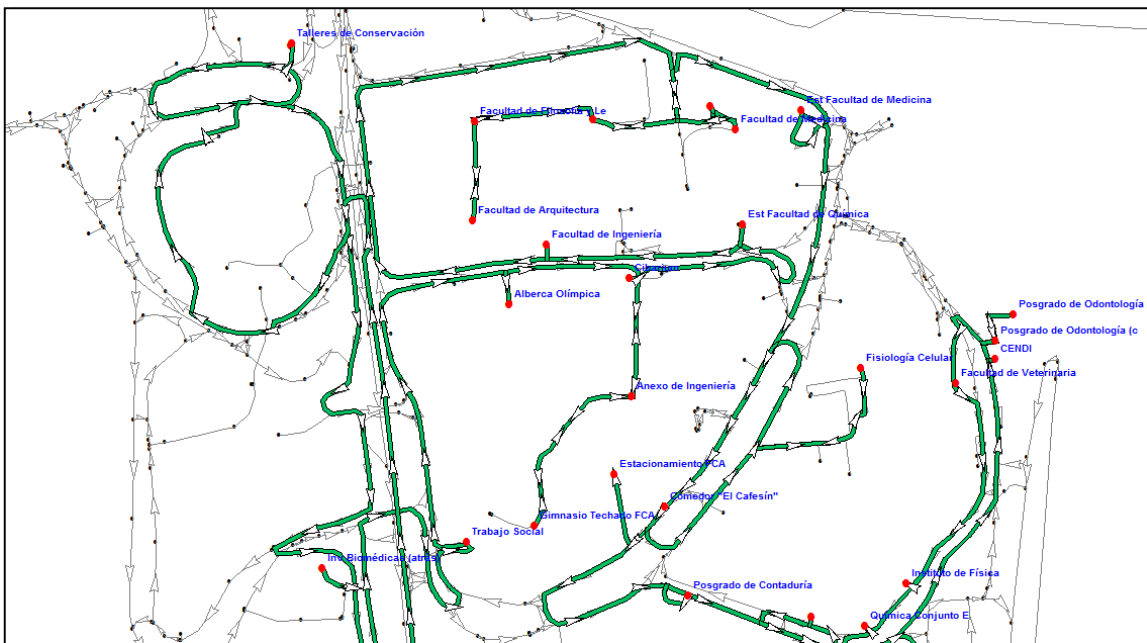


Figura 4.30. Recorrido de la ruta de la basura orgánica por CU. Fuente: Elaboración Propia

### 4.2.3 Rutas de la tarde de basura inorgánica

En esta sección se describen las dos rutas del turno vespertino que recogen los residuos inorgánicos en Ciudad Universitaria, la ruta del Campus Central y aquella que recoge los puntos que más presentan acumulación de residuos y requieren una atención inmediata es llamada simplemente ruta de la tarde, además se describe la ruta orgánica.

#### 4.2.3.1 Ruta del Campus Central por la tarde

Para esta ruta se redujeron 3.05 kilómetros de recorrido haciendo más eficiente la recolección. Como se mencionó anteriormente, los problemas que se presentan durante el recorrido es que existe un gran número de personas que salen de sus clases, se dirigen a comer o se retiran a sus casas y utilizan la explanada de Medicina para salir hacia el metro Copilco, que es una zona importante dentro de este recorrido por lo cual en esa zona de la Explanada, pasando por la Facultad de Derecho y hasta la Facultad de Arquitectura el libre paso del camión se ve afectado por esas actividades y la velocidad a la que debe ir es moderada para evitar algún percance dentro de la Universidad. La figura 4.31 muestra el nuevo recorrido de la ruta del Campus Central.

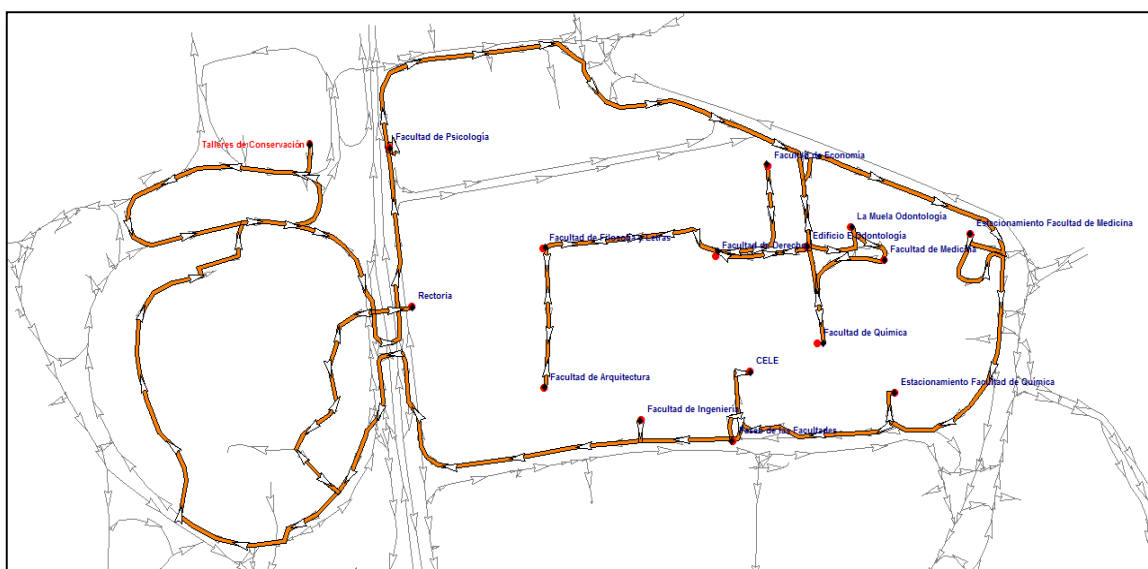


Figura 4.31. Recorrido de la ruta Campus Central.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.22 se muestra el recorrido y los tiempos de servicio de la ruta. Se observa que empieza a las tres de la tarde, hora a la que están programadas las dos rutas para comenzar su recorrido en la tarde.

Reporte de Itinerario					
Ruta: Campus Central Tarde		Tiempo Total: 2:20 hrs Distancia Total: 10941.1 m		Capacidad: 15.3 [m <sup>3</sup> ] Carga de Salida: 0	
No.	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		3:00pm		
<b>1</b>	Facultad de Psicología	3:04pm	3:12pm	1481.9	2
<b>2</b>	La Muela	3:17pm	3:24pm	1329.8	0.5
<b>3</b>	Facultad de Medicina	3:24pm	3:28pm	97.2	0.5
<b>4</b>	Facultad de Química	3:30pm	3:35pm	259.4	1.5
<b>5</b>	Facultad de Filosofía y	3:38pm	3:56pm	691.6	1.5
<b>6</b>	Facultad de Arquitectura	3:57pm	4:14pm	243.4	1.5
<b>7</b>	Facultad de Derecho	4:17pm	4:18pm	591.8	0.8
<b>8</b>	Facultad de Economía	4:21pm	4:22pm	241.5	0.5
<b>9</b>	Edificio E Odontología	4:26pm	4:33pm	424.1	1.5
<b>10</b>	Estacionamiento Medicina	4:35pm	4:39pm	664.2	0.8
<b>11</b>	Estacionamiento Química	4:42pm	4:47pm	698.9	1.5
<b>12</b>	CELE	4:49pm	4:55pm	475.9	0.5
<b>13</b>	Paseo de las Facultades	4:56pm	4:58pm	164.3	0.5
<b>14</b>	Facultad de Ingeniería	4:59pm	5:08pm	318.7	1.2
<b>15</b>	Rectoría	5:12pm	5:15pm	1443.4	0.4
<b>END</b>	Talleres de Conservación	5:20pm		1814.1	
<b>Total</b>				<b>10941.1</b>	<b>15.2</b>

Tabla 4.22. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta del Campus Central.

Fuente: Elaboración Propia.

El orden de la recolección cambia un poco en la parte central del recorrido (tabla 4.23), mientras que el recorrido actual comienza visitando la Muela en Odontología y se dirige hacia la Facultad Medicina y después a la de Química, el nuevo recorrido comienza antes de entrar a la parte de la explanada, recogiendo los residuos en el Edificio E de Odontología siguiendo hacia el lado de las islas donde se encuentra Filosofía y Letras y Arquitectura, para regresar a Derecho y continuar hasta la Explanada de Química y Medicina visitando en último lugar la Muela antes de salir de esa zona.

<b>Puntos de Recolección Ruta CC Tarde</b>	
<b>Actual</b>	<b>Solución para grupos de puntos</b>
Facultad de Psicología	Facultad de Psicología
La Muela	Edificio E Odontología
Facultad de Medicina	Facultad de Filosofía y Letras
Facultad de Química	Facultad de Arquitectura
Facultad de Filosofía y Letras	Facultad de Derecho
Facultad de Arquitectura	Facultad de Economía
Facultad de Derecho	Facultad de Química
Facultad de Economía	Facultad de Medicina
Edificio E Odontología	La Muela
Estacionamiento Medicina	Estacionamiento Medicina
Estacionamiento Química	Estacionamiento Química
CELE	Paseo de las Facultades
Paseo de las Facultades	CELE
Facultad de Ingeniería	Facultad de Ingeniería
Rectoría	Rectoría

Tabla 4.23. Cambios en el orden de recolección en la Ruta del Campus Central.

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.2.3.2 Ruta de la Tarde

En la Ruta de la Tarde, la distancia total recorrida en el nuevo orden de recolección, se redujo 2.5 kilómetros. El orden de recolección cambió muy poco, pero a raíz de esos pequeños cambios la distancia se redujo en comparación con el recorrido actual. El nuevo orden de recolección se muestra en la figura 4.32.



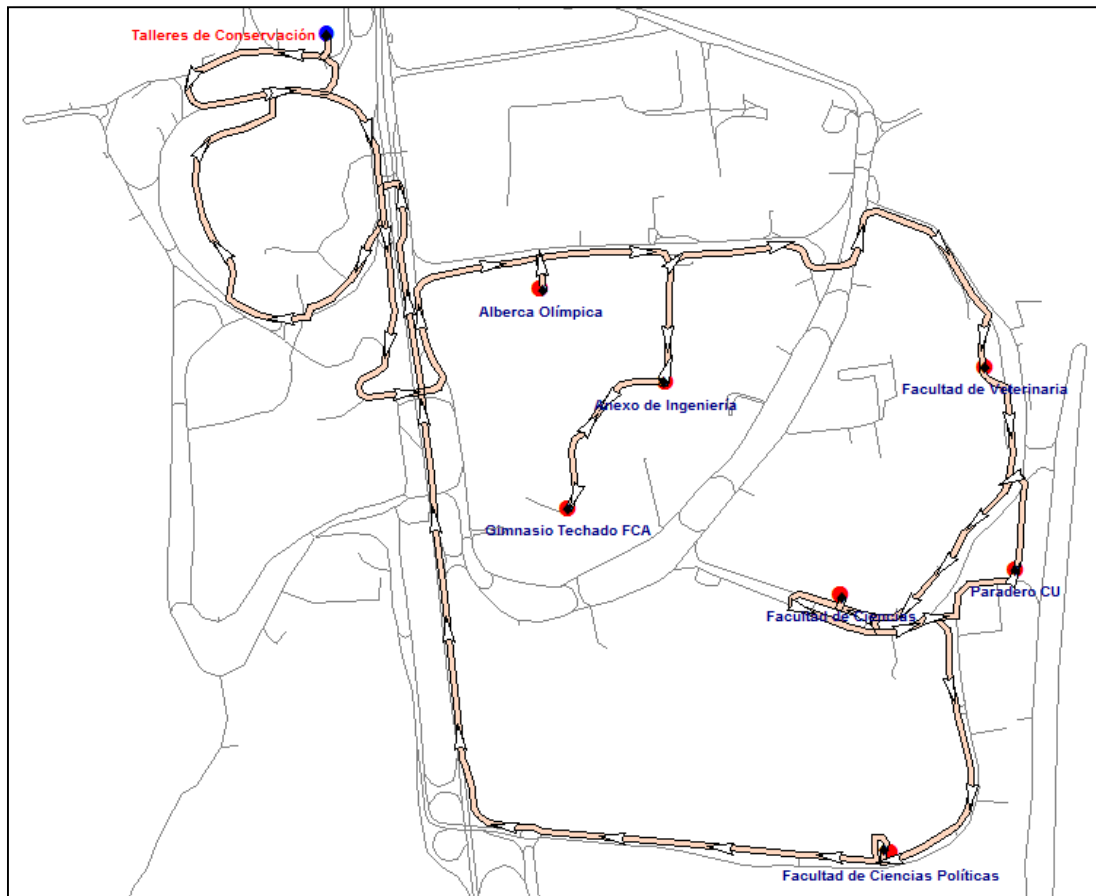


Figura 4.32. Recorrido de la Ruta de la Tarde.

Fuente: Elaboración Propia.

La tabla 4.24 muestra la información de la ruta de la Tarde. Se observa que comienza a las tres de la tarde y su duración, en horas, es muy corta; es una de las rutas en las que la recolección se hace en el menor tiempo a pesar de que son puntos en los que la acumulación de basura es alta.

<b>Reporte de Itinerario</b>					
<b>Ruta de la Tarde</b>		<b>Tiempo Total: 1:15</b> <b>Distancia Total: 13401.7</b>		<b>Capacidad: 15.3</b> <b>Carga de Salida: 0.0</b>	
<b>No.</b>	Nombre	Llegada	Salida	Distancia	Recolección
	Talleres de Conservación		3:00pm		
<b>1</b>	Alberca Olímpica	3:07pm	3:11pm	2494.2	2.2
<b>2</b>	Anexo de Ingeniería	3:14pm	3:22pm	718.6	1.9
<b>3</b>	Gimnasio Techado FCA	3:24pm	3:29pm	466.7	2.5
<b>4</b>	Facultad de Veterinaria	3:36pm	3:39pm	1950.5	2.3
<b>5</b>	Paradero CU	3:42pm	3:45pm	1265.2	1.5
<b>6</b>	Facultad de Ciencias	3:47pm	3:58pm	877.7	2.5
<b>7</b>	Facultad de Ciencias Políticas	4:02pm	4:06pm	1321.3	2.4
<b>END</b>	Talleres de Conservación	4:15pm		4307.2	
<b>Total</b>				<b>13401.7</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.24. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta de la Tarde.

Fuente: Elaboración Propia

Como se mencionó anteriormente, el orden de recolección sufrió pequeños cambios en comparación de la ruta actual (tabla 4.25), pero al realizarse esos cambios fue posible una reducción en la distancia total de recorrido.

<b>Puntos de Recolección Ruta Tarde</b>	
<b>Antes</b>	<b>Después</b>
Alberca Olímpica	Alberca Olímpica
Gimnasio Techado FCA	Anexo de Ingeniería
Anexo Ingeniería	Gimnasio Techado FCA
Facultad de Veterinaria	Facultad de Veterinaria
Facultad Ciencias	Paradero CU
Facultad Ciencias Políticas	Facultad de Ciencias
Paradero CU	Facultad de Ciencias Políticas

Tabla 4.25. Cambios en el orden de recolección en la Ruta de la Tarde.

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.4 Ruta de la basura orgánica por la tarde

En comparación con la ruta orgánica de la mañana, en el recorrido de la tarde (figura 4.33) la distancia total se redujo solamente 2.11 kilómetros. En la tabla 4.26 se observa el nuevo recorrido y los tiempos de llegada y salida de cada punto.

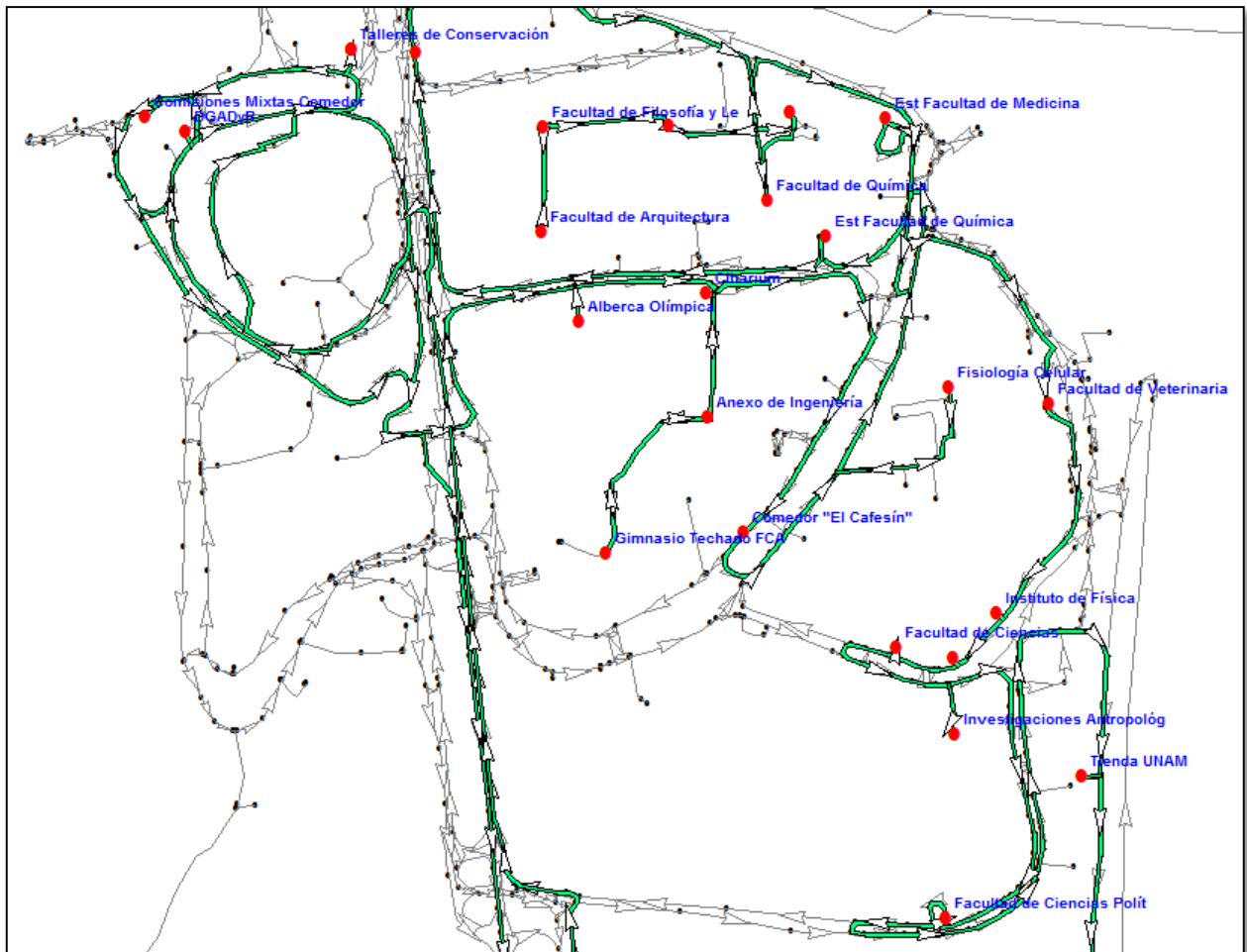


Figura 4.33. Recorrido de la Ruta Orgánica.

Fuente: Elaboración Propia

Reporte de Itinerario						
Ruta Orgánica por la Tarde			Tiempo Total: 2:20		Capacidad: 7.0 [m <sup>3</sup> ]	
			Distancia Total: 26683.6			
No.		Nombre	Salida	Llegada	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]
		Talleres de Conservación		3:44 pm		
1		Alberca Olímpica	3:51pm-	3:54pm	2492.3	0.3
2		Gimnasio Techado FCA	3:59pm-	4:01pm	1185.4	0.2
3		Anexo de Ingeniería	4:03pm-	4:04pm	466.7	0.1
4		Cibarium	4:05pm-	4:06pm	310.3	0.1
5		Comedor "El Cafesín"	4:09pm-	4:10pm	1055.8	0.1
6		Fisiología Celular	4:13pm-	4:14pm	899.1	0.1
7		Facultad de Veterinaria	4:19pm-	4:21pm	1576.2	0.4
8		Instituto de Física	4:23pm-	4:24pm	602.4	0.2
9		Química Conjunto E	4:25pm-	4:27pm	185	0.2
10		Facultad de Ciencias	4:28pm-	4:40pm	195.4	0.9
11		Investigaciones Antropológicas	4:42pm-	4:44pm	548.9	0.2
12		Tienda UNAM	4:47pm-	4:51pm	918.9	0.7
13		Facultad de Ciencias Polít	5:02pm-	5:03pm	4709	0.1
14		Facultad de Psicología	5:09pm-	5:10pm	3105.7	0.3
15		La Muela	5:15pm-	5:18pm	1329.8	0.4
16		Facultad de Química	5:19pm-	5:23pm	251.8	0.4
17		Facultad de Derecho	5:26pm-	5:28pm	377.9	0.4
18		Facultad de Filosofía y Letras	5:29pm-	5:31pm	313.7	0.4
19		Facultad de Arquitectura	5:33pm-	5:37pm	243.4	0.5
20		Estacionamiento de Medicina	5:44pm-	5:47pm	1431.5	0.5
21		Estacionamiento de Química	5:49pm-	5:52pm	698.9	0.2
22		DGADyR	5:58pm-	5:59pm	2331.2	0.1
23		Comisiones Mixtas Comedor	6:00pm-	6:01pm	284.5	0.1
<b>END</b>		Talleres de Conservación	6:04pm		1168.8	
<b>Total</b>					<b>26683.6</b>	<b>6.9</b>

Tabla 4.26. Tiempos de Servicio y Demanda por punto de la Ruta Orgánica.

Fuente: Elaboración Propia

El orden de recolección entre la ruta actual y la nueva no cambian mucho, conserva, en su mayoría, el mismo orden, salvo en algunos casos en los que se visitan antes otros puntos; por ejemplo, el Cibarium es el segundo punto en visitarse después de la Alberca Olímpica en la ruta actual, con el nuevo recorrido es el cuarto punto. Lo mismo pasa con la Facultad de Química y la Muela. En la tabla 4.27 se observan los pocos cambios que hubo en el recorrido.

<b>Puntos de Recolección de la Ruta Orgánica</b>	
<b>Actual</b>	<b>Solución para grupos de puntos</b>
Alberca Olímpica	Alberca Olímpica
Cibarium	Gimnasio Techado FCA
Anexo Ingeniería	Anexo de Ingeniería
Gimnasio Techado FCA	Cibarium
Comedor "El Cafesín"	Comedor "El Cafesín"
Fisiología Celular	Fisiología Celular
Facultad Veterinaria	Facultad de Veterinaria
Instituto de Física	Instituto de Física
Química Conjunto E	Química Conjunto E
Facultad Ciencias	Facultad de Ciencias
Investigaciones Antropológicas	Investigaciones Antropológicas
Facultad Ciencias Políticas	Facultad de Ciencias Políticas
Tienda UNAM	Tienda UNAM
Facultad Psicología	Facultad de Psicología
Facultad Química	La Muela
La Muela	Facultad de Química
Facultad Derecho	Facultad de Derecho
Facultad Filosofía y Letras	Facultad de Filosofía y Letras
Facultad Arquitectura	Facultad de Arquitectura
Estacionamiento de Medicina	Estacionamiento de Medicina
Estacionamiento de Química	Estacionamiento de Química
DGADyR	DGADyR
Comisiones Mixtas Comedor	Comisiones Mixtas Comedor

Tabla 4.27. Cambios en el orden de recolección en la Ruta Orgánica.

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.5 Resumen de la solución y comparación con la situación actual (mañana y tarde)

En las tablas 4.28 y 4.29 se muestra un resumen de los resultados obtenidos anteriormente. Como ya se describió en las secciones previas, se obtuvo una reducción en la distancia total para los recorridos, siendo la Ruta Deportiva la que presenta una mayor reducción. En la sección 4.5 se describen dos escenarios para esta ruta, la cual presenta un problema de acceso al UDUAL que hace que se tenga que saltar ese punto y después regresar a éste, incrementando la distancia del recorrido. La Ruta del Circuito Exterior, a comparación con la Deportiva se redujo muy poco en distancia.

Rutas Matutinas	Situación Actual		Solución para los Grupos de puntos	
	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)
<b>Ruta Deportiva</b>	4:58	70.3	3:45	57.6
<b>Ruta Campus Central</b>	4:46	36	4:41	30.3
<b>Ruta Circuito Exterior</b>	2:28	16.8	2:03	14.18
<b>Ruta de los Institutos</b>	4:09	47.4	3:55	50.1
<b>Ruta Orgánica</b>	4:00	45.5	3:43	35.3
<b>TOTAL</b>	<b>20:21</b>	<b>216</b>	<b>18:07</b>	<b>187.48</b>

Tabla 4.28. Resumen de los recorridos matutinos. Fuente: Elaboración Propia.

La distancia total recorrida para las rutas de la tarde disminuyó muy poco en comparación con las rutas de la mañana.

	Situación Actual		Solución para los Grupos de puntos			
Rutas Vespertinas	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)	Diferencia Tiempo	Diferencia Distancia (km)
Ruta Tarde	1:46	15.9	1:15	13.4	0:31	2.5
Ruta Campus Central	2:33	14	2:20	10.94	0:13	3.06
Ruta Orgánica	2:48	28.6	2:20	26.7	00:28	1.916
<b>Total</b>	<b>07:07</b>	<b>58.5</b>	<b>05:55</b>	<b>51.0</b>	<b>01:12</b>	<b>7.48</b>

Tabla 4.29. Resumen de los recorridos vespertinos. Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.2.6 Inconvenientes de esta solución (mañana y tarde)

Los resultados obtenidos para la solución de grupos de puntos logra el objetivo de este estudio, que es el de reducir la distancia de los recorridos. A diferencia de la solución inicial descrita en la sección 4.1 para ambos turnos, estos nuevos itinerarios solo cambian el orden en el que se visitan los puntos actuales lo que permite, respetando las ventanas de tiempo establecidas para cada punto, lograr que la recolección se realice de mejor forma. El único inconveniente es que la Ruta de los Institutos aumentó la distancia de recorrido en casi tres kilómetros. Para las rutas de la tarde se obtuvo una mayor reducción de distancia en la Ruta del Campus Central en comparación con la de la Tarde y la Orgánica en las que se redujeron casi tres kilómetros. Con esta solución se busca ayudar al personal de recolección a hacer mejor su trabajo diario.

#### 4.2.7 Escenarios de mejoramiento del recorrido de la Ruta Deportiva

En esta sección se describen tres escenarios para la Ruta Deportiva. Como se ha mencionado, el problema radica en que el acceso al UDUAL es necesariamente a las 8:30 hrs. Este punto se encuentra dentro de los primeros en el orden que sigue actualmente el recorrido, sin embargo el que no se tenga acceso antes de esa hora implica el tener que saltarlo y regresar después hasta poder entrar a recoger el contenedor que ahí se encuentra, lo que provoca que la distancia recorrida aumente en la ruta.

#### 4.2.7.1 Ruta Deportiva. Escenario 1

La solución de la ruta Deportiva descrita en la sección 4.2.1.1 no fue la mejor obtenida debido a que la ruta comienza su recorrido a las 8:17 hrs. Como se ha venido diciendo antes, todas las rutas deben empezar a las 7:00 hrs o antes, y que ésta comience después de las ocho de la mañana puede ser causa de una demora en el recorrido de esa ruta. En la figura 4.34 se muestran los puntos los cuales, durante la recolección, son los primeros en ser visitados, especialmente el UDUAL al que se tiene acceso hasta las 8:30 hrs lo que provoca que se tengan que hacer constantes visitas al punto para ver si el acceso puede ser antes, lo cual la mayoría de las veces no sucede. En la tabla 4.30 que contiene a este grupo de puntos, en el registro del UDUAL, se decidió establecer las ventanas de tiempo más estrictas en los puntos señalados en la figura 4.34, para que el recorrido comience atendiendo otros puntos y una vez que se acerque la hora de apertura del UDUAL se pueda recorrer toda esa zona sin tener que dar vueltas innecesarias que aumentan el tiempo y la distancia de recorrido.

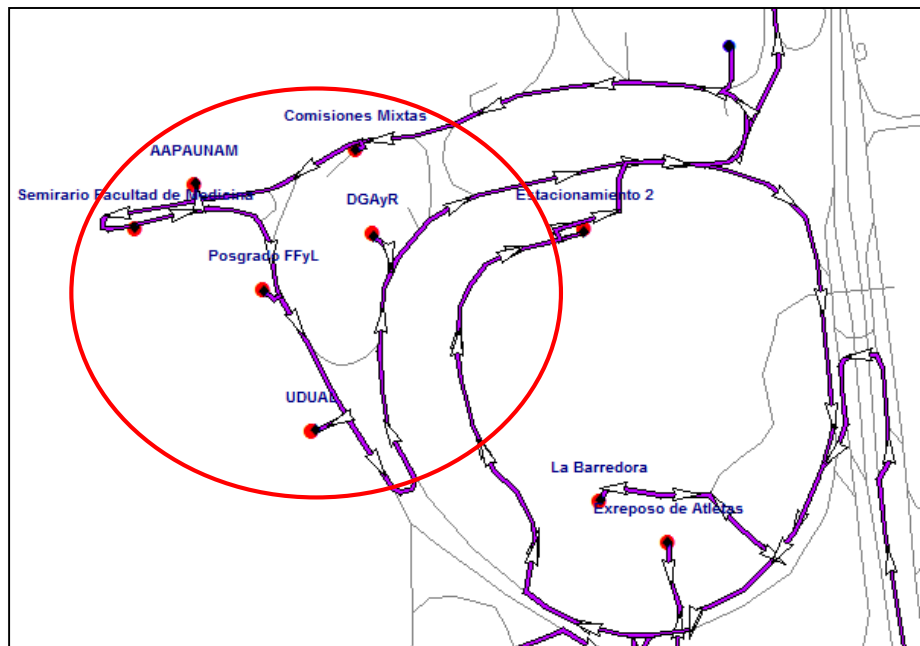


Figura 4.34. Recorrido de la Ruta Deportiva. Escenario 1

Fuente: Elaboración Propia.



La tabla 4.30 muestra el grupo de puntos que visita la Ruta Deportiva. Las ventanas de tiempo se definen dentro de las columnas *Open Time* y *Close Time*. Para los puntos dentro del recuadro en rojo se ha definido la apertura a las 8:30 hrs. Se hace la suposición de que a esa hora abren, aunque en la realidad no es así (abren antes), esto con la finalidad de que en este escenario se obtenga un recorrido, primero para los puntos en los que se estableció la ventana de tiempo a partir de las 5:50 hrs con el fin de que se atiendan primero, dejando para al final los puntos señalados en la figura 4.34.

Name	[Open Time]	[Close Time]
<b>AAPAUNAM</b>	830	1200
<b>Semirario Facultad de Medi</b>	830	1200
<b>Comisiones Mixtas</b>	830	1200
<b>DGAyR</b>	830	1200
<b>Posgrado FFyL</b>	830	1200
<b>UDUAL</b>	830	900
Estacionamiento 2	550	1000
La Barredora	550	1000
Exreposito de Atletas	550	1000
Medicina del Deporte	550	1000
Pista el Tartan	550	1000
Multifamiliar	550	1000
CEPE	550	1000
Jardín Botánico (Acceso)	550	1000
Investigaciones Biomédica:	550	1000
Seminarios	550	1000
Cabaña	550	1000
Publicaciones	550	1000
Talleres de Zoquipa	550	1200
Gasolineria Eje 10	550	1000
Planta Incineradora	550	1000
Instituto de Biología	550	1000
Pumitas	550	1000

Tabla 4.30. Tabla de *Stops* de la Ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.31 se muestra el nuevo recorrido de la ruta. Se observa que la hora de salida de los Talleres de Conservación es más temprano, a las 7:26 hrs, y la recolección comienza en La Barredora siguiendo por la zona de los campos deportivos y después hacia el Jardín Botánico respetando las ventanas de tiempo establecidas para los puntos ubicados detrás del Estadio Olímpico (ver figura 4.34). Una vez hecha la visita a esa zona, el recorrido continúa hacia el Estacionamiento 2 del Estadio Olímpico y se dirige hacia el Eje 10 Sur donde recoge tres puntos más, CEPE, Gasolinera Eje 10 y Publicaciones, antes de visitar el punto más lejano que son los Talleres de Zoquipa.

En la figura 4.35 se muestra con mejor detalle, parte del recorrido en la zona del estadio; las líneas de mayor grosor indican que el camión recolector tuvo que pasar por esas vías dos veces para poder cumplir con su itinerario de viaje. Cuando sale de los Talleres de conservación no se dirige inmediatamente hacia el AAPAUNAM que es el primer punto que se recoge actualmente, sino que toma el retorno y se dirige a la Barredora como lo muestra la tabla 4.30.

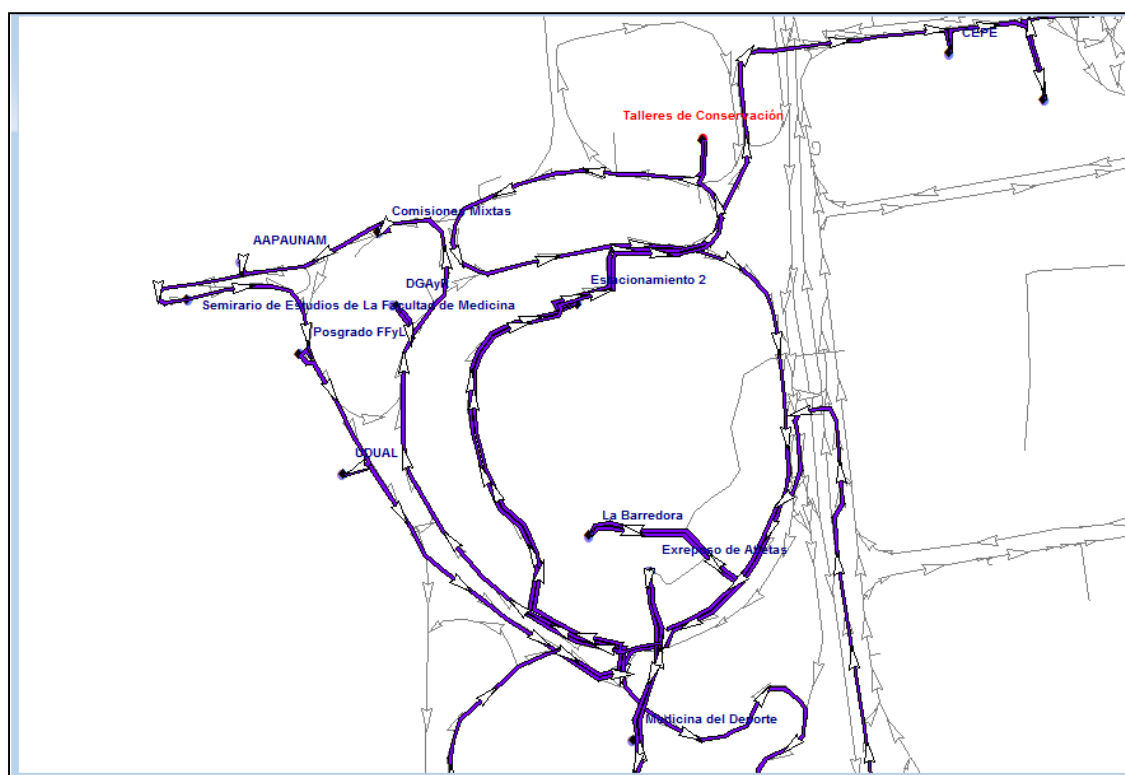


Figura 4.35. Ruta Deportiva. Escenario 1. Fuente: Elaboración Propia.

El recorrido continúa por los campos de futbol Pumitas, la Planta incineradora y de ahí parte al Jardín Botánico (ver Figura 4.36).

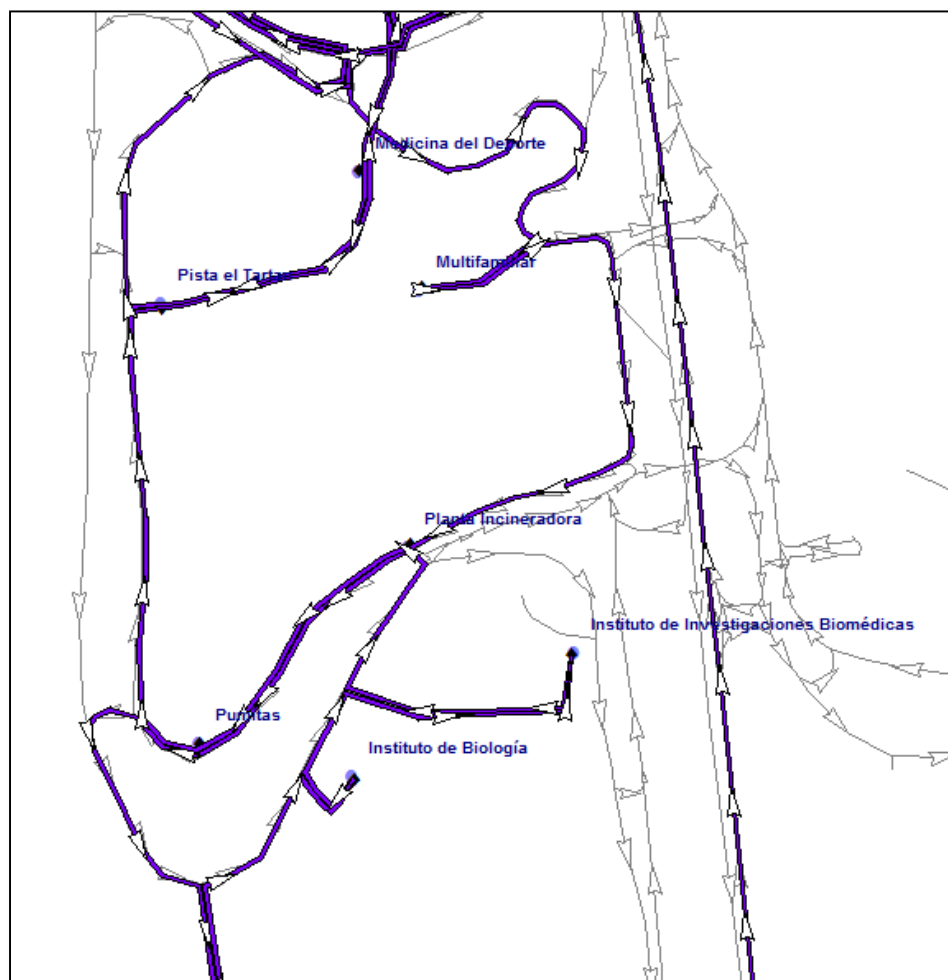


Figura 4.36. Recorrido por la zona de campos Pumitas.

Fuente: Elaboración Propia.

La recolección dentro del Jardín Botánico es la misma que actualmente existe, el único cambio es que primero recoge en el Punto de Acceso al Jardín y luego continúa a los Seminarios y finalmente a la Cabaña (ver figura 4.37).

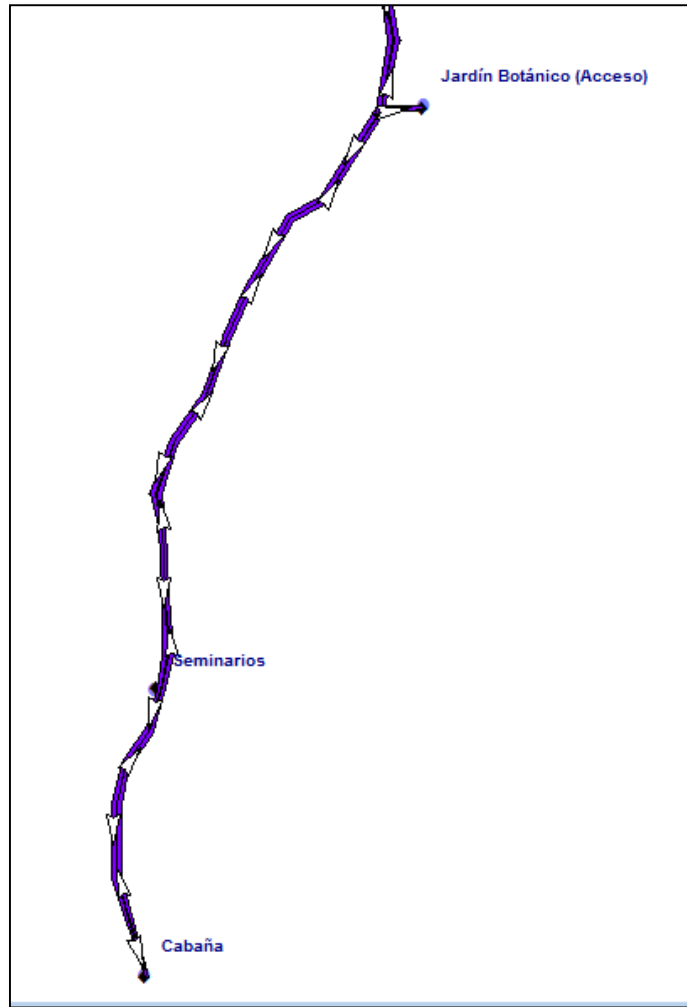


Figura 4.37. Recorrido dentro del Jardín Botánico.

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez que termina la recolección en el Estacionamiento 2 pasa por el Eje 10 sur y de ahí hacia Calzada de la Viga en dirección a Zoquipa. (Figura 4.38)

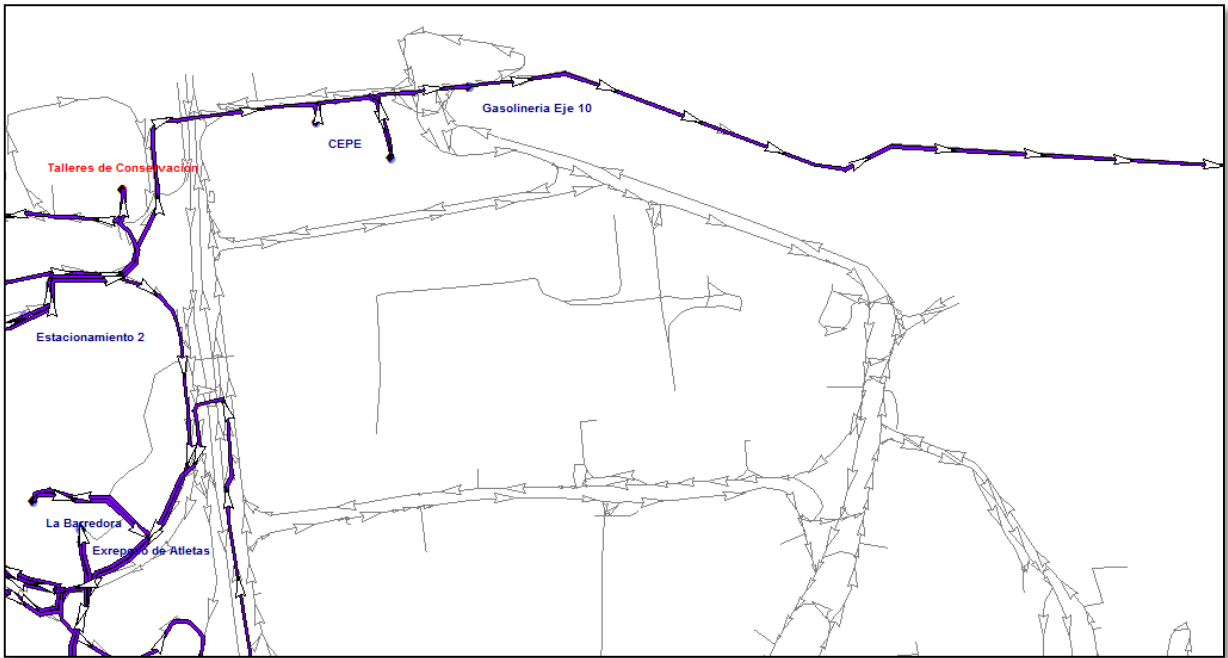


Figura 4.38. Recorrido de la ruta Deportiva por el Eje 10 Sur.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 4.31 se muestra el itinerario del escenario uno para la Ruta Deportiva.

Reporte de Itinerario						
Ruta Deportiva		Tiempo Total: 4:04 hrs		Capacidad: 15.3 [m <sup>3</sup> ]		
Escenario 2		Distancia Total: 58325.7 m		Carga de Salida: 0		
No.	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		7:27am			
1	La Barredora	7:32am	7:37am	1589	0.8	--
2	Multifamiliar	7:41am	7:42am	1112.4	0.6	--
3	Planta Incineradora	7:44am	7:46am	706.8	1	--
4	Pumitas	7:47am	7:51am	346	1	--
5	Jardín Botánico (Acceso)	7:53am	7:56am	591.6	0.9	--
6	Seminarios	7:58am	7:59am	735.1	0.4	--
7	Cabaña	8:00am	8:02am	318.3	0.1	--
8	Instituto de Biología	8:07am	8:09am	1434.1	0.7	--
9	Investigaciones Biomédicas	8:11am	8:15am	490.9	0.7	--
10	Pista el Tartán	8:19am	8:20am	1353.5	0.1	--
11	Ex reposo de Atletas	8:22am	8:24am	535.5	0.5	--
12	Medicina del Deporte	8:25am	8:26am	245.2	0.6	--
13	DGAyR	8:30am	8:33am	1446.4	0.6	--
14	Comisiones Mixtas	8:34am	8:36am	312.2	0.8	--
15	AAPAUNAM	8:37am	8:40am	246.1	0.9	--
16	Seminario Medicina	8:41am	8:42am	191.7	0.1	--
17	Posgrado FFyL	8:43am	8:44am	278.5	0.6	--
18	UDUAL	8:45am	8:53am	230.8	1	--
19	Estacionamiento 2	8:56am	9:00am	1214.1	0.9	--
20	CEPE	9:03am	9:08am	908.2	0.9	--
21	Publicaciones	9:09am	9:10am	252.8	0.5	--
22	Gasolinera Eje 10	9:12am	9:14am	316.1	0.7	--
23	Talleres de Zoquipa	9:36am	9:52am	17070.8	0.8	--
24	Centro de Transferencia	10:18am	10:50am	15813.4	--	15.3
END	Talleres de Conservación		11:14am	10584.8		
Total				<b>58325.7</b>	<b>15.2</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.31. Itinerario del escenario dos de la Ruta Deportiva

Fuente: Elaboración Propia.

En este itinerario se observa que el recorrido ya no inicia visitando los puntos cercanos al UDUAL, que son Comisiones Mixtas, AAPAUNAM, Seminario, Posgrado de FFyL y la Dirección de Actividades Deportivas y Recreativas, sino que se dirige primero a la Barredora y conforme avanza y, mientras se acerca la hora de apertura de los puntos a los que se les definió la hora de acceso a las 8:30 hrs visita otros puntos. El UDUAL es visitado a las 8:45 hrs y de ahí visita los puntos que están a su alrededor. Este segundo escenario cumple con el objetivo de visitar el UDUAL después de las 8:30 hrs.

En este nuevo recorrido la distancia disminuyó de 70.3 km que es lo que se recorre actualmente, a 58.3 kilómetros. El problema de este escenario uno es que la salida del camión de los Talleres de Conservación es a las 7:27 hrs y el camión debe iniciar la recolección antes de las 7:00 hrs.

#### 4.2.7.2 Ruta Deportiva. Escenario 2

Otro escenario que se planteó para atender el problema con el horario de apertura del UDUAL es sugerir a la Dirección General de Obras y Conservación hablar con las autoridades encargadas de dar acceso a ese punto y que lleguen a algún acuerdo para que el acceso sea más temprano, o incluso que se les proporcione los medios necesarios, como una tarjeta magnética, para entrar sin mayor dificultad.

En un escenario idóneo para mejorar la recolección de esta ruta, como ya se mencionó, es que el punto abra a la misma hora que todos los demás. Planteado esto, se realizó un tercer escenario con el mismo tiempo de apertura para todos los puntos (tabla 4.32).

Name	[Open Time]	[Close Time]
	640	1200
Semirario Facultad de Medicina	640	1200
Comisiones Mixtas	640	1200
DGAyR	640	1200
Posgrado FFyL	640	1200
UDUAL	640	1200
Estacionamiento 2	640	1200
La Barredora	640	1200
Exreposito de Atletas	640	1200
Medicina del Deporte	640	1200
Pista el Tartan	640	1200
Multifamiliar	640	1200
CEPE	640	1200
Jardín Botánico (Acceso)	640	1200
Investigaciones Biomédicas	640	1200
Seminarios	640	1200
Cabaña	640	1200
Publicaciones	640	1200
Talleres de Zoquipa	640	1200
Gasolinera Eje 10	640	1200
Planta Incineradora	640	1200
Instituto de Biología	640	1200
Pumitas	640	1200

Tabla 4.32. Datos utilizados para el escenario tres de la Ruta Deportiva

Fuente: Elaboración Propia.

En la solución obtenida para este segundo escenario se tiene que el recorrido inicia a las 6:38 hrs y visita primero, como hasta ahora lo hace, los puntos ubicados detrás del Estadio Olímpico (ver Figura 4.39).



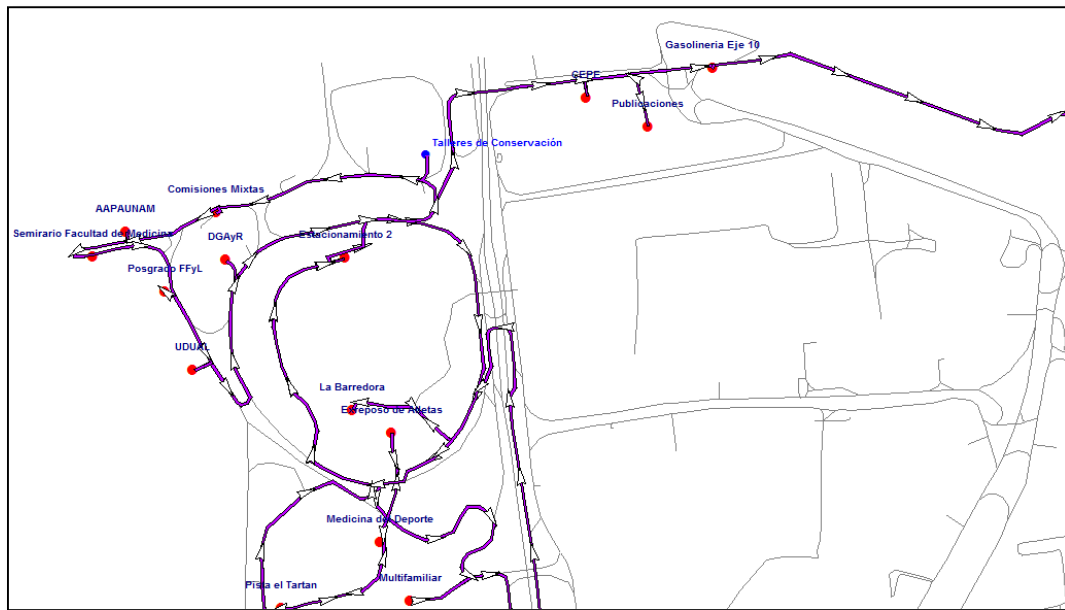


Figura 4.39. Recorrido de la ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia.

La distancia total recorrida disminuye, sin embargo es la misma que se obtuvo respetando la ventana de tiempo del UDUAL. Con esta modificación al horario de apertura la recolección en esta zona se hará de manera más eficiente sin tener que dar varias vueltas para que se permita el acceso (Ver tabla 4.33).

Reporte de Itinerario						
Ruta Deportiva		Tiempo Total: 3:45 hrs		Capacidad: 15.3 [m <sup>3</sup> ]		
Escenario 3		Distancia Total: 57647.2 m		Carga de Salida: 0		
No.	Nombre	Llegada	Salida	Distancia[m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		6:38am			
1	Comisiones Mixtas	6:40am	6:42am	518	0.8	--
2	AAPAUNAM	6:42am	6:46am	246.1	0.9	--
3	Seminario de Medicina	6:47am	6:48am	191.7	0.1	--
4	Posgrado FFyL	6:49am	6:50am	278.5	0.6	--
5	UDUAL	6:51am	6:59am	230.8	1	--
6	DGAyR	7:00am	7:04am	485.6	0.6	--
7	La Barredora	7:07am	7:11am	1277.9	0.8	--
8	Multifamiliar	7:16am	7:17am	1112.4	0.6	--
9	Planta Incineradora	7:19am	7:21am	706.8	1	--
10	Pumitas	7:22am	7:26am	346	1	--
11	Jardín Botánico (Acceso)	7:28am	7:30am	591.6	0.9	--
12	Seminarios	7:33am	7:34am	735.1	0.4	--
13	Cabaña	7:35am	7:37am	318.3	0.1	--
14	Instituto de Biología	7:42am	7:44am	1434.1	0.7	--
15	Investigaciones Biomédicas	7:46am	7:50am	490.9	0.7	--
16	Pista el Tartán	7:54am	7:55am	1353.5	0.1	--
17	Ex reposo de Atletas	7:57am	7:59am	535.5	0.5	--
18	Medicina del Deporte	8:00am	8:01am	245.2	0.6	--
19	Estacionamiento 2	8:05am	8:09am	1499.5	0.9	--
20	CEPE	8:11am	8:16am	908.2	0.9	--
21	Publicaciones	8:17am	8:19am	252.8	0.5	--
22	Gasolinera Eje 10	8:20am	8:23am	316.1	0.7	--
23	Talleres de Zoquiapa	8:44am	9:01am	17070.8	0.8	--
24	Centro de Transferencia	9:27am	9:59am	15882.3	--	15.3
END	Talleres de Conservación	10:23am		10618.3		
<b>Total</b>				<b>57647.2</b>	<b>15.2</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.33. Tiempos de Servicio y Demanda por punto del tercer escenario de la Ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia.

En la zona de los campos deportivos (figura 4.40), la recolección continúa sin mayor problema teniendo una mejor organización que la que opera actualmente.

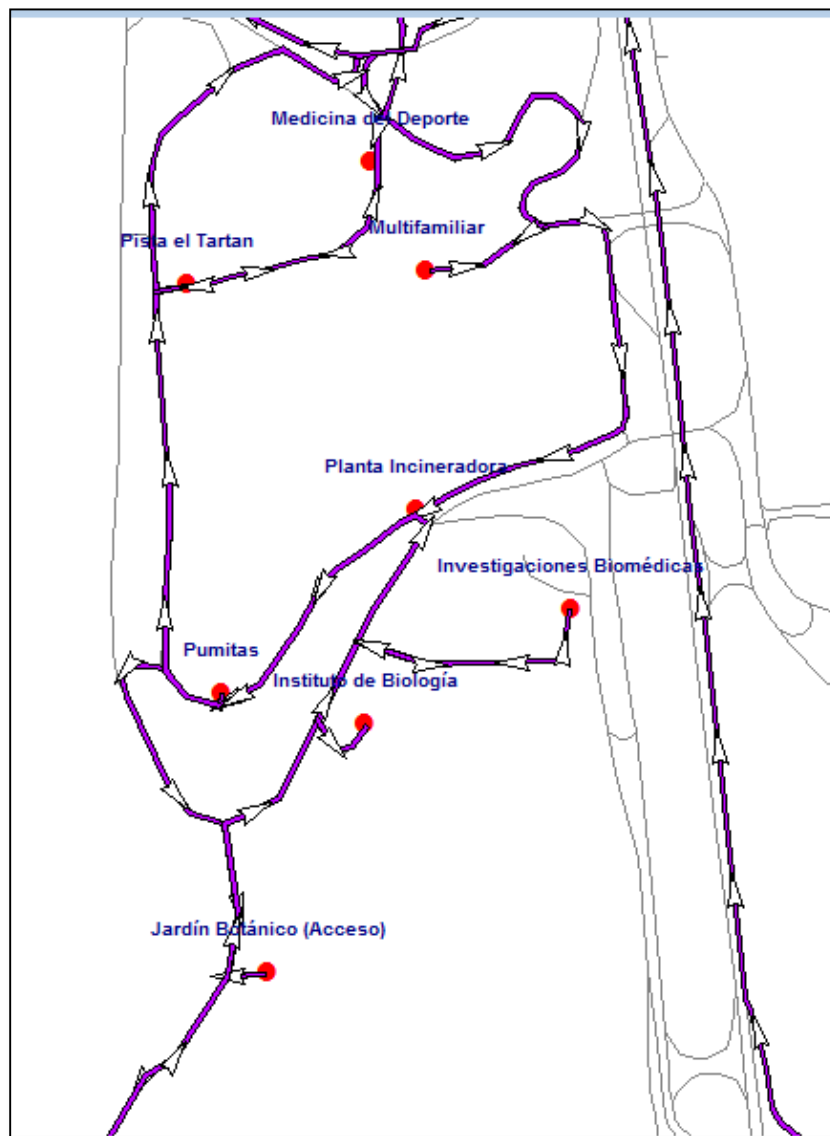


Figura 4.40. Recorrido de la ruta Deportiva en la zona de Campos Deportivos.

Fuente: Elaboración Propia.

La recolección en el Jardín Botánico (figura 4.41) no cambia porque son los mismos puntos y hay solo un camino para entrar a los puntos.

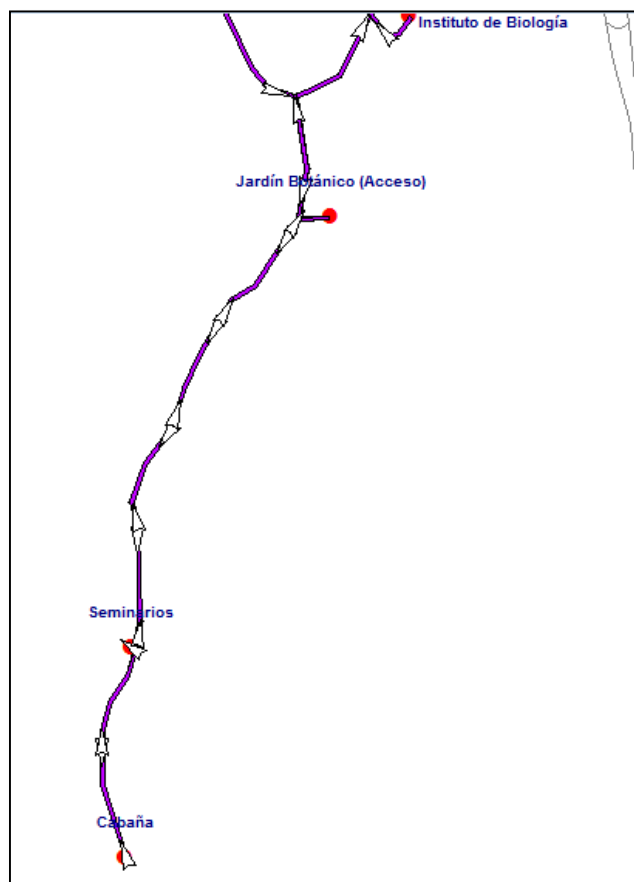


Figura 4.41. Recorrido de la ruta Deportiva en el Jardín Botánico.

Fuente: Elaboración Propia.

El recorrido sigue hasta alcanzar el último punto de recolección, los Talleres de Zoquipa (figura 4.42).

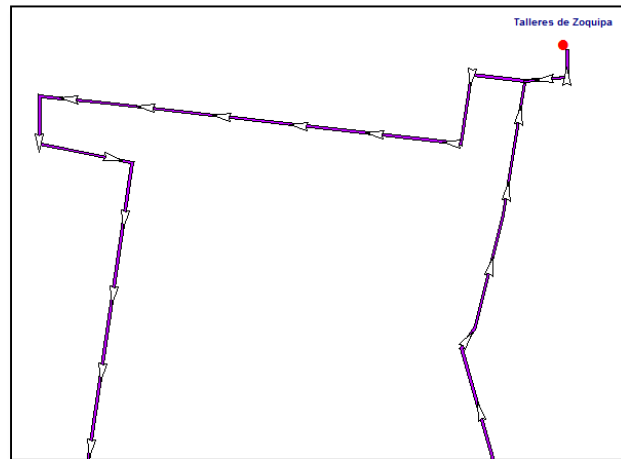


Figura 4.42. Recorrido de la ruta Deportiva en Zoquipa.

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, se lleva el camión a tirar los desechos al Centro de Transferencia (figura 4.43).

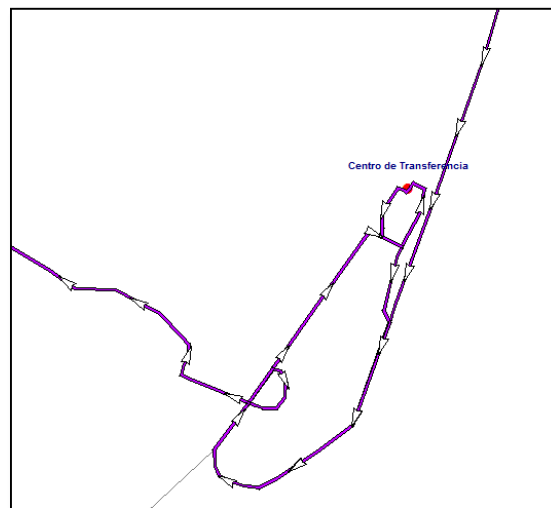


Figura 4.43. Recorrido de la ruta Deportiva en el Jardín Botánico.

Fuente: Elaboración Propia.

Éste sería el mejor escenario para que el recorrido se haga de una manera más eficiente, pero la solución depende de arreglos entre dependencias para que esto sea posible.

### 4.2.7.3 Ruta Deportiva. Escenario 3

En el escenario tres de la Ruta Deportiva se eliminó de su itinerario al punto de los Talleres de Zoquipa, para obtener un balance en los tiempos de recolección con las demás rutas. En la figura 4.34 se muestra el nuevo itinerario que se obtuvo para este escenario.

Itinerario						
Ruta Deportiva		Tiempo Total: 3:12 hrs		Capacidad: 15.3 [m <sup>3</sup> ]		
(Escenario 4)		Distancia Total: 36218.2 m		Carga de Salida: 0		
No.	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
	Talleres de Conservación		6:28am			
1	Comisiones Mixtas	6:30am	6:32am	519.9	0.8	--
2	AAPAUNAM	6:32am	6:36am	246.1	0.9	--
3	Seminario Facultad de Medicina	6:37am	6:38am	191.7	0.3	--
4	Posgrado FFyL	6:39am	6:40am	278.5	0.6	--
5	UDUAL	6:41am	6:49am	230.8	1	--
6	DGADyR	6:50am	6:54am	485.6	0.6	--
7	CEPE	6:56am	7:01am	1097.1	0.9	--
8	Publicaciones	7:02am	7:05am	252.8	0.5	--
9	Gasolinera Eje 10	7:06am	7:09am	316.1	0.7	--
10	La Barredora	7:21am	7:25am	3456.9	0.9	--
11	Estacionamiento 2	7:29am	7:33am	1146.7	0.9	--
12	Multifamiliar	7:37am	7:38am	1305.5	0.6	--
13	Planta Incineradora	7:40am	7:42am	706.8	1	--
14	Pumitas	7:43am	7:47am	346	1	--
15	Medicina del Deporte	7:50am	7:50am	871.3	0.7	--
16	Ex reposo de Atletas	7:51am	7:54am	245.2	0.5	--
17	Pista el Tartán	7:56am	7:57am	535.5	0.3	--
18	Seminarios	8:03am	8:04am	2318.5	0.4	--
19	Cabaña	8:05am	8:07am	318.3	0.3	--
20	Jardín Botánico (Acceso)	8:11am	8:16am	1039.6	0.9	--
21	Instituto de Biología	8:17am	8:19am	483.1	0.7	--
22	Investigaciones Biomédicas	8:22am	8:25am	490.9	0.7	--
23	Centro de Transferencia	8:43am	9:16am	8735	--	15.3
END	Talleres de Conservación	9:40am		10599		
<b>Total</b>				<b>36218.2</b>	<b>15.2</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.34. Tiempos de Servicio y Demanda por punto del cuarto escenario de la Ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia

Las ventanas de tiempo definidas para este nuevo escenario son las mismas que se utilizaron para el escenario dos ya que, al ser el escenario mejor para esta ruta, lo que se busca es que la recolección se realice sin el problema de apertura presente.

En la figura 4.44 se muestra el nuevo recorrido de la Ruta Deportiva. La distancia total de recorrido, comparada con el recorrido actual, se redujo más de la mitad. El tiempo total disminuyó en una hora.

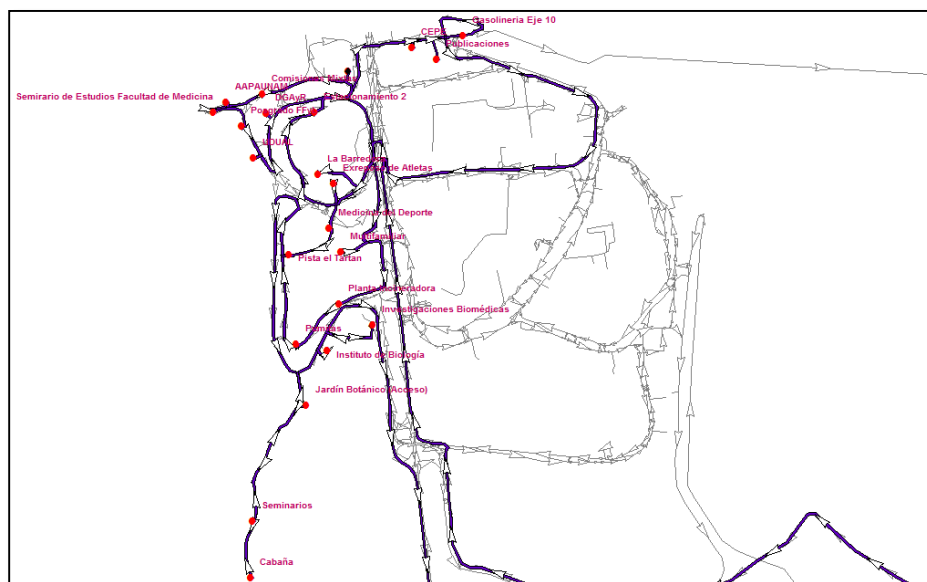


Figura 4.44. Puntos asignados al recorrido del Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia

La figura 4.45 se muestra todo el recorrido de la Ruta Deportiva que incluye el Centro de Transferencia.

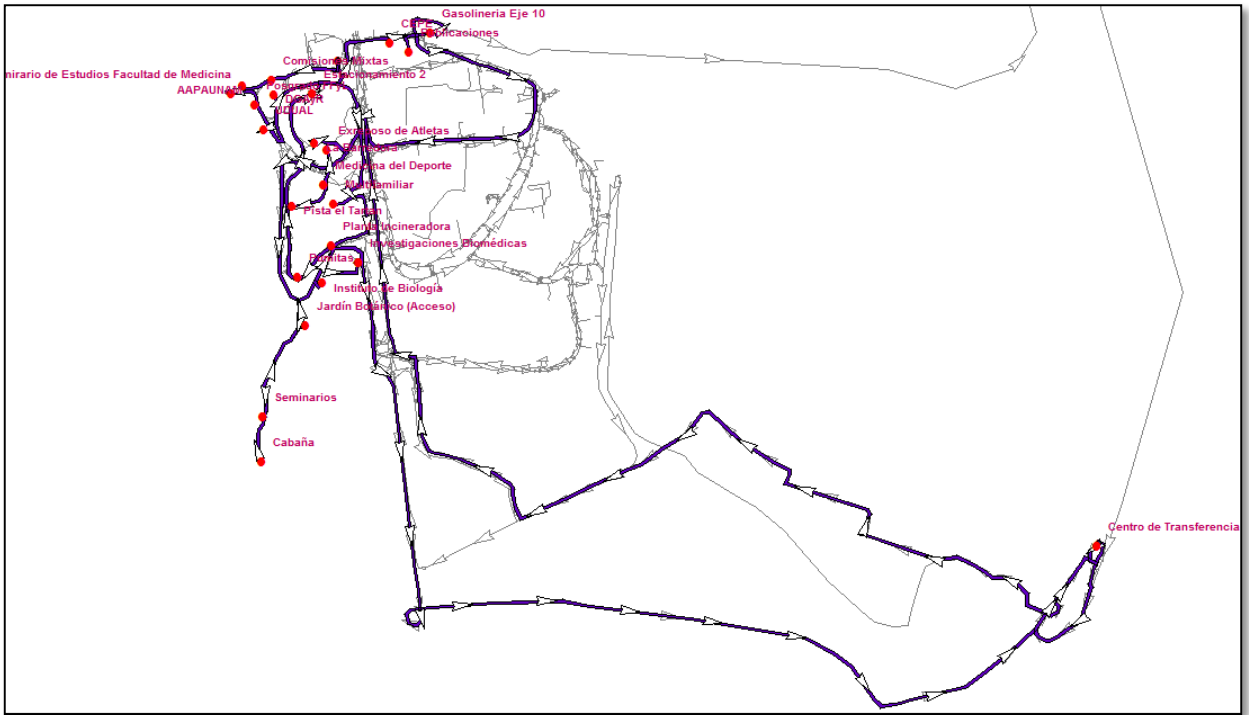


Figura 4.45. Puntos asignados al recorrido del Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia



#### 4.2.7.4 Resumen de las soluciones para grupos de puntos de la ruta Deportiva, y comparación con la situación actual

En la tabla 4.35 se muestran los tiempos y las distancias de los tres escenarios de la Ruta Deportiva y de la situación actual de ésta. En el primer escenario el tiempo y la distancia total recorrida son mayores, por una mínima diferencia, que en el escenario dos y que en la situación actual, debido a que la ventana de tiempo establecida es la misma para los puntos cercanos al UDUAL, que son Comisiones Mixtas, AAPAUNAM, Seminario, Posgrado de FFyL y la Dirección de Actividades Deportivas y Recreativas (8.30 hrs), lo que implica que el recorrido inicie a las 7:26 hrs siendo esta una hora inapropiada para iniciar la recolección porque, como ya se mencionó, los recorridos deben iniciar antes de las 7:00 hrs.

El segundo escenario, que sería el ideal para esta ruta, requiere que el UDUAL abra a la misma hora que todos los demás puntos. Con este cambio en el horario se haría un mejor recorrido ya que la distancia y el tiempo serían mejores que en los otros dos escenarios y que en la situación actual. El tercer escenario es en el que se quitó del recorrido los Talleres de Zoquipa con lo que el tiempo y la distancia de recorrido disminuyen más en comparación con los otros dos escenarios. Al quitar este punto del itinerario de la Ruta Deportiva, se decidió plantear otro escenario en el cual a la Ruta del Circuito Exterior se le incluyó recorrer los Talleres de Zoquipa, con el fin de conseguir un balance en tiempo y distancia de todos los recorridos. Este escenario de la Ruta del Circuito Exterior se describe en la siguiente subsección.

	<b>Soluciones Ruta Deportiva</b>	
<b>Ruta Deportiva</b>	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)
<b>Escenario 1</b>	3:47	58.3
<b>Escenario 2</b>	3:45	57.6
<b>Escenario 3</b>	<b>3:12</b>	<b>36.2</b>
<b>Estado Actual</b>	4:58	70.3

Tabla 4.35. Resumen de los recorridos de la Ruta Deportiva.

#### 4.2.7.5 Ruta del Circuito Exterior. Escenario 1

Se generó el escenario uno de la ruta del Circuito Exterior, debido a que el tiempo de recorrido de esta ruta está desbalanceado con respecto al de las otras rutas. Así que ésta debe ser rediseñada para que, junto con las otras rutas tenga, aproximadamente, el mismo tiempo de recorrido.

La duración de esta ruta es menor que las otras, como se muestra en la tabla 4.30, por lo que se decidió modificar el recorrido de la ruta agregándole a su itinerario los Talleres de Zoquipa para lograr que el tiempo de recorrido sea el mismo, o parecido, al de las otras rutas.

En la tabla 4.36 se muestra la tabla con los puntos que visita la ruta del Circuito Exterior. El punto de los Talleres de Zoquipa ya está incluido dentro de esta tabla.

Name
Dirección General de Proveduría
Relaciones Laborales
DGOyC
DGCCH
DGSM
Alberca Olímpica
Instituto de Ingeniería
IIMAS
DICyG
Posgrado de Contaduría
Comedor "El Cafesín"
Estacionamiento FCA
Anexo de Ingeniería
Trabajo Social
Fronton Cerrado
Gimnasio Techado FCA
Anexo DGTIC
La Reja
DGSCA
Talleres de Zoquipa
Posgrado de Ingeniería

Tabla 4.36. Puntos asignados al recorrido del Circuito Exterior. Fuente: Elaboración Propia.

Las ventanas de tiempo para este problema están definidas para todos los puntos desde las 6:00 hrs hasta las 12:00 hrs. La solución que se obtuvo para este nuevo escenario se muestra en la figura 4.46. Este nuevo recorrido comienza la recolección

en los primeros tres puntos más cercanos a los Talleres de Conservación que son Relaciones Laborales, Proveduría y DGOyC.

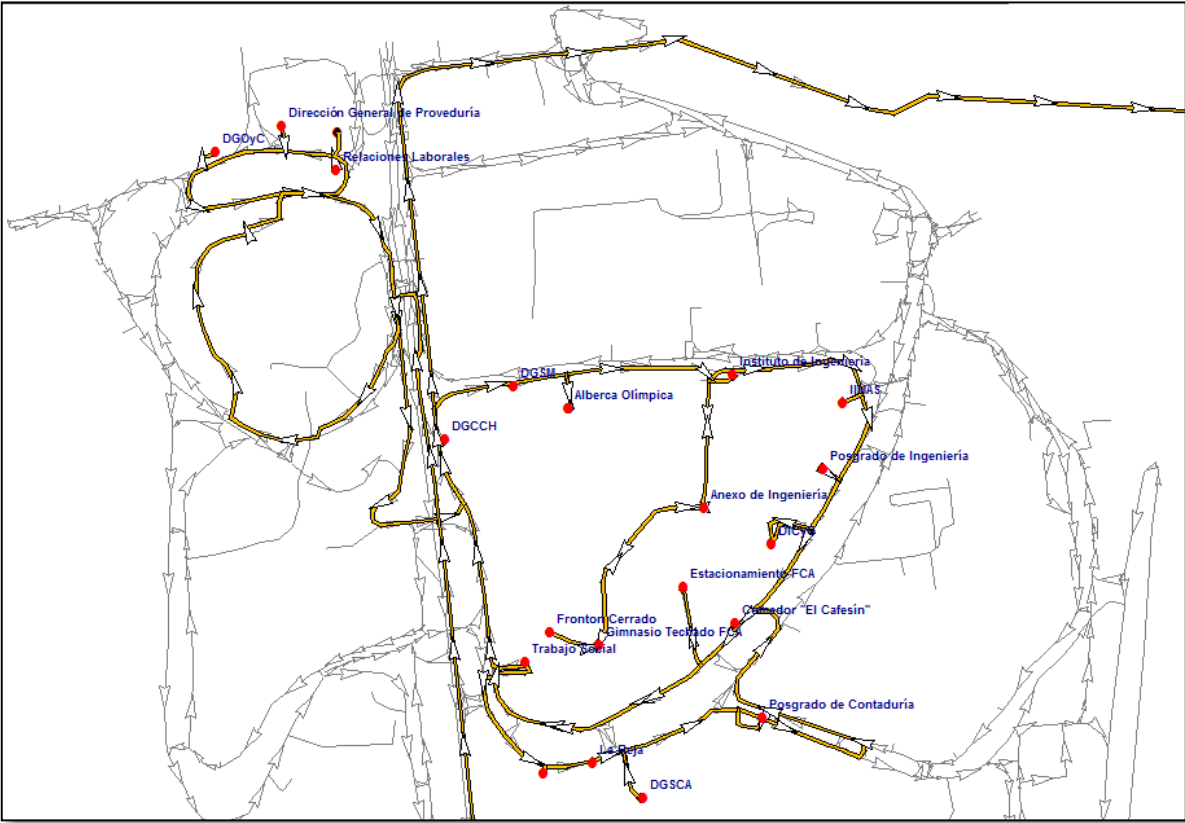


Figura 4.46. Recorrido de la ruta del Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez que se termina la recolección dentro de Ciudad Universitaria, siendo la DGCCH el último punto dentro del campus que visita, el recorrido continúa hasta los Talleres de Zoquipa siendo éste el nuevo punto de recolección del recorrido (figura 4.47).



Figura 4.47. Recorrido hasta los Talleres de Zoquipa.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 4.48 se muestra al recorrido llegando al Centro de Transferencia.

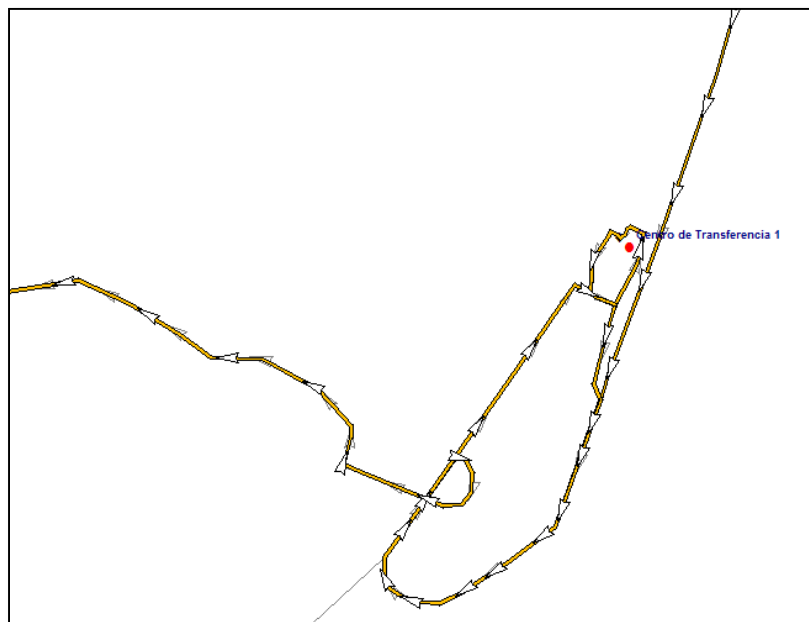


Figura 4.48. Llegada del recorrido al Centro de Transferencia.

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla 4.37 se muestra la comparación del recorrido actual, del que se obtuvo en la solución por grupo de puntos y del escenario uno para esta ruta.

<b>Ruta Circuito Exterior puntos de recolección</b>		
<b>Recorrido Actual</b>	<b>Solución para grupos de puntos</b>	<b>Escenario 1</b>
Relaciones Laborales	DGSM	Relaciones Laborales
Dirección General de Proveduría	Alberca Olímpica	Dirección General de Proveduría
DGOyC	Anexo de Ingeniería	DGOyC
Anexo DGTIC	Gimnasio Techado FCA	DGSM
La Reja	Frontón Cerrado	Alberca Olímpica
DGSCA	Instituto de Ingeniería	Instituto de Ingeniería
Posgrado FCA	IIMAS	Anexo de Ingeniería
Comedor "el Cafesín"	Posgrado de Ingeniería	Gimnasio Techado FCA
FCA Estacionamiento	DICyG	Fronton Cerrado
Trabajo Social	Comedor "El Cafesín"	IIMAS
DGCCH	Anexo DGTIC	Posgrado de Ingeniería
DGSM	La Reja	DICyG
Alberca	DGSCA	Comedor "El Cafesín"
Frontón Cerrado	Posgrado de Contaduría	FCA Estacionamiento
Gimnasio Techado FCA	Estacionamiento FCA	Anexo DGTIC
Anexo Ingeniería	Trabajo Social	La Reja
Instituto Ingeniería	DGCCH	DGSCA
IIMAS	Dirección General de Proveduría	Posgrado de Contaduría
DICyG	DGOyC	Trabajo Social
Red de Agua	Relaciones Laborales	DGCCH
		Talleres de Zoquipa

Tabla 4.37. Comparación de los cambios en el orden de recolección en la ruta de la Ruta Deportiva.

Fuente: Elaboración Propia.

Al comparar los tres recorridos se observan las siguientes características: el recorrido Actual y el Escenario uno inician la recolección en Relaciones Laborales, Proveduría y DGOyC mientras que en la solución que se obtuvo para grupos de puntos, los visita antes de regresar a los Talleres de Conservación.

El itinerario del nuevo recorrido con sus tiempos de inicio y fin, así como la demanda por punto se muestran en la tabla 4.38.

Reporte de Itinerario						
Ruta: Círculo Escolar Balanceada		Tiempo Total: 3:54 hrs Distancia Total: 56237.3 m		Capacidad: 15.3 [m <sup>3</sup> ] Carga de Salida: 0		
No.	Nombre	Llegada	Salida	Distancia [m]	Recolección [m <sup>3</sup> ]	Distribución [m <sup>3</sup> ]
1	Relaciones Laborales	6:25am	6:28am	87.7	0.6	--
2	Proveeduría	6:29am	6:31am	201.1	0.5	--
3	DGOyC	6:32am	6:34am	306	0.4	--
4	DGSM	6:39am	6:41am	2013.2	0.9	--
5	Alberca Olímpica	6:42am	6:45am	225.7	0.8	--
6	Instituto de Ingeniería	6:47am	6:53am	490.8	0.9	--
7	Anexo de Ingeniería	6:54am	7:00am	354.6	0.8	--
8	Gimnasio Techado FCA	7:02am	7:06am	466.7	1.2	--
9	Frontón Cerrado	7:08am	7:09am	116.5	0.4	--
10	IIMAS	7:15am	7:20am	1333	0.8	--
11	Posgrado de Ingeniería	7:21am	7:25am	308.2	0.8	--
12	DICyG	7:26am	7:27am	323.7	0.4	--
13	Comedor "El Cafesín"	7:29am	7:31am	399.8	0.6	--
14	Estacionamiento FCA	7:33am	7:37am	308.3	0.5	--
15	Anexo DGTIC	7:40am	7:43am	1056.3	0.3	--
16	La Rreja	7:44am	7:45am	133.3	0.5	--
17	DGSCA	7:46am	7:51am	199.6	1.1	--
18	Posgrado de Contaduría	7:54am	7:57am	516.1	1.2	--
19	Trabajo Social	8:03am	8:11am	1877.1	1.1	--
20	DGCCH	8:13am	8:16am	634.8	0.8	--
21	Talleres de Zoquiapa	8:40am	8:57am	18383	0.7	--
22	Centro de Transferencia	9:22am	9:55am	15901.6	--	15.3
END	Talleres de Conservación	10:19am		10599		
<b>Total</b>				<b>56237.3</b>	<b>15.3</b>	<b>15.3</b>

Tabla 4.38. Tiempos de Servicio y Demanda por punto del escenario del Circuito Exterior

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, al realizar una comparación con la situación actual y el escenario uno (tabla 4.39) se observa que tanto el tiempo como la distancia total de recorrido aumentan, lo cual se debe al nuevo punto en la ruta.

Ruta	Situación Actual		Escenario 1	
	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)
<b>Círculo Exterior</b>	<b>2:28</b>	<b>16.8</b>	<b>3:54</b>	<b>56.2</b>

Tabla 4.39. Comparación de distancia y tiempo total de recorrido de la ruta del Circuito Exterior.

Fuente: Elaboración Propia.

Si se compara el resultado del escenario uno de la ruta del Circuito Exterior con las demás rutas (tabla 4.40), se observa que la duración es casi la misma para los cinco recorridos. Con esta mejora se busca que todas las rutas tengan la misma duración o que ésta sea aproximada. Se observa que con este nuevo escenario todas las rutas duran al menos tres horas.

Rutas Matutinas	Actual		Solución Balanceada	
	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)	Tiempo Total (Horas)	Distancia Total (km)
Ruta Deportiva (Escenario 4)	4:58	70.3	<b>3:12</b>	<b>36.2</b>
Ruta Campus Central	4:46	36	<b>3:33</b>	<b>30.8</b>
<b>Ruta Circuito Exterior (Escenario 1)</b>	<b>2:28</b>	<b>16.8</b>	<b>3:54</b>	<b>56.2</b>
Ruta de los Institutos	4:09	47.4	<b>3:55</b>	<b>50.1</b>
Ruta Orgánica	4:00	45.5	<b>4:21</b>	<b>35.3</b>
<b>Total</b>	<b>20:21</b>	<b>216.00</b>	<b>17:11</b>	<b>202.20</b>

Tabla 4.40. Comparación de distancia y tiempo total de recorrido de la ruta del Circuito Exterior de la mañana.

Fuente: Elaboración Propia.

### 4.3 Comparación general de las rutas actuales con las nuevas en sus mejores escenarios

A continuación, se presentan las tablas con la comparación de las soluciones obtenidas contra la situación actual de las rutas. Primero, se hace la comparación de las rutas matutinas actuales, su distancia y el tiempo total, contra los resultados obtenidos en la solución inicial (tabla 4.41), para posteriormente hacer la misma comparación pero con el mejor escenario que se obtuvo.

<b>Tabla de comparación de los Recorridos Matutinos</b>					
	Situación Actual			Solución Inicial	
<b>Rutas Matutinas</b>	<b>Tiempo Total (Horas)</b>	<b>Distancia Total (km)</b>	Ruta	<b>Tiempo Total (Horas)</b>	<b>Distancia Total (km)</b>
<b>Ruta Deportiva</b>	4:58	70.3	1	4:33	67.2
<b>Ruta Campus Central</b>	4:46	36	2	3:20	42.1
<b>Ruta Circuito Exterior</b>	2:28	16.8	3	3:22	36.4
<b>Ruta de los Institutos</b>	4:09	47.4	4	2:45	32.1
<b>Total</b>	<b>20:21</b>	<b>216</b>	<b>Total</b>	<b>14:00</b>	<b>177.8</b>

Tabla 4.41. Comparación de distancia y tiempo total de recorrido de la solución inicial contra la situación actual.

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que las cuatro rutas obtenidas en la solución inicial son muy diferentes en comparación con los recorridos actuales. La solución inicial no es una buena solución que se pueda proponer para mejorar la recolección, por lo ya explicado en la sección 4.1, que esta solución no representa la realidad de cómo se realiza la recolección, aunque su tiempo y distancia son menores. Esta solución inicial no representa la realidad, que requiere que dos vehículos lleven la basura (que fue recogida en la tarde) por las mañanas antes de empezar el recorrido.

En la tabla 4.42 se muestra la comparación de los recorridos actuales contra el mejor escenario obtenido después de resolver el Problema de Rutas de Vehículos.



En esta tabla se observa que la distancia total de recorrido de las rutas con su mejor escenario se redujo ocho kilómetros con respecto a la Situación Actual. Si se compara el tiempo total de la Ruta Orgánica actual con el mejor escenario, éste aumentó y la distancia se redujo casi en 10 kilómetros.

El valor de 0.98 en la desviación estándar nos indica una mayor variabilidad en los tiempos de los recorridos actuales, ya que éstos no tienen un balance como los que se muestran en la columna de los mejores escenarios en los cuales los tiempos tienen una menor variabilidad y su desviación estándar es menor. Lo mismo pasa con la distancia total, al existir un mejor balance en los mejores escenarios con respecto a la situación actual, la desviación estándar disminuye.

Rutas Matutinas	Situación Actual		Mejor Escenario	
	Tiempo Total (horas)	Distancia Total (km)	Tiempo Total (horas)	Distancia Total (km)
<b>Ruta Deportiva</b>	4.96	70.3	3.2	36.2
<b>Ruta Campus Central</b>	4.76	36	4.7	30.3
<b>Ruta Circuito Exterior</b>	2.46	16.8	3.90	56.2
<b>Ruta de los Institutos</b>	4.15	47.4	3.92	50.1
<b>Ruta Orgánica</b>	4	45.5	4.35	35.3
<b>TOTAL</b>	<b>20.33</b>	<b>216</b>	<b>20.07</b>	<b>208.1</b>
<b>Promedio</b>	4.07	43.2	4.01	41.62
<b>Desviación Estándar</b>	0.98	19.40	0.56	10.98

Tabla 4.42. Comparación de distancias y tiempos totales de recorrido entre la situación actual y el mejor escenario.

Fuente: Elaboración Propia.

Para los recorridos vespertinos (tabla 4.43) no hubo mucha mejoría al hacer la comparación con la solución inicial. Las distancias totales de recorrido aumentaron casi al doble en la solución inicial mientras que el tiempo total aumentó casi dos horas más que el recorrido actual ya que la solución inicial contempla que, una vez que se terminó la recolección el camión se dirige hacia el Centro de Transferencia cuando actualmente no es así, ya que se requiere ir a vaciar lo que se recolectó durante la tarde, a la mañana siguiente antes de comenzar el turno de recolección

matutino. Al igual que en la comparación de los recorridos iniciales matutinos, la solución inicial no se apega a la realidad de cómo opera el servicio de recolección actualmente, lo que impide considerarla como una solución para mejorar el sistema.

<b>Tabla de comparación de los Recorridos Vespertinos</b>					
<b>Situación Actual</b>			<b>Solución Inicial</b>		
	<b>Tiempo Total (Horas)</b>	<b>Distancia Total (km)</b>		<b>Tiempo Total (Horas)</b>	<b>Distancia Total (km)</b>
<b>Ruta Tarde</b>	1:46	15.9	<b>Ruta 1: Morada</b>	3:27	34.0
<b>Ruta Campus Central</b>	2:33	14	<b>Ruta 2: Verde</b>	2:50	31.7
<b>Total</b>	<b>04:19</b>	<b>29.9</b>	<b>Total</b>	<b>06:17</b>	<b>65.8</b>

Tabla 4.43. Comparación de distancia y tiempo total de los recorridos vespertinos.

Fuente: Elaboración Propia.

La solución obtenida a nivel de grupo de puntos, descrita en la sección 4.2.3, es la mejor para las tres rutas de la tarde. Esta solución representa mejor la realidad en la que actualmente operan los recorridos y como se puede observar en la tabla 4.44, el tiempo y la duración de cada ruta se reduce: la ruta de la tarde y la orgánica casi 30 minutos, mientras que la del Campus Central sólo 13 minutos. La distancia total de los recorridos, comparándola con la actual, se redujo siete kilómetros.

<b>Rutas Vespertinas</b>	<b>Situación Actual</b>		<b>Solución para grupos de puntos mejorada</b>	
	<b>Tiempo Total (horas)</b>	<b>Distancia Total (km)</b>	<b>Tiempo Total (horas)</b>	<b>Distancia Total (km)</b>
<b>Ruta Tarde</b>	1.77	15.9	1.25	13.4
<b>Ruta Campus Central</b>	2.55	14	2.33	10.94
<b>Ruta Orgánica</b>	2.80	28.6	2.33	26.7
<b>TOTAL</b>	<b>7.12</b>	<b>58.5</b>	<b>5.91</b>	<b>51.04</b>
<b>Media</b>	2.37	19.50	1.97	17.01
<b>Desviación Estándar</b>	0.54	7.94	0.62	8.48

Tabla 4.44. Comparación de distancia y tiempo total de los recorridos actuales contra la solución para grupos de puntos.

Fuente: Elaboración Propia.

## Conclusiones

Con el presente trabajo se logró obtener información acerca de las ocho rutas de recolección en Ciudad Universitaria, la cual incluye el recorrido que hace cada una dentro del campus así como la ubicación de los puntos que se visitan en la mañana y en la tarde.

El objetivo de esta tesis fue el de proponer una forma de mejorar el sistema de recolección de residuos en Ciudad Universitaria, el cual se cumplió. La distancia total de cada recorrido se redujo un 10 por ciento para cada ruta, excepto para la ruta de la basura orgánica en su turno vespertino, el cual, a comparación del estado actual, solo se redujo en un 5 por ciento.

También se generó información actualizada que a los encargados de los Talleres de Conservación, les permitirá conocer los recorridos que realizan las ocho rutas así como los puntos que visita cada una de ellas, el tiempo que les toma hacer la recolección y la distancia total que recorren.

Los encargados de los Talleres sólo cuentan con un estudio realizado en el 2006 por el Programa Universitario del Medio Ambiente (PUMA) y como parte de los acuerdos establecidos, la información y los resultados que se obtuvieron en la presente tesis se les proporcionarán para su implementación y poder mejorar el sistema de recolección.

Durante el trabajo de campo realizado se pudieron identificar los problemas que presenta cada punto de recolección, los más comunes son la mala separación de los residuos, la disposición de residuos domiciliarios en los contenedores de la Universidad, y los automóviles mal estacionados que invaden el espacio asignado al camión e impiden realizar rápidamente la recolección.

El diseño de rutas de recolección es un problema muy complejo, cuya solución óptima es casi imposible de alcanzar para problemas grandes. En las referencias consultadas, los autores utilizan métodos heurísticos para dar solución a problemas de distribución y recolección. Comparada con la situación actual, la solución para

grupos de puntos obtenida en este estudio fue la mejor porque, aparte de representar mejor la realidad, se obtuvo un balance para las ocho rutas en tiempo y distancia total de recorrido. Si se compara esta solución con la solución inicial, ésta última no es la mejor porque, aparte de que no representa la situación actual hay zonas en las que son dos camiones los que realizan la recolección cuando actualmente es uno el encargado de atender esos puntos.

El objetivo de crear escenarios para la Ruta Deportiva y la del Circuito Exterior fue para buscar un balance en los tiempos y las distancias de los recorridos, ya que actualmente tienen cargas de trabajo muy diferentes. Al momento de hacer la comparación actual con los mejores escenarios (tabla 4.42), se observa que el sistema de recolección se puede mejorar si se toma en cuenta la solución para grupos de puntos de las Rutas de Institutos, Tarde, Campus Central y Orgánica (estas dos últimas en sus turnos de la mañana y tarde) y los escenarios tres para la Ruta Deportiva y el uno para la del Circuito Exterior, con los que el balance en tiempo y distancia de recorrido se logró para todas las rutas.

En el manejo del software se emplearon diversas recomendaciones primero para simplificar el problema tratando de representar la realidad de la situación actual, con el fin de reducir la distancia total de los ocho recorridos lo cual se logró con la solución para grupos de puntos.

El problema presente en la Ruta Deportiva se trató en tres distintos escenarios pero el más importante es la apertura tardía del UDUAL que genera demoras. El escenario tres es el que ofrece una solución a este problema, ya que, como se describió la propuesta está en permitir el acceso al camión recolector desde temprano evitando así vueltas innecesarias.

## Recomendaciones

Con los resultados obtenidos se puede mejorar el sistema de recolección de Residuos Sólidos en Ciudad Universitaria, sin embargo, la información que se obtuvo no es suficiente para conseguir una solución óptima al problema de Rutas de Vehículos con Distribución y Recolección que fue el modelo utilizado. La presente investigación puede servir de base para crear un modelo de ruteo que represente mejor la realidad en la que opera el sistema actualmente y que permita mejorar la recolección, sin embargo al emplear estas nuevas propuestas en el diseño de rutas de recolección se debe recordar que siempre existen ajustes finales que se dan en campo y basados en la experiencia del personal que son los que mejor conocimiento tienen de los lugares que visitan.

En este análisis no se utilizó la programación de algún algoritmo con el cual el resultado obtenido hubiese sido el mejor. Lamentablemente no se conoce la técnica que utiliza TransCAD para crear las rutas e incluso para elegir la secuencia para pasar de un punto a otro.

Otra de las recomendaciones sería que a los camiones recolectores se les asigne un navegador GPS para conocer el recorrido que hacen ya que, sin previo aviso, este puede cambiar, incluso se les puede dar la orden de atender puntos que no pertenecen a su itinerario asignado pero requieren atención inmediata debido a la gran acumulación que se presenta en ellos. Además, cualquier chofer se le puede ordenar realizar un turno nocturno si los recorridos de la mañana y tarde no son suficientes para atender la demanda de residuos en puntos que ya se tienen bien identificados, como los son lo que la Ruta de la Tarde.

En las rutas de la basura orgánica, la falta de contenedores para su disposición genera fauna nociva y un mal aspecto a la Universidad, sin embargo, este problema seguirá mientras no se coloquen contenedores en diferente ubicación a los de basura inorgánica o se les exija a las cafeterías y locales de comida que están dentro de la Universidad el disponer los residuos orgánicos de manera adecuada para evitar su acumulación en el piso.

## Referencias

Aarts, E, Lenstra, J. (1997), *Local Search in Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons, New York.

Ahmed, E. y Elettrey, M. (2006). *On combinatorial optimization motivated by biology*. Applied Mathematics and Computation. V. 172. pp. 40-48.

Baker, M. y Ayechev, M. (2003). *A genetic algorithm for the vehicle routing problem*. Computers & Operations Research. V. 30. pp. 787-800.

Banzhaf, W. (1990). *The molecular traveling salesman*. Biological Cybernetics, p.p. 64, 7-14.

Bonmatí, A. (2008). *Gestión Y Tratamiento De Residuos Sólidos Urbanos*. En Andrés, P. y Rodríguez, R. eds. *Evaluación y prevención de riesgos Ambientales en Centroamérica*. ISBN: 978-84-96742-37-6. Documenta Universitaria. Girona, España.

Caballero, S. (2008). *Un procedimiento de búsqueda voraz, aleatorizado y adaptativo para el diseño eficiente de territorios de atención comercial con requerimientos de asignación conjunta*. Tesis de Maestría (Ingeniería en Sistemas). Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Cai, Z. Peng, J. Gao, W. Wei, W. y Kang, L. (2004). *A novel Evolutionary Algorithm and its application for the traveling salesman problem*. WCICA 2004 – Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, Conference Proceedings. V. 3. p.p. 2253-2257.

Chatterjee, S. Carrera, C. y Lynch, L. (1996). *Genetic algorithms and traveling salesman problems*. European Journal of Operational Research. V. 93. pp. 490-510.

Choi E., Tcha, D. (2007), *A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem*. Journal Computers and Operations Research, 34(7): 2080-2095

Cordeau, J., Laporte, G. y Mercier, A. (2001). *A Unified Tabu Search Heuristic for Vehicle Routing Problems with Time Windows*. The Journal of the Operational Research Society, (52) pp. 928–936.

Cordeau, J., Laporte, G., Potvin, J., Salvesbergh, M. (2007a). Transportation on Demand. En Barnhart C. y Laporte G. eds. *Transportation*. Handbooks in Operations Research and Management Science. Vol. 14. Elsevier, Amsterdam, pp. 429–466..

Cordeau, J., Laporte, G., Vigo, D. y Savelsberg, M. (2007b). "*Vehicle Routing*". En Barnhart C. y Laporte G. eds. *Transportation*, Handbooks in Operations Research and Management Science. Vol. 14. Elsevier, Amsterdam, pp. 367–428.

Dantzig, B., Ramser, J. (1959). *The Truck Dispatching Problem*. Management Science, Vol. 6, No. 1, pp. 80-91

De Pablo, F. (2008). *Dirección de Obras Y Conservación (DGOyC)*. Memoria UNAM, 2011. México D.F.

De la Cruz, J. (2003). *Alternativa heurística de dos fases para el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo, múltiples productos y flota heterogénea*. Barranquilla, 155 pp. Tesis de maestría (Ingeniería Industrial). Universidad del Norte.

Gallardo, A. (2012). *Residuos Sólidos Urbanos, una consecuencia de la vida*. Tesis de (Ingeniería Ambiental). Universitat Jaume I. Castelló, España.

Gálvez, F. (2003). *Recolección de Residuos Sólidos Urbanos, Manual de Instrucción*. En Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de los Servicios de Aseo Urbano. Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental. Washington, D.C.

Gaskell, T. (1967). *Bases for vehicle fleet scheduling*. Operational Research Quarterly. No. 18, pp. 281-295.

Haru, T. (2011). *Lecture Notes on Graph Theory*. Department of Mathematics. University of Turku, Finland.

Harary, F. (1969). *Graph Theory*. University of Michigan. Addison-Wesley Publishing Company.

Hernández, C. (2007). *Manejo De Residuos Sólidos En Ciudad Universitaria*. Tesis de Licenciatura (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM.

Ignizio, J., Cavalier, T. (1994). *Linear programming*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 666 pp.

INEGI (2013). *Estadística Básica Sobre Medio Ambiente Datos Del Distrito Federal*. Boletín de prensa núm. 151/13. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. México, D.F.

Jaramillo, J. (2012). *Búsqueda tabú para el ruteo de vehículos*. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, núm. 30, pp. 29-43 Universidad de Lima. Lima, Perú.

Jünger, M. Reinelt, G. y Rinaldi G. (1995). *The Traveling Salesman Problem*, en Ball, M. Magnanti, Monma, C. Nemhauser, G. eds. (1995). *Network Models*. Handbooks in Operations Research and Management Science. Volume 7. Institute for Operations Research and the Management Sciences Elsevier, Amsterdam. pp. 225-314.

Lama, P. (2010). *Distribución De Alimentos Perecederos En El Centro Histórico De La Ciudad De México*. Tesis de Maestría (Investigación de Operaciones). Posgrado de Ingeniería, UNAM.

León, P. (2012). *Análisis de las reglas de autómatas celulares en dos dimensiones vía diagramas de Bruijn*. Tesis de Maestría (Computación). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV) México, D.F.

Lizarde, I. (2009). *Estudio de Viabilidad de Implementación de un Plan Integral de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en Ciudad Universitaria*. Tesis de Licenciatura (Ingeniería Química). Facultad de Química, UNAM.

Lozada, A. y Cadena R. (2012). *Solución del Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW) Mediante Métodos Heurísticos*. Tesis de Licenciatura



(Ingeniería Industrial). Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Macías, L. (2008). *Análisis De Las Rutas De Distribución De Gasolinas En El Distrito Federal*. Tesis de Maestría (Ingeniería Industrial). Posgrado de Ingeniería, UNAM.

Mario J, Montoya, J, Narducci, F. (2009). *Resolución Del Problema De Enrutamiento De Vehículos Con Limitaciones De Capacidad Utilizando Un Procedimiento Metaheurístico De Dos Fases*. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 12, p. 23-38.

Martínez C.A., (2010), *Ant Colony System y Asynchronous Teams para el Problema de Ruteo Capacitado de Vehículos*, REVISTA ICHIO, pp. 1-24

Menéndez A. (1998). *Una breve introducción a la teoría de grafos*. Revista Suma 25. Federación Española de Sociedades de Profesores de Matemáticas (FESPM). Pp. 11-26. Cataluña, España.

Mester, D. y Bräysy, O. (2007). *Actived-Guided Evolution Strategies For Large-Scale Capacitated Vehicle Routing Problems*. Computers & Operations Research. Vol 34. pp. 2964–2975.

Moraga, R. J. (2002). *Meta-RaPS: an effective solution approach for combinatorial problems*. Ph.D. Thesis. Orlando, FL: University of Central Florida.

Narducci, F. (2005). *Programación de talleres intermitentes flexibles, por medio de la heurística del margen de tolerancia*. Barranquilla, 117 p. Tesis de Maestría (Ingeniería Industrial). Universidad del Norte.

Núñez J. (2004). *Siete puentes, un camino: Königsberg*. Revista Suma 45. Federación Española de Sociedades de Profesores de Matemáticas (FESPM). pp 69-78. Cataluña, España.

Ore, O. (1962). *Theory of Graphs*. American Mathematical Society, AMS. Providence, Rhode Island.

Orta, M., Yáñez, I., Monje, I., Rojas, M., Toscano, L., Rentería, J., Velázquez, K., García, E., Hernández, N., Hernández, L. (2009). *Estudio De Evaluación De Tecnologías*

*Alternativas O Complementarias Para El tratamiento O Disposición Final De Los Residuos Sólidos Urbanos.* Instituto de Ingeniería, UNAM y SEMARNAT. México.

Osman, H. y Kelly, J. (1996.). *Meta-heuristics: Theory and applications.* Boston: Kluwer Academic Publishers. pp. 1–21.

OPDS (2010). *Gestión integral de Residuos Sólidos Urbanos.* Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS), Coordinación Ejecutiva para el Desarrollo Sostenible Dirección Provincial de Relaciones con la Comunidad. Buenos Aires, Argentina.

Pastrana, M. y Moreno C. (2011). *Teoría de Grafos, Apuntes.* Universidad Nacional de Ingeniería. UNI-RUACS. Estelí, Nicaragua.

Pataki, G (2003). 'Teaching integer programming formulations using the traveling salesman problem', *SIAM Review*, Vol. 45(1), pp. 116–23.

Pisinger, D. y Ropke, S. (2007). *A General Heuristic For Vehicle Routing Problems.* *Computers & Operations Research.* vol. 34. pp. 2403–2435.

Prins, C. (2004). *A Simple And Effective Evolutionary Algorithm For The Vehicle Routing Problem.* *Computers & Operations Research.* vol. 31. pp. 1985–2002.

PUMA (2006). *Estudio de Generación de Residuos Sólidos en Ciudad Universitaria.* Programa Universitario del Medio Ambiente (PUMA). UNAM. México, D.F.

Reeves, C. (1996). Modern heuristic techniques. In: Rayward-Smith, V. J.; Osman, I. H.; Reeves, C. R. and Smith, G. D. (eds.), *Modern Search Methods*, John Wiley & Sons, 1996.

Ruiz R. (2004). *A decision support system for a real vehicle routing problem.* *European Journal of Operational Research.* Vol. 153. pp. 593-606.

SEMARNAT. (2010). Norma Oficial Mexicana, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos municipales. (NOM-083-SEMARNAT-2003). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México, D.F.

SEMARNAT (2010) *Criterios Para La Ubicación, Operación Y Cierre De Infraestructura Ambiental Para El Acopio, Transferencia, Separación Y Tratamiento De Residuos Sólidos Urbanos Y De Manejo Especial*. México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México, D.F.

Torres, E. (2010). *Contenedores para recolección selectiva de Residuos Sólidos en Ciudad Universitaria*. Tesis de Licenciatura (Diseño Industrial). Centro de Investigaciones de Diseño Industrial. Facultad de Arquitectura. UNAM.

Toth P, Vigo D. (2002) *The Vehicle Routing Problem*. Monographs on Discrete Mathematical and Applications. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Philadelphia.

Universidad Nacional Experimental Politecnica de la Fuerza Armada Nacional (UNEFA) Núcleo Mérida (2010). *Conceptos fundamentales y Relaciones de equivalencia*. Disponible en: <http://teoriadegrafo.bligoo.com/media/users/20/1017953/files/247942/unidad-i.pdf>. [Consultado el 26 de agosto del 2014].

Vigo, D. y Savelsberg, M. (2007). *Vehicle Routing*. En Barnhart C. y Laporte G. eds. *Transportation*. Handbooks in Operations Research and Management Science. Vol. 14. Elsevier, Amsterdam, pp. 367–428.

Yu, G. (1998). *Industrial applications of combinatorial optimization*. Boston: Kluwer Academic Publishers.