

Barranquilla, Diciembre de 2010

Señores

Comité de Proyectos de Grados e Investigaciones

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Programa de Ingeniería Civil

Fundación Universidad de Norte

Ciudad.

Cordial Saludo:

Por medio de la presente certifico que he asesorado en la elaboración del informe final del trabajo de grado que se titula “**MODELACIÓN DE DEMANDA Y OFERTA DE UN CORREDOR MULTIMODAL DE TRANSPORTE REGIONAL DE PASAJEROS**”. Con toda la estructura metodológica, teórica y contenido en el proceso de investigación, elaborado por el estudiante **Thomas Edison Guerrero Barbosa**, para optar el título de Magister en Ingeniería Civil.

Atentamente

Víctor Manuel Cantillo Maza

Director de Tesis

Barranquilla, Diciembre de 2010

Señores

Comité de Proyectos de Grado e Investigaciones

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Fundación Universidad del Norte

Ciudad.

Cordial Saludo:

Por medio de la presente me dirijo a ustedes con el fin de presentar el informe final del trabajo de grado para optar el título de Magister en Ingeniería Civil, que tiene por nombre **“MODELACIÓN DE DEMANDA Y OFERTA DE UN CORREDOR MULTIMODAL DE TRANSPORTE REGIONAL DE PASAJEROS”**.

Atentamente:

Thomas Edison Guerrero Barbosa

Barranquilla, Diciembre de 2010

Nota de Aceptación

Firma del evaluador

Firma del evaluador

Barranquilla, Diciembre de 2010

Nota de Aceptación

Firma del evaluador

Firma del evaluador

**MODELACIÓN DE DEMANDA Y OFERTA DE UN CORREDOR MULTIMODAL
DE TRANSPORTE REGIONAL DE PASAJEROS**

THOMAS EDISON GUERRERO BARBOSA

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
BARRANQUILLA
2010**

**MODELACIÓN DE DEMANDA Y OFERTA DE UN CORREDOR MULTIMODAL
DE TRANSPORTE REGIONAL DE PASAJEROS**

THOMAS EDISON GUERRERO BARBOSA

**Tesis de grado presentada como requisito para optar al título de
MAGISTER EN INGENIERIA CIVIL CON ENFASIS EN VÍAS Y TRANSPORTES**

Director

VICTOR MANUEL CANTILLO MAZA

Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

BARRANQUILLA

2010

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo general	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	Planteamiento del problema	3
1.3	Hipótesis de trabajo	3
2	GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO	5
2.1	Caracterización del corredor multimodal	6
2.1.1	Modo férreo	6
2.1.2	Modo carretero	7
2.1.3	Modo fluvial	8
3	MARCO CONCEPTUAL.....	10
3.1	Estado del arte	10
3.2	Modelos de generación y atracción de viajes	14
3.2.1	Regresión lineal	14
3.3	Modelos de distribución de viajes	15
3.3.1	Costo generalizado y costo compuesto.....	16
3.3.2	Modelo de maximización de entropía doblemente acotado	17
3.3.3	Método Hyman.....	17
3.4	Modelos de elección discreta (MED)	18
3.4.1	Teoría de utilidad aleatoria (TUA)	19
3.4.2	Modelo logit multinomial (MNL)	20
3.4.3	Modelo logit mixto (ML)	21
3.5	Estimación de modelos de demanda con datos mixtos de PR y PD.....	22
3.6	Valor del tiempo	22
3.7	Elasticidades	23
3.8	Modelos de asignación de viajes (MAV)	23

3.8.1	Asignación de equilibrio estocástico (<i>Stochastic user equilibrium - SUE</i>).....	24
4	REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN	27
4.1	Enfoque metodológico.....	27
4.2	Encuesta de preferencias reveladas (PR).....	28
4.3	Encuesta de preferencias declaradas (PD).....	29
4.3.1	PD a usuarios de modo férreo.....	29
4.3.2	PD a usuarios de modo carretero.....	30
4.3.3	PD a usuarios de modo fluvial.....	30
4.4	Análisis de la información obtenida en terreno	31
4.4.1	Muestra de viajeros en transporte férreo	31
4.4.2	Muestra de usuarios en transporte carretero	35
4.4.3	Muestra de usuarios en transporte fluvial.....	38
5	ZONIFICACIÓN	42
5.1	Criterios de zonificación.....	42
5.2	Codificación y nomenclatura de las zonas	42
5.3	Resumen de zonificación.....	43
6	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS	45
6.1	Cálculo de factores de expansión	45
6.1.1	Modo férreo	45
6.1.2	Modo carretero	45
6.1.3	Modo fluvial	47
6.2	Estimación de matrices origen-destino.....	47
6.2.1	Modo férreo	47
6.2.2	Modo carretero	48
6.2.3	Modo fluvial	49
7	MODELACIÓN DEL CORREDOR MULTIMODAL	50
7.1	Formulación y estimación del modelo de generación y atracción.....	50
7.1.1	Especificación del modelo.....	50

7.1.2	Variables	51
7.1.3	Estimación del modelo de generación	51
7.1.4	Estimación del modelo de atracción	52
7.1.5	Modelo predictivo	53
7.2	Formulación y estimación del modelo de distribución.....	54
7.2.1	Especificación del modelo.....	54
7.2.2	Estimación de resultados	54
7.2.3	Modelo predictivo	55
7.3	Formulación y estimación del modelo de elección modal	56
7.3.1	Especificación del modelo.....	56
7.3.2	Metodología planteada	57
7.3.3	Estimación y desarrollo de modelos	57
7.3.4	Valoración de atributos.....	59
7.3.5	Análisis de elasticidades	60
7.3.6	Análisis de políticas sobre el corredor.....	60
7.3.7	Modelo predictivo	62
7.4	Formulación y estimación del modelo de asignación.....	63
7.4.1	Especificación del modelo.....	63
7.4.2	Metodología planteada	64
7.4.3	Configuración de la red de transporte.....	66
7.4.4	Configuración general	66
7.4.5	Configuración de modos.....	67
7.4.6	Configuración de políticas tarifarias y de transferencias.....	67
7.4.7	Configuración de ponderadores de la función de costo generalizado	68
7.4.8	Primer enfoque: Modelación conjunta de red multimodal	69
7.4.9	Segundo enfoque: Modelación de redes modales.....	74
8	CONCLUSIONES	84
9	BIBLIOGRAFÍA.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Horarios y rutas de servicio de transporte de pasajeros y carga menor.....	7
Tabla 4.1 Atributos y niveles de PD a usuarios de modo férreo	30
Tabla 4.2 Atributos y niveles de PD a usuarios de modo fluvial	31
Tabla 5.1 Códigos y nombres de zonas.....	43
Tabla 7.1 Modelo de generación de viajes por regresión lineal	51
Tabla 7.2 Estadísticas del modelo de generación con regresión lineal	51
Tabla 7.3 Modelo de generación de viajes por regresión lineal con accesibilidad	52
Tabla 7.4 Estadísticas del modelo de generación con regresión lineal con accesibilidad.....	52
Tabla 7.5 Modelo de atracción de viajes por regresión lineal	52
Tabla 7.6 Estadísticas del modelo de atracción con regresión lineal	53
Tabla 7.7 Modelo de atracción de viajes por regresión lineal con accesibilidad	53
Tabla 7.8 Estadísticas del modelo de atracción con regresión lineal con accesibilidad.....	53
Tabla 7.9 Vectores de generación y atracción proyectados al año 2015 y 2020.....	54
Tabla 7.10 Valores finales de las penalidades modales δ y el valor del parámetro λ	55
Tabla 7.11 Estimación de resultados.....	59
Tabla 7.12 Mediciones de VST.....	60
Tabla 7.13 Estimaciones de elasticidades	60
Tabla 7.14 Predicciones para el 20% de incremento en el costo del boleto.....	61
Tabla 7.15 Predicciones para el 20% de reducción en el tiempo de viaje.....	61
Tabla 7.16 Predicciones para el 20% de incremento en la frecuencia de despacho.....	61
Tabla 7.17 Evolución de la demanda por año	62
Tabla 7.18 Partición modal por año	62
Tabla 7.19 Parámetros de la red de transporte	67
Tabla 7.20 Parámetros asociados a los modos.	67
Tabla 7.21 Componentes del costo generalizado	68
Tabla 7.22 Flujos estimados y observados según modo	69
Tabla 7.23 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Intermodal base).....	71
Tabla 7.24 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Intermodal Base)	71
Tabla 7.25 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Intermodal 2015)	73

Tabla 7.26 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Intermodal 2020)	73
Tabla 7.27 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Intermodal 2015)	73
Tabla 7.28 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Intermodal 2020)	74
Tabla 7.29 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Ferreo actual).....	75
Tabla 7.30 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Férreo actual).....	75
Tabla 7.31 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Carretero actual).....	76
Tabla 7.32 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Carretero actual)	76
Tabla 7.33 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Fluvial actual).....	77
Tabla 7.34 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Fluvial actual).....	77
Tabla 7.35 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Férreo 2015)	78
Tabla 7.36 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Férreo 2015)	78
Tabla 7.37 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Carretero 2015)	79
Tabla 7.38 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Carretero 2015).....	79
Tabla 7.39 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Fluvial 2015)	80
Tabla 7.40 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Fluvial 2015)	80
Tabla 7.41 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Férreo 2020)	81
Tabla 7.42 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Férreo 2020)	81
Tabla 7.43 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Carretero 2020)	82
Tabla 7.44 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Carretero 2020).....	82
Tabla 7.45 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Fluvial 2020)	83
Tabla 7.46 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Fluvial 2020)	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación los municipios en la zona de estudio e infraestructura existente	5
Figura 2.2 Ubicación geográfica de la línea férrea en el país	6
Figura 2.3 Mapa de la red vial de la zona de estudio	8
Figura 2.4 Mapa de la red vial y red navegable de la zona de estudio	9
Figura 3.1 Esquema del modelo de Maximización de Entropía, utilizando el método de Hyman con balanceos proporcionados por la metodología de Furness	18
Figura 4.1 Formato de encuestas de Preferencias Reveladas (PR)	28
Figura 4.2 Género de usuarios modo férreo	32
Figura 4.3 Ocupación de usuarios modo férreo	32
Figura 4.4 Frecuencia de viaje de usuarios modo férreo.....	33
Figura 4.5 Pagador del pasaje de usuarios modo férreo.....	33
Figura 4.6 Motivo de viaje de usuarios modo férreo	34
Figura 4.7 Ingreso mensual de usuarios modo férreo	34
Figura 4.8 Género de usuarios modo carretero	35
Figura 4.9 Ocupación de usuarios modo carretero.....	36
Figura 4.10 Frecuencia de viaje de usuarios modo carretero	36
Figura 4.11 Pagador del pasaje de usuarios modo carretero	37
Figura 4.12 Motivo de viaje de usuarios modo carretero.....	37
Figura 4.13 Ingresos de usuarios modo carretero.....	38
Figura 4.14 Género de usuarios modo fluvial	39
Figura 4.15 Ocupación de usuarios modo fluvial.....	39
Figura 4.16 Frecuencia de viaje de usuarios modo fluvial.....	40
Figura 4.17 Pagador de pasaje de usuarios modo fluvial	40
Figura 4.18 Motivo de viaje de usuarios modo fluvial.....	41
Figura 4.19 Ingreso de usuarios modo fluvial.....	41
Figura 5.1 Zonificación Vista General	44
Figura 5.2 Zonificación del corredor férreo	44
Figura 7.1 Esquema de las vías principales del área de estudio.....	65
Figura 7.2 Distribución de datos observados y estimados según modo	70

Figura 7.3 Flujos en las zonas del corredor multimodal	70
Figura 7.4 Variación del flujo según modo para la situación actual, 2015 y 2020	72
Figura 7.5 Flujos para primer escenario en el año 2015	72
Figura 7.6 Flujos para primer escenario en el año 2020.	73
Figura 7.7 Flujos modelación modo férreo situación actual	75
Figura 7.8 Flujos modelación modo carretero situación actual.....	76
Figura 7.9 Flujos modelación modo fluvial situación actual	77
Figura 7.10 Flujos modelación modo férreo situación año 2015	78
Figura 7.11 Flujos modelación modo carretero situación año 2015	79
Figura 7.12 Flujos modelación modo fluvial situación año 2015	80
Figura 7.13 Flujos modelación modo férreo situación año 2020	81
Figura 7.14 Flujos modelación modo carretero situación año 2020	82
Figura 7.15 Flujos modelación modo fluvial situación año 2020	83

LISTA DE ANEXOS

Anexo H - 1. FORMATOS DE ENCUESTAS Y ASCENSO DESCENSO

Anexo H - 2. MATRICES FINALES

Anexo H - 3. MODELO DE DEMANDA

Anexo H - 4. MODELO DE OFERTA

RESUMEN

Son frecuentes los casos en los que se plantea evaluar el mejoramiento en el nivel de servicio de un sistema de transporte en el contexto interurbano. Es el caso del corredor del Magdalena Medio en Colombia, donde hay tres modos en interacción: carretero, fluvial y ferroviario, en el cual se ha propuesto mejorar el nivel de servicio del ferrocarril; no obstante, se trata de un corredor de baja demanda que exige un análisis más detallado.

Para fines de análisis se plantea un enfoque metodológico que incluye la toma de información directa en puertos, terminales y a bordo de vehículos, las características que definen el nivel de servicio de los modos, y encuestas de preferencias reveladas y de preferencias declaradas, seguida de un proceso de modelación de la demanda y oferta.

Un aspecto interesante es que el enfoque metodológico ha permitido la combinación de distintas fuentes de información, provenientes de datos agregados y de encuestas a individuos tanto de preferencias reveladas como de preferencias declaradas. Sin embargo, la experiencia en la aplicación demuestra que se pueden presentar inconvenientes en las especificaciones en los modelos cuando las interacciones en los atributos o los efectos de las variables no incluidas apropiadamente afectan decisiones individuales.

En la aplicación del modelo al corredor estudiado se hizo evidente que hay percepciones subjetivas fuertemente asociadas a un modo de transporte que afectan significativamente la elección. Igualmente, complementario al análisis de demanda realizado se calibra un modelo de asignación de viajes tipo estocástico que contemple la metodología general caracterizada por los siguientes tres aspectos: zonificación de la región de estudio, codificación detallada de la red de transporte y caracterización precisa de la demanda de transporte.

El enfoque metodológico utilizado y el uso de información conjunta proveniente de datos de preferencias reveladas y preferencias declaradas permitió la estimación de modelos desagregados y la evaluación de políticas referentes a mejorar el nivel de servicio para el modo ferroviario; la estimación de modelos a partir de estos datos resulta robusta a la luz de criterios econométricos, por lo cual es posible suponer que las proyecciones realizadas durante el desarrollo del modelo clásico del transporte son razonables.

ABSTRACT

Cases where the improvement on the service level of a transport system in an interurban context is evaluated are usual. This is the case of Magdalena Medio corridor in Colombia, where there are three interacting modes: road, inland waterway and railway. In this corridor has being proposed to improve the service level of rail. However, this is a low demand corridor that requires a detailed analysis.

For analysis purposes a has being proposed a methodological approach that includes taking direct information on ports, terminals, on board of the vehicles, and the characteristics that define the service level of each mode. This approach also includes revealed preferences and stated preference surveys, followed by a modeling process of demand and supply.

An interesting aspect is that the methodological approach has allowed the combination of different information sources. This information comes from aggregate data and from revealed preference and stated preference individual surveys. However, implementation experience shows that problems may occur in the models specifications when interactions in the attributes or effects of not properly included variables affect individual decisions.

When applying the model to the studied corridor it became clear that are some subjective perceptions strongly associated with a transport mode that significantly affect the choice. Complementary to the demand analysis performed a stochastic assignment model is calibrated. This model includes general methodology characterized by the following three aspects: zoning in the region of study, detailed coding of the transport network and demand precise characterization transport.

The methodological approach and the use of aggregate information from revealed preference and stated preference data allow the estimation of disaggregated models and the evaluation of policies relating to improve the service level of the rail mode. The model estimation from these data is robust according to the econometric criteria, making possible to assume that the projections made during the development of classic transport model are reasonable.

1 INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación Colciencias – Mintransporte cuyo objeto es “Estructurar e implementar el modelo conceptual que permita cuantificar la demanda actual, estimar la demanda futura y determinar la movilización de transporte de pasajeros en los modos terrestre por carretera, fluvial, ferroviario y aéreo a nivel nacional e internacional”; a continuación se presenta un desarrollo investigativo que se enfoca en modelar la demanda y la oferta de un corredor multimodal de transporte de pasajeros con características interurbanas en la zona del Magdalena Medio Colombiano. El corredor multimodal tiene los servicios de transporte en modo férreo, carretero y fluvial, que sirven para la integración económica, social y cultural de centros urbanos en los extremos y puntos intermedios del corredor estudiado. El corredor multimodal del Magdalena Medio cubre una zona ubicada en un complejo petrolero en la cuenca media de la principal fuente hídrica del país como lo es el Río Magdalena; su principal centro urbano es la ciudad de Barrancabermeja con una población de 187.311 habitantes¹ y situada en un punto intermedio de dicho corredor. Otros puntos importantes dentro del corredor lo componen los municipios de Puerto Berrío y Puerto Wilches.

Dentro de un contexto de modelación, son muchos los factores que influyen en la modelación de demanda de viajes interurbanos, por ejemplo, investigaciones en Reino Unido (Wardman, 2006) describen algunos de estos factores como el tiempo de viaje en automóvil, propiedad del automóvil, costos de viaje, costos de combustible, población y el PIB. La explicación hecha por (Ortúzar & Willumsen, 2001) dice que para llevar a cabo el proceso de modelación es necesario definir las especificaciones del modelo: elegir una estructura coherente con las condiciones del problema que se trata, establecer las formas funcionales que se dan dentro de esta estructura (por ejemplo lineales) y especificar las variables de entrada, que sean explicativas del fenómeno tratado (en este caso los patrones de viajes) y seguidamente definir la información necesaria para nutrir el modelo y la manera de buscar dicha información, siempre y cuando sea viable técnica y económicamente. Todo lo anterior basado en una aproximación teórica que establezca los postulados necesarios que simplifiquen el problema de la modelación pero que sean lo suficientemente finos para construir un modelo aceptable que cumpla cabalmente con el propósito planteado.

¹ Departamento Nacional de Estadística (DANE).

La recolección de datos necesarios para la estimación de la demanda en este estudio se hizo con una serie de encuestas de preferencias declaradas (PD) y preferencias reveladas (PR), llevadas a cabo en las terminales y estaciones situadas en los centros urbanos del corredor para cada modo estudiado. Los datos de PR y PD han sido utilizados ampliamente a nivel mundial para realizar muchos estudios de estimación de demanda (Ortúzar & Willumsen, 2001).

Debe considerarse que en muchas ocasiones la demanda actual no siempre es suficiente para justificar el diseño de rutas que ofrezcan servicios directos entre pares origen-destino y en otros casos la gran demanda no es cubierta por dichos tipos de servicio debido a factores como la falta de infraestructura, razones de orden público y seguridad y dificultades de acceso, que incentivan el uso del transporte privado o de servicios informales. .En atención a ello en este trabajo se presenta un enfoque práctico de modelación que consiste en estimar la demanda y la oferta de transporte basados en el modelo clásico de los cuatro pasos sobre el corredor multimodal de características interurbanas. Además de lo anterior se realizan estimaciones de valores del tiempo y disposiciones al pago para usuarios de los modos alternativos en el corredor.

Dada la riqueza de la información recolectada y la oferta de servicios de transporte ofrecidos en el corredor, se modela la oferta del corredor calibrando un modelo de asignación a partir de dicha información. Los modelos de asignación de viajes son normalmente utilizados como herramientas de análisis, evaluación de proyectos de mejoramiento y ampliación de sistemas de transporte. Dado que el proceso de planificación de tales sistemas conduce, a menudo, a tomar decisiones que involucran la utilización de cantidades importantes de recursos públicos, es necesario que los planificadores dispongan de modelos fiables (De Cea, 1984).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

- Modelar la demanda y la oferta en un corredor multimodal de transporte regional de pasajeros ubicado en la zona del Magdalena Medio Colombiano.

1.1.2 Objetivos específicos

- Calcular las matrices origen-destino para cada uno de los modos operantes en el corredor multimodal.

- Caracterizar a la población demandante de los modos de transporte disponibles en el corredor multimodal de pasajeros.
- Estimar viajes totales generados y totales atraídos en el corredor multimodal mediante un modelo de regresión lineal.
- Calibrar un modelo de distribución tipo gravitacional que permita encontrar valores de los parámetros del modelo tal que éste reproduzca lo más fielmente posible los datos observados en el año base y las proyecciones a 2015 y 2020.
- Desarrollar modelos de elección discreta a partir de datos mixtos PR/PD que contengan interacciones entre el nivel de servicio y las variables socio-económicas de los pasajeros para los modos: férreo, carretero y fluvial.
- Obtener estimaciones de valores del tiempo y disposiciones al pago para usuarios de los modos alternativos en el corredor.
- Estimar elasticidades y proponer políticas de implementación para los modos que sirven en el corredor, en especial al mejoramiento del nivel de servicio del modo ferroviario.
- Determinar mediante el uso de técnicas de PD y PR las percepciones y preferencias de los usuarios de los modos disponibles en el corredor multimodal de pasajeros.
- Calibrar un modelo de asignación que contemple la metodología general caracterizada por los siguientes tres aspectos: Zonificación de la región de estudio, codificación detallada de la red de transporte y caracterización precisa de la demanda de transporte.

1.2 Planteamiento del problema

El planteamiento de políticas para mejorar las condiciones de operación del corredor multimodal de transporte regional de pasajeros del Magdalena Medio requiere caracterizar la demanda y oferta de transporte y establecer las preferencias y percepciones de los usuarios. En la literatura científica son poco frecuentes los desarrollos de modelos de transporte en un contexto regional multimodal de baja demanda, que exige la adaptación inteligente de técnicas existentes.

1.3 Hipótesis de trabajo

Se plantea que es posible la adaptación del modelo estratégico de transporte, utilizando información mixta de preferencias declaradas (PD) y preferencias reveladas (PR) para estimar la demanda y equilibrio con la oferta en un corredor intermodal interurbano de transporte de pasajeros.

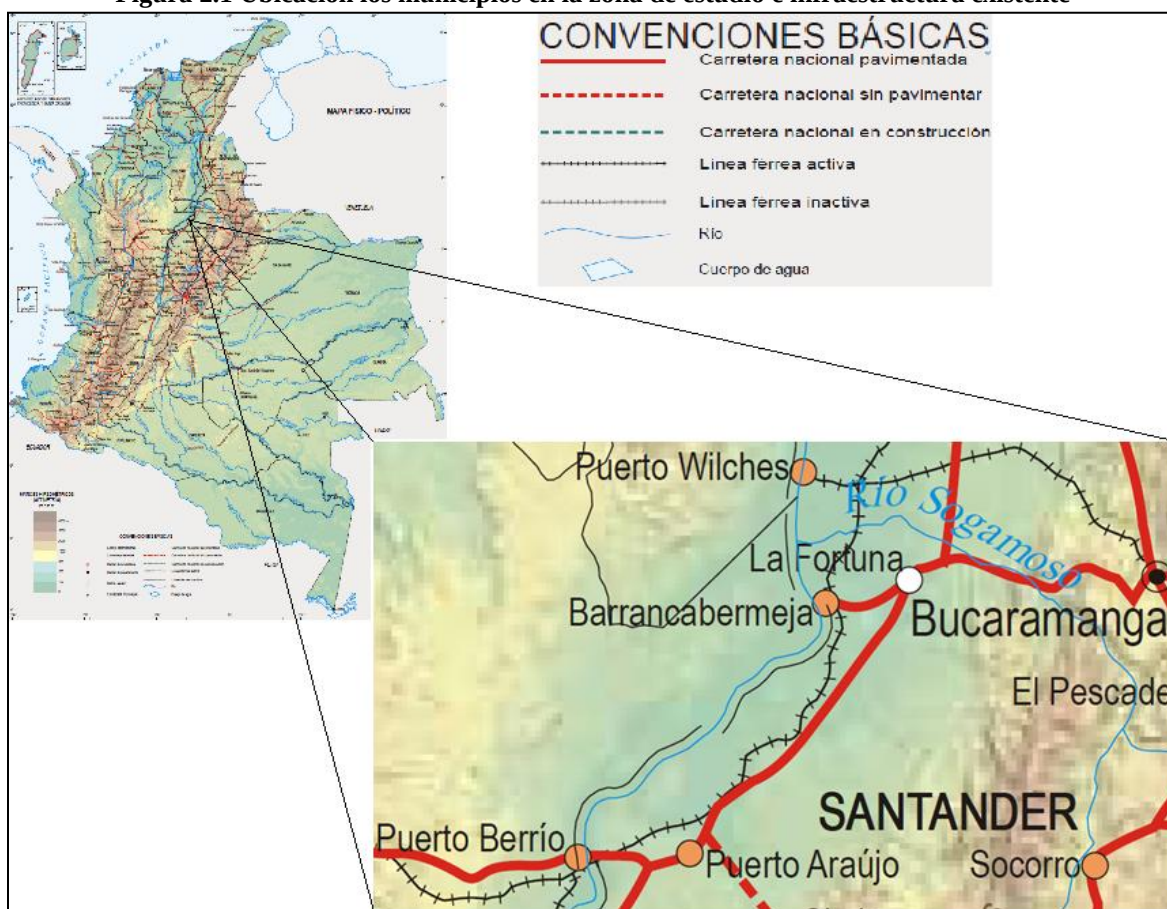
Se propone demostrar que en un corredor con las características del estudiado el enfoque estocástico para la asignación es más adecuado en tanto no se tienen problemas de congestión y hay alta variabilidad e incertidumbre en el conocimiento que los usuarios tienen del sistema.

El documento está organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2 se describen las características principales del corredor estudiado y su zona de influencia. En el capítulo 3 se hace una revisión general de antecedentes en la literatura mundial y se fundamentan los aspectos metodológicos más relevantes del estudio. En el capítulo 4 se discute el tema del enfoque metodológico utilizado, requerimientos de información, considerando tanto los aspectos de diseño de la encuesta como un completo análisis de los principales resultados del proceso de toma de datos. El capítulo 5 se esboza los criterios de zonificación y su disposición final. El capítulo 6 muestra el procesamiento de los datos y la estimación de las matrices OD. En el capítulo 7 se desarrolla el modelo clásico de transporte (generación, distribución, elección modal y asignación), mostrando la formulación y estimación de cada uno de los cuatro pasos. Finalmente se esbozan las conclusiones más relevantes logradas a través del proyecto (capítulo 8).

2 GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

El corredor multimodal estudiado se encuentra ubicado en los departamentos de Santander y Antioquia (Colombia); a su vez comprende los municipios de Puerto Berrío (Antioquia), Barrancabermeja (Santander) y Puerto Wilches (Santander). La zona está irrigada por la principal fuente hídrica del país, el Río Magdalena, y paralela a ésta se encuentra la línea férrea. La infraestructura vial la conforma una red que comunica entre sí a los municipios anteriormente descritos. La ubicación de los municipios en la zona de estudio y la infraestructura existente se observa en la Figura 2.1.

Figura 2.1 Ubicación los municipios en la zona de estudio e infraestructura existente



Fuente:

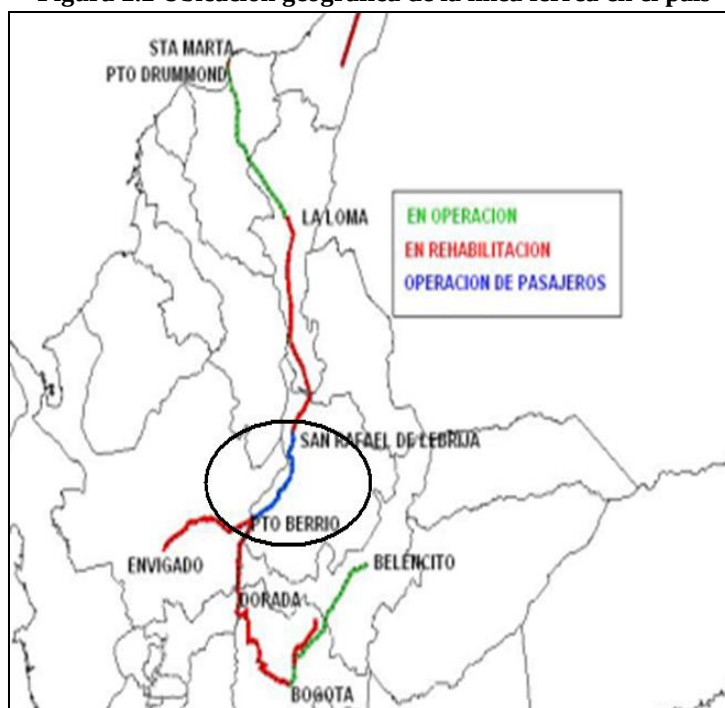
[http://www.uclm.es/area/dip/WEBCONFLICTO/datos%20colombia_archivos/Matis_Colombia\[1\].pdf](http://www.uclm.es/area/dip/WEBCONFLICTO/datos%20colombia_archivos/Matis_Colombia[1].pdf)

2.1 Caracterización del corredor multimodal

2.1.1 Modo férreo

El tramo férreo habilitado está comprendido entre los municipios de Puerto Berrío (Antioquia) – Barrancabermeja (Santander) y los corregimientos Puente Sogamoso (Santander) y García Cadena (Santander) que pertenecen al municipio de Puerto Wilches (Santander), que hace parte de la red del Atlántico, en el cual la cooperativa COOPSERCOL presta el servicio de transporte de pasajeros y carga menor para dicho corredor. La Figura 2.2 muestra la ubicación geográfica del tramo férreo estudiado, el cual se encuentra plenamente habilitado para la operación de transporte de pasajeros. Anteriormente, existía infraestructura férrea que permitía la comunicación entre García Cadena y Puerto Wilches, pero debido al descuido gubernamental ya esta infraestructura está en mal estado y no se encuentra habilitada para el transporte de pasajeros.

Figura 2.2 Ubicación geográfica de la línea férrea en el país



Fuente: Diagnóstico del sector Transporte 2007. Oficina Asesora de Planeación. MINTRANSPORTE

La línea férrea correspondiente al sector de Barrancabermeja a García Cadena tiene una longitud de 30 km y el sector comprendido entre Barrancabermeja y Puerto Berrío tiene 110 km. La línea del cual es objeto este estudio está a cargo de la concesión del Atlántico adjudicada el julio 27 de 1999 a Ferrocarriles del Norte de Colombia – FENOCO y tiene una duración de 30 años.

El operador COOPSERCOL cuenta con los horarios, tiempos de duración de viaje, origen - destino y rutas de servicio de transporte de pasajeros y carga menor mostrados en la Tabla 2.1. Este servicio se presta los siete días de la semana.

Tabla 2.1 Horarios y rutas de servicio de transporte de pasajeros y carga menor

RUTA	ORIGEN	DESTINO	HORA DE SALIDA	HORA DE REGRESO	DURACIÓN DEL VIAJE
1	BARRANCABERMEJA	GARCÍA CADENA	04:30*	05:15*	60 MIN
			6:00	7:00	
			11:30	12:30	
			14:30	16:00	
			17:00	18:00	
2	BARRANCABERMEJA	PUERTO BERRÍO	5:00	14:00	200 MIN
3	PUERTO PARRA	BARRANCABERMEJA	5:00	15:00	125 MIN

* Horario especial para el transporte de estudiantes desde el Municipio de Puente Sogamoso

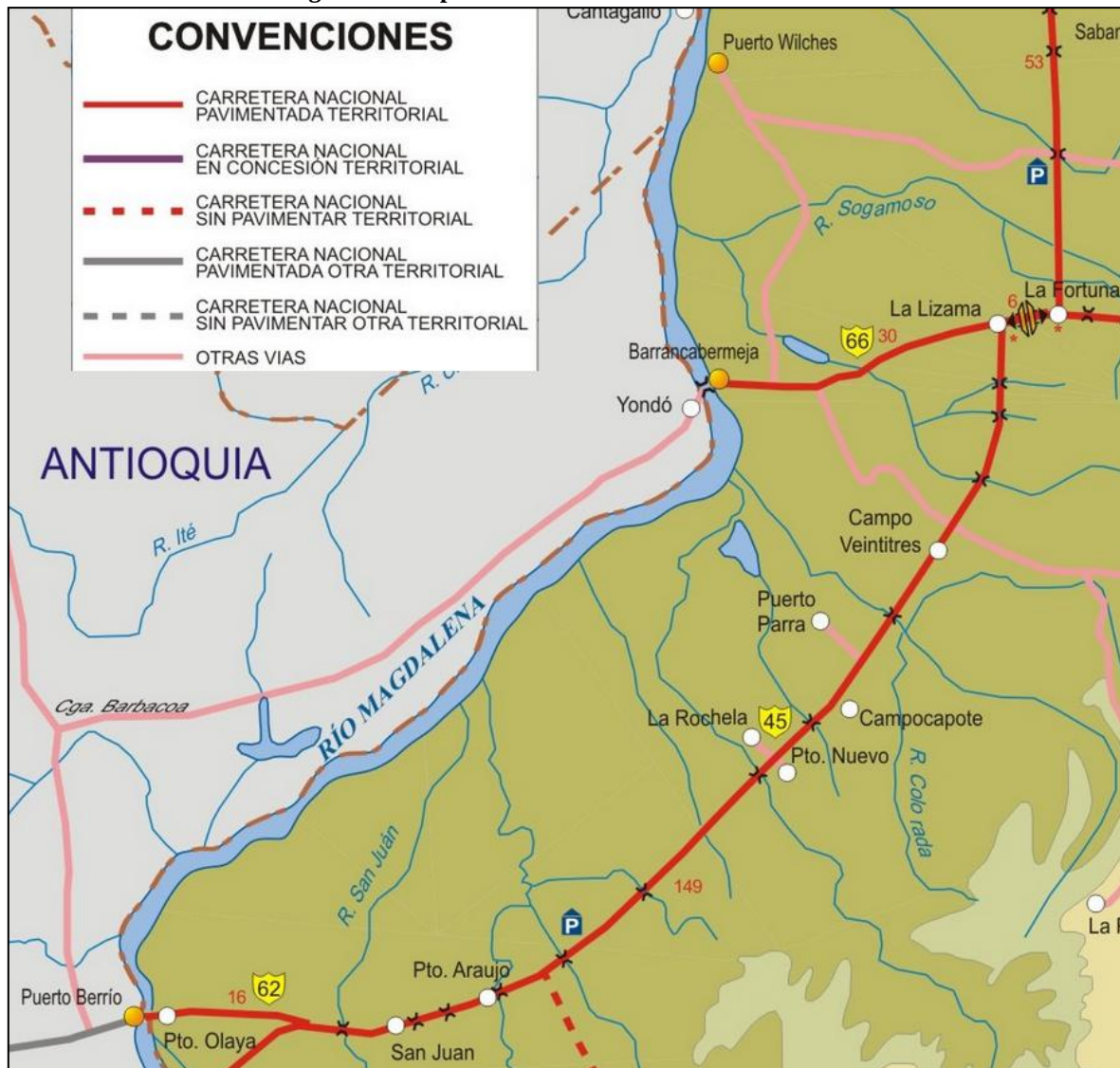
Fuente: COOPSERCOL

El operador férreo COOPSERCOL ha definido una tarifa por pasajero igual a \$140 / Km recorrido, debido a ello se establecieron unas estaciones que funcionan como paraderos y para los cuales se encuentran definidas unas tarifas.

2.1.2 Modo carretero

Las vías del corredor esta conformadas por carreteras de la red primaria y secundaria. La ruta 45 y la ruta 66 son las principales vías en la zona. La red vial es de aproximadamente 240 km de longitud y comunica entre sí a los centros urbanos ya descritos anteriormente. La Figura 2.3 muestra un esquema general de la red de carreteras en la zona de estudio.

Figura 2.3 Mapa de la red vial de la zona de estudio



Fuente:

http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portallIG/home_1/recursos/01_general/mapas/contenidos/15042008/22_santander.jsp#

2.1.3 Modo fluvial

La cuenca del río Magdalena presenta el mayor movimiento de pasajeros en transporte fluvial en el país. Esta cuenca, tiene como eje estructural al río Magdalena desde el Puerto Salgar (Cundinamarca) hasta Puerto de Calamar (Bolívar); para objeto de este estudio se cubrirá desde el municipio de Puerto Berrío (Antioquia) hasta el municipio de Puerto Wilches (Santander), pasando por Barrancabermeja (Santander) como se aprecia en la Figura 2.4. La longitud de este tramo es de aproximadamente 127 km.

Figura 2.4 Mapa de la red vial y red navegable de la zona de estudio



3 MARCO CONCEPTUAL

El objetivo de un sistema de transporte es satisfacer la demanda mediante la provisión de una oferta adecuada que responda a sus exigencias. Los servicios de transporte surgen como consecuencia de la necesidad que tienen los individuos de realizar actividades que implican desplazamientos; y por esta razón se dice que la demanda de transporte es derivada. En general, no se demanda viajar *per sé*, sino con el objeto de realizar alguna actividad localizada en el espacio y en el tiempo. Estamos, por tanto, ante una demanda cualitativa y diferenciada en el sentido de que existen viajes por múltiples motivos, a distintas horas del día y que pueden realizarse en distintos modos de transporte.

En lo que respecta a la oferta de transporte, se trata de un servicio que no puede ser acumulado para ser ofertado, en períodos donde existe una mayor demanda. Se produce, por tanto, un desequilibrio entre la cantidad ofertada y la demandada debido a la existencia de períodos con mayor nivel de demanda y períodos con menores niveles de demanda, siendo imposible trasladar la capacidad ociosa de un período a otro. Además, la demanda se encuentra localizada en un espacio, en atención a la ubicación geográfica de actividades y usos de suelo, lo que suele producir problemas de coordinación que afectan al equilibrio del sistema. Ajustar la capacidad a estas fluctuaciones constituye uno de los objetivos en la producción de transporte, ya que tanto la capacidad subutilizada como la congestión derivada de una capacidad insuficiente para atender la demanda generan costos a la sociedad.

3.1 Estado del arte

A nivel mundial la bibliografía de modelación de demanda de pasajeros es amplia, lo cual contrasta con la escasa participación de modos (como el férreo) en el transporte de pasajeros en Colombia. El desarrollo de trenes de alta velocidad ha permitido que el ferrocarril compita con el avión en distancias medias y largas, y con la carretera para distancias medias. Como primer referente, un estudio realizado en España (Martín & Nombela, 2007) se ocupa de los impactos microeconómicos de los nuevos servicios ferroviarios tiene como objetivos, en primer lugar, calcular la división modal (cuotas de mercado entre el aéreo, ferrocarril, autobús y coche privado) en la búsqueda de nuevos equilibrios, una vez que las nuevas líneas de alta velocidad estén en funcionamiento y, en segundo lugar, obtener algunas estimaciones aproximadas del número de pasajeros que utilizan estas nuevas líneas en el horizonte de 2010, con el fin para evaluar el potencial de revitalización de los ferrocarriles. Utilizando una muestra con las principales rutas, mediante un modelo de gravitacional se estima las previsiones flujo de pasajeros en 2010.

También se estimó un modelo logit multinomial para estudiar la elección del modo de transporte. Se combinaron los resultados de estos dos modelos para hacer una estimación aproximada del volumen total de pasajeros que es probable atraer por el ferrocarril, una vez que las inversiones previstas en líneas de alta velocidad se realizaron. Los datos se recogieron mediante una encuesta que trató de estudiar características básicas de los viajes realizados por residentes españoles, para lo cual se incluyeron preguntas en las encuestas como la duración del viaje, el modo de transporte utilizado y el propósito del viaje.

En este estudio sólo se tuvo en cuenta viajes de larga distancia, por ejemplo, por encima de los 100 kilómetros o viajes que obligan a los viajeros a dormir fuera de casa al menos una noche, suponiendo que los impactos de los nuevos trenes de alta velocidad se van a concentrar en este tipo de viajes. La encuesta se aplicó tomando en consideración cada hogar como una unidad de la muestra, y por esta razón, los resultados que han sido extraídos no se hace referencia a todas las personas que viajan en una determinada ruta, pero sólo a los residentes que viven en la provincia de viaje de origen. Sin embargo, para casi todas las rutas incluidas en el estudio, una gran mayoría de los viajeros son residentes. La muestra fue originalmente diseñada para ser representativa a nivel regiones españolas; sin embargo, con el fin de obtener más observaciones se utilizó un total de 187 rutas.

Para el análisis es relevante conocer que una característica destacada de la movilidad en España es que el automóvil es el modo dominante de transporte interurbano, en tanto que sólo el 9% de los viajeros utilizan los trenes para viajes interurbanos. A su vez, también es interesante observar que los aviones sólo se utilizan en España en las rutas de más de 280 km. Por estas razones, los investigadores optaron por dividir la muestra en dos submuestras: de corta distancia (100-280 km) y de larga distancia (por encima de 280 km). Se puede observar que el auto se usa más intensamente para de corta distancia viajes, con un total de la cuota de mercado del 85% y que el resto de los modos son más importantes en la larga distancia. Las previsiones obtenidas a partir de la modelo gravitacional muestran un incremento medio del 1,53% por año en el número total de viajeros durante el período 2000-2010; entretanto, se utilizó un modelo logit multinomial para estimar los efectos de la infraestructura en los individuos la elección de modo transporte.

Los modelos de elección indican que la elasticidad de tren y los usuarios de autobuses son muy sensibles a las variaciones en los tiempos de viaje, mientras que los cambios en las tarifas tienen un menor impacto sobre la demanda. El resultado opuesto se obtiene para los pasajeros aéreos, que son más sensibles a las tarifas que a los tiempos de viaje. Uno de los factores que explica estos hallazgos es la relativamente corta distancia de todas las rutas incluidas en la muestra (todos ellos por debajo de 800 km), que son representativas de viajes dentro de territorio español. Planes de viaje de los tiempos muestran una baja variabilidad, mientras que los trenes y autobuses son capaces de ofrecer a los usuarios una

gama mucho más amplia de viaje. Adicionalmente, de rutas de larga distancia (más de 500 km), los trenes van a básicamente atraer viajeros de avión y autobús, mientras que en otras rutas más cortas, mayores proporciones de demanda provendrán de los usuarios de automóviles. En general, el mercado para compartir los ferrocarriles según la investigación saltaría de un promedio nacional de 8,9% en 2000 hasta 22,8% en 2010, en virtud de la construcción de las nuevas líneas de alta velocidad, lo cual es un cambio notable en un corto periodo de tiempo.

Un estudio modelo de demanda de viajes interurbanos integrado en Japón (Yao & Morikawa, 2005) permitió estimar modelos de demanda y determinar los efectos de una HSR (*high speed rail*) a introducir en Japón con una velocidad aproximada de 500 Km/h; La recolección de información se realizó mediante una encuesta de preferencias reveladas (PR) y preferencias declaradas (PD) para la estimación del modelo de elección modal. Los datos de RP reflejan las opciones actuales para viaje interurbano, mientras los datos de SP obtienen la preferencia para el sistema de HSR no existente aún. Se distribuyeron las encuestas a usuarios ferrocarril que originan viajes en una de las seis principales áreas metropolitanas de Japón (Tokio, Nagoya, Osaka, Kofu, Hiroshima, y Fukuoka). Los modos de viaje interurbanos considerados en este estudio son tren, autobús, automóvil, y avión. El modo ferroviario es dividido en tres alternativas: el tren normal, Shinkansen y HSR.

En Reino Unido, un estudio de transporte (Wardman & Tyler, 2000) presentan modelos de proporción de viaje ferroviarios que no sólo contienen estimaciones de elasticidades de accesibilidad y del efectos de un rango de las variables socio-económicas en la demanda para el viajes en tren. En efecto, la información recolectada a partir de una encuesta de PR contiene la información sobre variables de que son el interés a este estudio, destacando si el tren fue considerado para la jornada y, si fuera considerado, por qué no fue usado; la distancia total de viaje; el propósito de viaje; la ocupación del automóvil, cantidad de equipaje, quién pagó por la gasolina, el tiempo de acceso y costó a la estación del origen y tiempo de salida y costo de la estación del destino y uso anterior del servicio ferroviario y el ingreso del encuestado. De los 527 individuos que habían proporcionado los datos pertinentes, 72 (14%) tenía considerado el tren para la jornada que ellos estaban haciendo. Un modelo de elección logit fue calibrado para explicar si los usuarios del automóvil consideraron tren por la referencia al rango de variables potencialmente pertinentes de un listado presentado, incluyendo en la función de utilidad sistemática las siguientes variables: ingreso, distancia, costo generalizado y una variable para denotar si el servicio ferroviario se había usado dentro de los últimos 3 meses.

En Suramérica, más exactamente en Chile (Ortúzar, Iglesias, Ivelic, & Godoy, 2007) formularon, estimaron y aplicaron un modelo de generación, distribución y partición modal conjunta de viajes interurbanos de pasajeros, para la Macrozona Centro- Norte de Chile, un

área de aproximadamente 350.000 km² que alberga dos tercios de la población del país. Los modos de transporte considerados fueron los siguientes: bus rural, bus clásico, bus ejecutivo, bus salón cama, transporte privado, transporte público menor (taxi colectivo), tren y avión. El modelo jerárquico de elección se estimó en forma secuencial, empezando por un modelo conjunto de elección de destino y modo, seguido de un modelo de generación que incluía una etapa de elección de la longitud de viaje. El modelo de generación incorporó entre sus variables una medida de accesibilidad, calculada como la utilidad compuesta (logsuma) del modelo de elección de destino y modo; destaca el hecho que su parámetro resultó con signo correcto y altamente significativo. Para la modelación se distinguió entre viajes basados (BH) y no basados (NBH) en el hogar, considerando ocho segmentos que diferenciaban los viajes según propósito, temporada y unidad de viaje (viajeros individuales o grupos), y se modeló en forma separada los viajes dependiendo de su longitud (cortos, medianos y largos). La información básica para la modelación provino de una encuesta origen-destino de interceptación llevada a cabo en la zona en el período 2001-2002. De este estudio se resalta el crecimiento proyectado de viajes diarios 2001 - 2005 que tuvo el modo de transporte tren, ya que para el año 2005 en época de verano y época normal fue de 81,7% y 48,7% respectivamente.

En la islas Canarias se realizó un trabajo investigativo (Ortúzar & González, 2002) en el cual se examinan las variaciones de elección de modo de transporte en viajeros para viajes entre islas cuando las condiciones del día van cambiando, tiempo total gastado en el día, la tarifa, o condiciones adicionales. La ruta estudiada es la ruta entre Gran Canarias y Tenerife, donde tres modos de transporte están disponibles: Avión, jetfoil² y ferry³. Dos modelos de estructuras están probados, y mediante teoría de modelos discretos investiga la presencia de el efecto ingreso. Los modelos predichos son comparados con observaciones para dos políticas de cambio.

Otras investigaciones sobre modelos de oferta, describen las características principales de diferentes tipos de modelos de asignación de viajes a redes de transporte público actualmente en uso y discute sus ventajas y limitaciones. Además se presentan algunas consideraciones referentes a la aplicabilidad de los modelos existentes al análisis de redes en países en desarrollo (De Cea, 1984).

² Nombre que recibieron una serie de barcos de pasajeros, diseñados por Boeing. Esta empresa comenzó a adaptar varios sistemas utilizados principalmente en aviones jet para hidroplanos.

³ Generalmente un barco, pero a veces un buque, utilizado para llevar, principalmente los pasajeros, y en ocasiones los vehículos y carga, así, a través de un cuerpo de agua.

3.2 Modelos de generación y atracción de viajes

La primera etapa del modelo clásico del transporte es la generación y atracción de viajes. En esta etapa se pretende determinar el número de viajes producidos y atraídos en cada zona en un periodo determinado. Se puede precisar que la realización y la atracción de un viaje es dependiente del uso del suelo, las características socioeconómicas de la población y la naturaleza del sistema de transporte.

Cada uno de los parámetros que definen la realización y atracción de un viaje se puede representar a través de variables interdependientes que luego se proyectan al futuro para estudiar acciones sobre las redes de transporte.

En los modelos de generación y atracción de viajes existen dos categorías:

- Modelos agregados a nivel zonal: Estos modelos relacionan el total de los viajes generados y atraídos en cada zona con variables como: población, ingreso, número de hogares o familias, tasa de motorización, accesibilidad, entre otras. La generación de viajes permite convertir los datos de entrada, referidos a la localización e intensidad de la futura actividad en el área urbana, en medidas de volúmenes de viajes. Por ello, reproducen el número futuro de viajes-persona a partir de una serie de variables independientes y representativas, debiendo cumplir con la condición de que se ajusten correctamente a la información disponible.
- Modelos desagregados a nivel de individuo o de hogar: Estos modelos intentan relacionar los viajes generados y atraídos en los domicilios con atributos tales como: cantidad de personas que viven en el hogar, números de vehículos, ingresos familiares, entre otros; como se puede ver estas variables corresponden a características propias del hogar. Este tipo de modelos son sensibles a variaciones de las características de las personas y no a la zona donde se realizan los viajes.

Dentro de las metodologías de pronóstico se tienen las siguientes: análisis de categorías o clasificación cruzada, análisis de clasificación múltiple y análisis de regresión lineal. Dado el tipo de información disponible y el carácter interurbano de la región estudiada, se optó por usar el análisis agregado a nivel zonal.

3.2.1 Regresión lineal

Consiste en obtener una expresión polinómica que permita evaluar una variable dependiente (número de viajes), a partir de una serie de variables independientes (o variables explicatorias del modelo). La forma general del modelo es:

$$y = k + x_1 * a_1 + x_2 * a_2 + \dots + x_n * a_n \quad (3.1)$$

Donde:

y: Variable dependiente (número de viajes)

x_i : Variables independientes (variables explicatorias del modelo)

a_i : Coeficientes de las variables explicatorias

k: Intercepto que en este caso representa los viajes no explicados por las variables independientes.

3.3 Modelos de distribución de viajes

El hecho de poder modelar en forma adecuada la etapa de distribución de viajes es un requisito fundamental para poder realizar una planificación eficiente y realista de un sistema de transporte. El resultado fundamental de esta etapa es la obtención de las matrices origen-destino, que pueden ser desagregadas por tipo de persona, motivo del viaje y hora del día.

Un primer estadio de modelos de distribución lo componen aquellos fundamentados en la existencia de una matriz de viajes base, obtenida normalmente a través de encuestas origen - destino. Estos son los denominados modelos de factor de crecimiento en los cuales, a partir de información relativa a crecimientos estimados de los propios viajes o de alguna variable de tipo socioeconómico (población, tasa de motorización, renta, etc.), se determinan los factores de expansión o crecimiento a aplicar a la matriz original. Las ventajas de estos métodos se sintetizan en su sencillez: facilidad de manejo, soluciones obtenidas en pocas iteraciones y buenos resultados a corto plazo. Por el contrario, son inaplicables en aquellas áreas de estudio donde se prevea cambios significativos en la red o en los usos del suelo. Por otro lado, al aplicar los coeficientes de crecimiento los viajes se multiplican pero la estructura de la matriz se mantiene, por lo que un posible error en una celda no se corrige sino que se magnifica. Modelos dentro de este grupo son: método del factor uniforme, método del factor promedio, el modelo de Detroit y el modelo de Fratar (Ortúzar, 1998).

Otro importante grupo de modelos de distribución son todos aquellos basados en analogías con el modelo de gravedad. Inicialmente los modelos de esta familia presentaban una estructura como la indicada en la siguiente ecuación:

$$V_{ij} = A_i O_i B_j D_j d_{ij}^{-n} \quad (3.2)$$

Con:

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_j d_{ij}^{-n}} \quad (3.3)$$

$$B_j = \frac{1}{\sum_i A_i O_i d_{ij}^{-n}} \quad (3.4)$$

Conocido como modelo de gravitacional doblemente acotado, donde:

O_i = Viajes originados en la zona i .

D_j = Viajes atraídos en la zona j .

d = distancia entre la zona i y j .

n es un parámetro que se debe calibrar.

3.3.1 Costo generalizado y costo compuesto

Previamente a la especificación del modelo a estudiar es conveniente hacer referencia a las variables de impedancia seleccionadas. Vale la pena aclarar que debido a restricciones de información no fue posible diferenciar por tipos de usuario (con y sin acceso a auto). Para el corredor estudiado se logró recolectar información relevante para calibrar modelos involucrando los tres modos disponibles en la zona de estudio; por ello, se recurre a especificar los conocidos costos compuestos de viaje. Estos últimos se forman a partir de los costos generalizados de cada modo de transporte, los cuales vienen definidos por funciones de costo generalizado como la siguiente:

$$C_{ij}^k = \text{Costo} + \theta_{tv} * t_{viaje} \quad (3.5)$$

C_{ij} = Costo generalizado entre la zona i y la zona j .

Costo = Tarifa de los modos evaluados.

t_{viaje} = Tiempo de viaje desde la zona i a la zona j .

θ_{tv} = parámetro valor del tiempo de viaje.

Como se menciono anteriormente, para poder desarrollar los modelos de distribución de viajes, se necesita conocer el valor del costo compuesto para cada uno de los pares (i, j) y diferenciados por tipo de usuario. Este hecho se debe a que el costo compuesto representa el costo en los casos que existe más de un modo para el par (i, j) .

Por lo tanto una vez obtenido el costo generalizado para cada uno de los modos disponibles, se debe calcular el costo compuesto $\bar{C}_{ij}$ que viene dado por la siguiente expresión “logsum” (Williams H. , 1976):

$$\bar{C}_{ij}^n = \left(\frac{1}{\lambda^n} \right) \ln \left(\sum_k \exp \left(-\lambda^n (C_{ij}^k + \delta^k) \right) \right) \quad (3.6)$$

Llegados a este punto, se debe proceder a calcular el valor de λ^n y encontrar las constantes específicas δ para cada modo, las cuales permiten para que el modelo replique de forma certera las proporciones de mercado en que se utiliza cada modo. Dichos parámetros son factibles de obtener utilizando la transformada de Berkson-Theil.

3.3.2 Modelo de maximización de entropía doblemente acotado

Este enfoque permite una aproximación formal al problema de distribución de viajes. Entendiendo entropía como probabilidad y relacionada con la incertidumbre respecto a la información de que dispone el analista, se distinguen los siguientes estados:

- Estados micro: Viajes de un individuo desde un origen i a un destino j .
- Estados meso: Los viajes realizados desde i a j . $\{V_{ij}\}$.
- Estados macro: Número de viajes generados y atraídos por cada zona. O_i y D_j .

La esencia del método se fundamenta en la hipótesis de que todos los estados micro son igualmente probables (Wilson, 1976). En un estado macro, compuesto por estados meso, los que a su vez se componen de estados micro, y utilizando la aproximación de Stirling para poder realizar la maximización de la probabilidad (máximo número de estados micro), es posible obtener el modelo conocido como modelo gravitacional doblemente acotado, dado por la expresión:

$$V_{ij} = A_i O_i B_j D_j e^{-\beta C_{ij}} \quad (3.7)$$

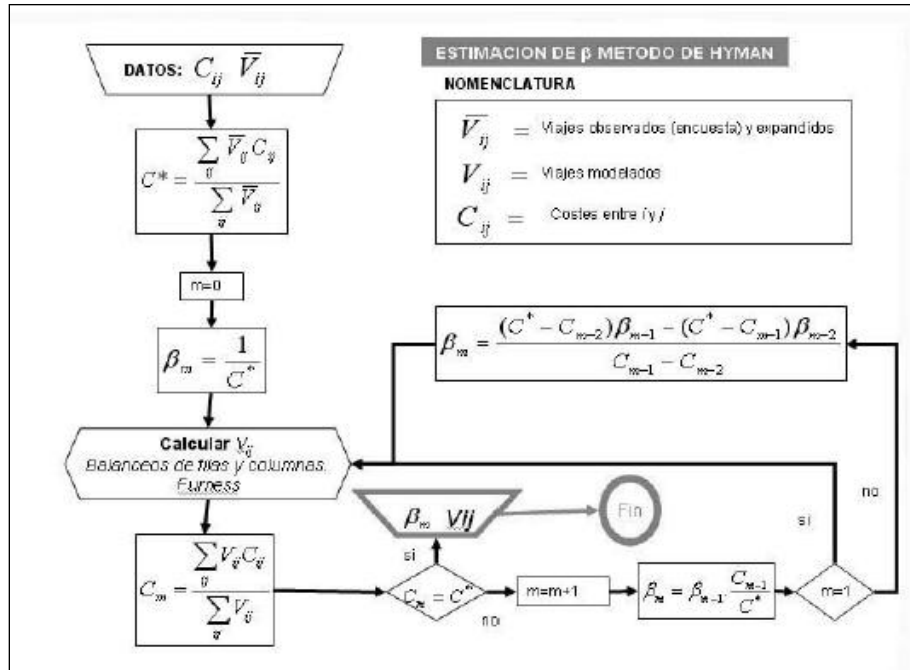
El parámetro β deberá ser calibrado para utilidad el modelo con propósitos de predicción; para lograrlo frecuentemente se utiliza el método de Hyman (Ortúzar J. d., 1998).

3.3.3 Método Hyman

Es importante señalar que se trata de un procedimiento que es utilizado para calibrar el modelo para un solo tipo de usuario en el caso de tener la información desagregada. Por ejemplo, al tener dos tipos de usuarios se hace necesario realizar dos veces el procedimiento y calibrar en forma independiente los modelos. La información necesaria para estimar los parámetros del modelo corresponde a la matriz de viajes de la muestra y la matriz de costos generalizados al igual que el costo medio del sistema, distinguiendo según tipo de usuarios.

Sintetizando, el método consiste en dos procesos iterativos, uno dentro del otro, que buscan un valor de β , balanceando la matriz para luego tomar otro valor de β y volver a balancear hasta que se logre igualar los costos medios de la última iteración con la de la matriz de costos original, tal como se describe en la siguiente figura.

Figura 3.1 Esquema del modelo de Maximización de Entropía, utilizando el método de Hyman con balanceos proporcionados por la metodología de Furness



Fuente: Moura et al, 2006

3.4 Modelos de elección discreta (MED)

Los modelos de elección discreta son utilizados en distintas ramas del análisis de demanda, como *marketing*, economía e ingeniería de transporte. En ésta última, es donde se centra el presente estudio. Específicamente, los MED son utilizados como una herramienta de predicción de demanda en la tercera etapa del modelo clásico de transporte: partición modal. Esta etapa es finalmente la base del estudio desagregado⁴ de demanda en las redes de transporte.

Los modelos de elección discreta se sustentan en teorías de comportamiento individual, es así como se postula que:

“La probabilidad de que un individuo escoja una alternativa dada, es función de sus características socioeconómicas y su atracción relativa hacia esa opción”. (Ortúzar & Willumsen, 2001).

⁴ Análisis a partir de datos individuales de la población.

3.4.1 Teoría de utilidad aleatoria (TUA)

La utilidad indirecta de la alternativa j para un individuo q , U_{jq} , está representada por la suma de un término conocido por el modelador y otro aleatorio (Domencich & McFadden, 1975) (Williams, 1977); como se aprecia a continuación:

$$U_{jq} = V_{jq} + \varepsilon_{jq} \quad (3.8)$$

Aquí, V_{jq} representa la parte medible o determinística de la utilidad, que es función de los atributos de la alternativa y las características del individuo; por otra parte, ε_{jq} refleja el comportamiento, gustos individuales e idiosincrasia de los individuos; además de cualquier error de medición que haya cometido el modelador.

De esta forma, el modelo es capaz de explicar cómo dos individuos con los mismos atributos y con el mismo conjunto de alternativas disponibles, pueden elegir de forma distinta, o que un individuo no siempre opte por la alternativa con mayor utilidad (desde el punto de vista del modelador).

Así, un individuo q elegirá la alternativa j solamente si:

$$U_{jq} \geq U_{iq} \quad (3.9)$$

Al descomponer las utilidades en su parte aleatoria y determinística se llega a:

$$V_{jq} + \varepsilon_{jq} \geq V_{iq} + \varepsilon_{iq} \quad (3.10)$$

Luego:

$$V_{jq} - V_{iq} \geq \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq} \quad (3.11)$$

Donde el término $(\varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq})$ es desconocido por el modelador, por lo cual no se puede comprobar si la desigualdad se cumple con certeza; por esto se le debe asignar una probabilidad. De esta forma, la probabilidad de escoger la alternativa A_i es:

$$P_{jq} = \text{Prob}\{\varepsilon_{iq} \leq \varepsilon_{jq} + V_{jq} - V_{iq}, \forall A_i \in A(q)\} \quad (3.12)$$

Para más detalles en la derivación de la TUA ver Ortúzar & Willumsen (2001). A partir de la TUA, se desprenden diversos modelos de elección que sirven para estudiar el comportamiento de los usuarios al momento de elegir modo de transporte. Estos se diferencian entre sí por el distinto trato que le dan al término aleatorio ε_{jq} en la función de utilidad U_{jq} . El modelo base normalmente utilizado en estimación de demanda de transporte corresponde al Logit Multinomial (MNL), pero además existen otros modelos que permiten mayor flexibilidad, como el Logit Jerárquico (HL) y el Logit Mixto (ML).

3.4.2 Modelo logit multinomial (MNL)

Este modelo surge al asumir que los términos ε_{iq} son independiente e idénticamente distribuidos Gumbell (V_{iq}, λ), obteniéndose una forma para las probabilidades de elección. El término λ está asociado a la varianza de los errores, siendo un parámetro de escala del modelo.

$$P_{iq} = \frac{\exp(\lambda * V_{iq})}{\sum_{j \in A(q)} \exp(\lambda * V_{jq})} \quad (3.13)$$

Como afirman (Ortúzar & Willumsen, 2001) con respecto a la descomposición de la utilidad y a la utilidad determinística: “para que la descomposición sea correcta necesitamos una cierta homogeneidad en la población bajo estudio. En principio requeriremos que todos los individuos compartan (enfrenten o tengan disponible) el mismo conjunto de alternativas y las mismas restricciones, y para llegar a esto quizás sea necesario segmentar el mercado”. Por lo tanto, el individuo que elegiría la alternativa j en el caso en que perciba que le otorgará una mayor utilidad que la alternativa i . Entonces, la parte sistemática (o determinística) de la utilidad individual a menudo se supone como una función aditiva lineal en los atributos, como:

$$V_{jq} = ASC_j + \sum_k \beta_{kj} * x_{jkq} \quad (3.14)$$

En la cual los parámetros β se asumen constantes para todos los individuos pero pueden variar entre alternativas. La ASC es la denominada “constante específica de la alternativa” que representa la influencia neta de todas las características no observadas del individuo o de la alternativa en el modelo especificado (p.e. comodidad y conveniencia de uso de un modo de transporte específico).

Una propiedad interesante del modelo MNL es que si se consideran constantes modales asociadas a cada alternativa dentro de la función de utilidad, el modelo calibrado reproduce perfectamente la proporción de mercado de la muestra utilizada, independiente de la disponibilidad de las alternativas dentro de la población. Sin embargo, esta propiedad también es causa de la crítica y limitaciones en su aplicación práctica, al no considerar correlación entre las alternativas.

En efecto, si bien el modelo MNL es sencillo y de fácil uso, puede resultar poco realista en la práctica debido a sus supuestos. En primer lugar, es necesario asumir independencia entre las alternativas del conjunto de elección. En este sentido, existen modelos que permiten incorporar correlación entre alternativa, siendo el más utilizado el Modelo Logit Jerárquico (Williams, 1977), (Daly & Zachary, 1978).

Respecto de la homocedasticidad de los términos de error ε_{iq} , existen diversas formas de abordar dicha restricción (Muñizaga, Heydecker, & Ortúzar, 2000). Otro supuesto importante sobre los individuos es que sus funciones de utilidad poseen los mismos parámetros (i.e. idénticas utilidades marginales) por lo que se comportan de la misma manera a ojos del modelador. Esto se puede corregir (en cierta medida) en el modelo MNL permitiendo variaciones sistemáticas en los gustos a través de interacciones entre variables socioeconómicas y los atributos de las alternativas; sin embargo, las posibilidades muchas veces son reducidas. Modelos de elección discreta más recientes, como el Logit Mixto (Ben-Akiva & Buldoc, 1996) y (McFadden & Train, 2000), permiten modelar variaciones aleatorias en los gustos, estimando parámetros que varían dentro de la población.

3.4.3 Modelo logit mixto (ML)

El modelo ML nace de suponer una función de utilidad U_{in} conformada por una componente determinística V_{in} , una componente aleatoria ε_{in} independiente e idénticamente distribuida y uno o más términos aleatorios adicionales. Estos términos de error adicionales pueden ser agrupados en un término aditivo η_{in} , que puede ser función de datos observados de la alternativa, y que permite recoger la presencia de correlación y heterocedasticidad. Así, la función de utilidad queda definida como:

$$U_{in} = V_{in} + \eta_{in} + \varepsilon_{in} \quad (3.15)$$

Como ε es iid Gumbell, la probabilidad condicional en η de que el individuo n escoja la alternativa i corresponde al modelo Logit Multinomial (o Logit Simple):

$$P_n(i / \eta) = L_{in}(\eta) = \frac{e^{V_{in} + \eta_{in}}}{\sum_{j \in A(q)} e^{V_{jn} + \eta_{jn}}} \quad (3.16)$$

Por lo tanto, la probabilidad de elegir la alternativa corresponde a la integral de la probabilidad condicional sobre todos los posibles valores de η , lo que depende de los parámetros de su distribución, esto es:

$$P_{in} = \int L_{in}(\eta) f(\eta / \theta^*) d\eta \quad (3.17)$$

Como caso particular, puede suponerse una función de utilidad con la siguiente especificación:

$$U_{in} = \beta^t x_{in} + \mu_{in}^t z_{in} + \varepsilon_{in} \quad (3.18)$$

En esta expresión se asume que la componente determinística de la utilidad es lineal en los parámetros β que ponderan a los atributos x_{in} . Por otro lado, se asume que η depende de ciertos parámetros (μ_{in}) y datos observados relacionados con la alternativa i (z_{in}), relación que también se supone lineal en parámetros. Un supuesto adicional es que el término μ es propio del individuo, sin variar entre alternativas. Es decir:

$$\eta_{in} = \mu_{in}^t z_{in} \quad (3.19)$$

Para profundizar en el tema se puede consultar a Train (2009).

3.5 Estimación de modelos de demanda con datos mixtos de PR y PD

Los datos de PR brindan información directa del viaje actual (alternativa escogida) y características socioeconómicas de la persona encuestada. Se han utilizado durante muchos años para un sinnúmero de proyectos de modelación de transporte. No obstante, los datos PR no son capaces de predecir la demanda para el caso de implementación de nuevas alternativas de transporte o cuantificar variables difíciles de medir en la práctica como son las variables latentes (comodidad, seguridad, etc). Contrario a ello, los datos PD son observaciones realizadas a individuos, en las cuales el encuestado es sometido a la elección de alternativas de transporte en escenarios hipotéticos diseñados por el modelador. La principal desventaja con respecto a los datos PD consiste en preguntarse: ¿Qué tan confiable es la información?, dado que es bien difícil predecir si el encuestado efectivamente ante las situaciones impuestas hipotéticamente elegirá dicha alternativa en la práctica.

Debido a que el uso de datos PR y PD independientemente ha determinado las ventajas y virtudes de ambas metodologías, de hace un tiempo acá se ha empezado a implementar la estimación de modelos de demanda combinando datos de PR/PD, buscando aprovechar las ventajas y superar las limitaciones de cada tipo de datos (Louviere, Hensher, & Swait, 2000). En la práctica, muchas investigaciones (Ahern & Tapley, 2008; Román, Espino, & Martín, 2007; Espino, Román, & Ortúzar, 2006; entre otras) han tenido éxito con este tipo de metodología, haciendo recomendaciones según el ámbito de modelación.

3.6 Valor del tiempo

Siguiendo el enfoque clásico (Jara-Díaz & Ortúzar, 1986), dado un modelo desagregado estimado a partir de preferencias declaradas o mixtas que contenga como variables explicativas el tiempo y el costo, por ejemplo:

$$U_i = \theta_1 t_i + \theta_2 C_i \quad (3.20)$$

donde t_i corresponde al tiempo de viaje de la alternativa i y C_i es el costo o tarifa del viaje para la misma alternativa; para modelos lineales, una forma adecuada de estimar el valor subjetivo del tiempo (VST) es encontrando la tasa marginal de sustitución del tiempo y el costo a utilidad constante, como se muestra a continuación:

$$VST = \frac{\partial U_i / \partial t_i}{\partial U_i / \partial C_i} = \frac{\theta_2}{\theta_1} \quad (3.21)$$

En algunas investigaciones se ha logrado estimar VST para diferentes tipos de viajeros según la variable ingreso y según el modo de viaje (Ortúzar & González, 2002), donde se encontró que para individuos de ingresos altos tenían valoración más alta del tiempo independientemente del propósito de viaje u otras características.

3.7 Elasticidades

La elasticidad, en los modelos de elección discreta, se define como la sensibilidad de la probabilidad de elegir una alternativa y permite calcular el porcentaje en que varía la probabilidad de elegir dicha alternativa para realizar el viaje debido a una variación del 1 por ciento en las variables genéricas del modelo (costo del tiquete, tiempo de viaje y frecuencia de despacho). Por definición esta elasticidad respecto de una variable k será:

$$\varepsilon = \frac{\Delta P_i}{\Delta X_k} \quad (3.22)$$

Donde: ΔP_i es la variación porcentual de la probabilidad de elegir la alternativa i ocasionada por una variación porcentual de la variable k ΔX_k (p.e. costo, tiempo o frecuencia). Para profundizar más sobre el tema, se recomienda consultar a Matas (1991).

3.8 Modelos de asignación de viajes (MAV)

Los modelos de asignación permiten explicar los recorridos que se realizan en los viajes producidos en una red vial o de transporte. Para comprender mejor el proceso de elaboración y el uso de este tipo de modelos es necesario establecer algunos conceptos que se definen a continuación:

- Zona: Porción del territorio que corresponde a una división administrativa, económica, de transporte, etc. en la que se generan y se atraen viajes.
- Red: Representación del conjunto de infraestructuras que configuran todos los caminos o rutas que unen los puntos de origen y destino del espacio de estudio. Esta formado de arcos y nodos. Así, se engloban todas las alternativas que disponen los viajeros. Los arcos deben definirse en concordancia con las características de las infraestructuras que representan, es decir, el número de carriles, la velocidad de circulación, porcentaje de pesados diarios, etc. A la red que representa la

infraestructura se superpone la red de los servicios de transporte público, caracterizado por su recorrido, frecuencia y costos.

- Camino: Es el resultado de la unión de varios arcos y nodos que constituyen una ruta válida para los viajeros.

Las funciones que se utilizan en el proceso de asignación dependen de los flujos en los arcos; en este sentido relacionan el número de viajes asignados con el tiempo de recorrido para cada arco. Los criterios que rigen la asignación de un viaje a una ruta u otra se engloban en cuatro técnicas de decisión: “todo o nada”, estocástica, iterativa con restricciones de capacidad, dinámica, entre otras.

3.8.1 Asignación de equilibrio estocástico (*Stochastic user equilibrium - SUE*)

En la concepción de este enfoque para modelar sistemas de transporte público, el costo generalizado de viaje percibido para cada arco se distribuye aleatoriamente para los individuos, y es función del flujo sobre el arco, es decir:

$$C_k^{r,s} = c_k^{r,s}(x_a \forall a \in k) + \xi_k^{r,s} \quad (3.23)$$

En el equilibrio el costo generalizado de viaje percibido por un usuario en todas las rutas usadas para un par O-D son iguales o menores al costo percibido por ese usuario en las otras rutas. Para un par O-D el flujo sobre una ruta k es:

$$f_k^{r,s} = q_{r,s} P_k^{r,s} \quad (3.24)$$

Donde:

$$\Pr[C_k^{r,s} < C_l^{r,s} \forall l \neq k] \leq P_k^{r,s} \leq \Pr[C_k^{r,s} \leq C_l^{r,s} \forall l \neq k] \quad (3.25)$$

Al igual que en el modelo estocástico, los diversos modelos de asignación de equilibrio estocástico de los usuarios difieren en la distribución de los costos percibidos de viaje asumido. Una vez esta distribución es especificada la probabilidad de elección de cada ruta puede ser calculada y posteriormente asignar los flujos.

La asignación para la elección de una ruta desde un origen a un destino se realiza dependiendo del atractivo general el cual es función de los elementos del viaje tales como tiempo, tarifas, etc. El método de asignación estocástica por equilibrio de usuario es un método iterativo que empieza con la búsqueda de la ruta más corta desde el origen al destino, con todos los componentes de viaje alterados por las componentes del error cuyas magnitudes se especifican, dependiendo además del tipo de distribución.

En teoría, en el equilibrio estocástico de usuario ningún viajero puede cambiar su utilidad esperada por el cambio de rutas. El resultado es que las rutas reciben flujo en función de su

atractividad relativa. Cuando el término error proviene de la distribución normal, los flujos son similares al modelo Probit de elección de ruta, si son Gumbell corresponden al popular Logit.

El costo generalizado de cada ruta de transporte en el modo fluvial depende de los siguientes parámetros:

- Costo total del viaje.
- Tiempos de espera en abordajes, paradas y transbordos.
- Tiempo real de viaje (tiempo total de viaje menos tiempos de espera).
- Número de transbordos.

La metodología de equilibrio estocástico asume que los usuarios del sistema no tienen un conocimiento perfecto del tiempo de viaje ni una percepción uniforme de su costo, motivo por el que no siempre coinciden el camino óptimo y el camino escogido para desarrollar un desplazamiento, existiendo múltiples relaciones O/D que son utilizadas por los usuarios.

$$C_g = \sum \gamma_1 * C_a + V_t * \left\{ \sum \gamma_2 * T_t + \sum \left(\gamma_3 * T_e + \gamma_4 * T_p + \gamma_5 * T * \left(1 + \alpha * \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \right) \right) \right\} \quad (3.26)$$

Donde:

C_g : Costo generalizado para desarrollar un desplazamiento

C_a : Tarifa de acceso a la ruta

γ_1 : Peso de la Tarifa

V_t : Valor monetario del tiempo

γ_2 : Peso del tiempo del trasbordo

T_t : Tiempo de trasbordo

γ_3 : Peso del tiempo de espera

T_e : Tiempo de espera

γ_4 : Peso del tiempo de acceso por parada

T_p : Tiempo asociado a cada parada en función de la gente que suba

γ_5 : Peso del tiempo del viaje en vehículo

T : Tiempo del recorrido en vehículo, incluye el tiempo de acceso multiplicado por su factor de peso

V : Volumen asignado de viajes a cada ruta

C : Capacidad de cada ruta

α, β : Determinan la importancia de la razón entre el volumen asignado y la capacidad

4 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN

Definidos los marcos conceptuales de los modelos a aplicar y establecidos los corredores de transporte, se procedió a la recolección de la información necesaria para la calibración del modelo a través de las pruebas piloto. Fueron aplicadas técnicas de toma de datos y lineamientos establecidos en la estructuración de la información, seguido del diseño de los instrumentos necesarios para la recolección de la información requerida por el modelo. Se ha tenido en cuenta que la recolección de información primaria es indispensable y fundamental para el proceso por lo cual su programación ha sido cuidadosa, en concordancia con las necesidades de los corredores seleccionados, lo que ha implicado escoger los puntos necesarios para lograr una adecuada cuantificación de la demanda. Paralelamente, se recogió la información secundaria disponible que se requiera para alimentar adecuadamente el modelo, en particular información socioeconómica e inventarios de la red y los servicios de transporte.

4.1 Enfoque metodológico

La información necesaria para realizar la modelación de la demanda y la oferta requiere obtener datos de terreno mediante los siguientes instrumentos de recolección:

- Medición de flujos de vehículos en cada modo (férreo, terrestre y fluvial), incluyendo clasificación.
- Medición de tasas de ocupación vehículos en cada modo (férreo, terrestre y fluvial).
- Medición de variables de servicio para los modos actualmente en operación
- Encuestas de preferencias reveladas (a usuarios de los actuales modos en competencia).
- Encuesta de preferencias declaradas (mejoras a los servicios en modo férreo).

En general, las mediciones de flujos (incluyendo clasificación y tasa de ocupación) se efectúan en forma simultánea a las de preferencias reveladas (PR), aclarando que estas últimas en varias ocasiones se hacían a bordo, en las terminales (férreas, terrestres y fluviales) y mediante la detención de vehículos en vías. Esto sirve para verificar el nivel de representatividad de la muestra y además permite obtener, por una parte, los niveles de flujo y su distribución por tipo de vehículo y, por otra, la información necesaria para determinar factores de expansión para las matrices de viaje. Las encuestas de preferencias reveladas aplicadas a usuarios de los actuales modos en competencia en el área en estudio, son elementos clave para la posterior modelación de la demanda.

Las encuestas de preferencias declaradas (PD) se ejecutaron en las terminales y estaciones correspondientes a cada modo, debido a que este tipo de instrumento exige una gran carga de información para su ejecución y por lo tanto se debía procurar su elaboración en lugares que permitieran comodidad y tranquilidad tanto para el encuestador y el encuestado. Ahora bien, en el caso de proyectos que involucren una alternativa nueva se requiere de este tipo de instrumentos de toma de información (Ortúzar JdD, 1997).

4.2 Encuesta de preferencias reveladas (PR)

Son datos que reflejan el comportamiento actual de los individuos en sus decisiones de viaje. Estos se obtienen a partir de encuestas PR que permiten recoger información de las variables que explican la utilidad de las distintas alternativas y de las elecciones realizadas. Hasta la mitad de los años 80 éste fue el tipo de datos más utilizado en la modelización de la demanda de transporte. Sin embargo, presentan una serie de limitaciones en términos de comprensión del comportamiento de viajes (Ortúzar & Willumsen, 2001).

La Figura 4.1 muestra el formato a diligenciar de encuestas de PR para los usuarios de los tres modos actuales en competencia. En ella, se preguntaba por información inherente al viaje actual en el modo escogido (origen, destino, transbordos, etc) e información socioeconómica del encuestado (ocupación, género, edad, ingresos, etc).

Figura 4.1 Formato de encuestas de Preferencias Reveladas (PR)

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: ESTRUCTURAR E IMPLEMENTAR MODELO CONCEPTUAL QUE PERMITA CUANTIFICAR LA DEMANDA ACTUAL, ESTIMAR LA DEMANDA FUTURA Y DETERMINAR LA MOVILIZACIÓN DE TRANSPORTE DE PASAJEROS EN LOS MODOS TERRESTRE POR CARRETERA, FLUVIAL, FERROVIARIO Y AÉREO A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL									
PRUEBA PILOTO MODO FÉRREO EN EL CORREDOR: GARCÍA CADENA - BARRANCABERMEJA - PUERTO BERRIO									
PREFERENCIAS REVELADAS									
Nombre de ruta	Empresa				DIGITADOR				
Fecha	/	/	Hora Inicial	:	Hora Final	:	Hoja	De	Código
Terminal de Origen	Terminal de Destino				Condición Climática				
Observador	Supervisor								
1. Origen de su viaje	Municipio	Corregimiento	Vereda	Otro	Lugar				
2. Destino de su viaje	Municipio	Corregimiento	Vereda	Otro	Lugar				
3. ¿Utilizó o utilizará otro vehículo ó medio de transporte para realizar este viaje ?									
ESTACIÓN TRANSBORDO 1		ESTACIÓN TRANSBORDO 2		ESTACIÓN TRANSBORDO 3		ESTACIÓN TRANSBORDO 4			
☐ MOTO ☐ TAXI ☐ AUTO ☐ AVIÓN ☐ BUS ☐ RIO		☐ MOTO ☐ TAXI ☐ AUTO ☐ AVIÓN ☐ BUS ☐ RIO		☐ MOTO ☐ TAXI ☐ AUTO ☐ AVIÓN ☐ BUS ☐ RIO		☐ MOTO ☐ TAXI ☐ AUTO ☐ AVIÓN ☐ BUS ☐ RIO			
COSTO (\$)		COSTO (\$)		COSTO (\$)		COSTO (\$)			
TIEMPO VIAJE (min)		TIEMPO VIAJE (min)		TIEMPO VIAJE (min)		TIEMPO VIAJE (min)			
TIEMPO ESPERA (min)		TIEMPO ESPERA (min)		TIEMPO ESPERA (min)		TIEMPO ESPERA (min)			
4. Consideró otro modo de transporte para el viaje actual		5. Ocupación		6. Motivo De Viaje		7. Frecuencia viaje?		8. Viaja Acompañado?	
☐ SI ☐ NO Cual? ☐ Por Carretera ☐ Por Río ☐ Por Aéreo ☐ Moto - Mesa		☐ ESTUDIO ☐ TRABAJO ☐ HOGAR ☐ OTRO		IDA ☐ REGRESO ☐ ☐ ESTUDIO ☐ ☐ TRABAJO ☐ ☐ DILIGENCIAS ☐ ☐ RECREACIÓN ☐ ☐ COMPRAS ☐ ☐ OTRO ☐		☐ > 3 DIAS/SEM ☐ 1-2 DIAS/SEM ☐ 1-2 DIAS/MES ☐ < 1 DIA/MES		☐ SI ☐ NO Cuántas Personas?	
13. Lleva equipaje pesado?		14. Sexo		15. Edad		16. Ingresos		10. Cuanto costó el pasaje?	
☐ NO ☐ SI		☐ F ☐ M		☐ < 500.000 ☐ 500.000 - 800.000 ☐ 800.000 - \$1'000.000 ☐ \$1'000.000 - \$2'000.000 ☐ más de \$2'000.000		☐ HH : ☐ MM		11. Quién pagó el pasaje? USTED ☐ EMPRESA ☐ OTRO ☐	
12. Lugar de residencia									

Fuente: Elaboración propia

La experiencia obtenida al aplicar la prueba piloto permitió mejorar el instrumento. Es así como en el anexo digital adjunto Anexo 1 se pueden consultar dos instrumentos para toma de información: una encuesta extensa y una encuesta corta. La primera se aplicaría en lugares donde las personas encuestadas gocen de disposición y tiempo para poder ser abordados y ejecutarles la encuesta como por ejemplo en terminales y/o estaciones; entretanto, la segunda es una versión simplificada para ser aplicada a bordo de los trenes o en encuestas de interceptación, casos en los cuales se dispone de poco tiempo para la entrevista.

4.3 Encuesta de preferencias declaradas (PD)

El objetivo de estas encuestas es proveer la información necesaria para estimar una función de demanda por mejoras en el nivel de servicio de algún modo, dada una demanda total de viajes en el área de interés. En nuestro caso específico, se desea estimar un modelo desagregado de demanda de tipo logit que entregue la probabilidad de que un individuo elija dicha alternativa entre las disponibles para viajar dentro de la zona donde se encuentra el corredor multimodal. El estudio se enfocó hacia tres mercados potenciales: los usuarios del modo carretero, usuarios del modo férreo y usuarios del modo fluvial.

Las encuestas PD ejecutadas en el estudio se realizaron en las terminales y estaciones de cada modo estudiado. No se ejecutaron encuestas PD a bordo de ningún tipo de vehículo debido a la dificultad de ejecutar estas encuestas de esta manera. Ya existe importante experiencia en la aplicación de este tipo de instrumento de medición, que ha demostrado ser el de mayor eficiencia en términos de la calidad de la información obtenida (Ortúzar, Iacobelli, Ivelic, & Munizaga, 1994).

4.3.1 PD a usuarios de modo férreo

La encuesta de PD consistió en presentar al entrevistado diversas situaciones de viaje en modo férreo y modo carretero, en cada una de las cuales debía elegir una de las dos alternativas. El contexto de elección era un viaje similar al que se encontraba efectuando al ser interceptado para entregarle la encuesta. Para este caso, los atributos seleccionados para caracterizar las alternativas de viaje y sus niveles de variación fueron los siguientes:

Tabla 4.1 Atributos y niveles de PD a usuarios de modo férreo

Variables	Niveles	Alternativa	
		Férreo	Carretero
Costo_(c)	0	$0,85*cf$	$0,95*cc$
	1	cf	cc
	2	$1,15*cf$	$1,05*cc$
Tiempo_(t)	0	$0,85*tf$	$0,85*tc$
	1	tf	tc
	2	$1,25*tf$	$1,20*tc$
Frecuencia_(f)	0	ff	fc
	1	$1,33*ff$	$1,33*fc$

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 4.1, las letras “c”, “t” y “f” corresponde a los atributos de costo de ticket, tiempo de viaje y frecuencias de despacho, respectivamente. Se diferencia entre modo férreo o modo carretero por las letras “c” y “f”, respectivamente. Por ejemplo, las siglas “cf” y “tc” corresponden a costo_férreo y tiempo_carretero, respectivamente. Los costos, tiempos y frecuencias tenidas en cuenta como bases son las que actualmente tienen los servicios. Para tratar que este ejercicio de aplicación de PD fuese útil, se procuró realizar un diseño con mejoras en las variables de servicio de los modos disponibles, realizando cambios sustanciales en los tiempos de viaje, costos de ticket y frecuencia de despachos.

La combinación de estos tres atributos y sus niveles de variación, dio lugar a un diseño fraccional factorial con nueve situaciones de elección (Kocur, Adler, Hyman, & Aunet, 1982).

4.3.2 PD a usuarios de modo carretero

Este tipo de diseño, los atributos y niveles fueron idénticos a los presentados en la Tabla 4.1, al igual que la metodología de aplicación de dicho instrumento.

4.3.3 PD a usuarios de modo fluvial

El diseño de esta parte del estudio se realizó en forma análoga a la descrita para los viajeros en modo férreo y carretero. A continuación (Tabla 4.2) se señala los atributos con que se caracterizó los viajes en los modos férreo, carretero y fluvial, y sus niveles de variación:

Tabla 4.2 Atributos y niveles de PD a usuarios de modo fluvial

Variables	Niveles	Alternativa		
		Férreo	Carretero	Fluvial
Costo_(c)	0	0,73*cf	0,92*cc	0,88*cl
	1	cf	cc	cl
	2	1,27*cf	1,08*cc	1,12*cl
Tiempo_(t)	0	0,67*tf	0,80*tc	0,80*tl
	1	tf	tc	tl
	2	1,33*tf	1,20*tc	1,20*tl
Frecuencia_(f)	0	0,75*ff	0,50*fc	0,67*fl
	1	ff	fc	fl
	2	1,25*ff	1,50*fc	1,33*fl

Fuente: Elaboración propia

Debido a que la ejecución de las PD a usuarios de los modos férreo y carretero se realizó primero, esto permitió realizar algunos ajustes a los niveles de los atributos tomados para la prueba PD a usuarios de modo fluvial.

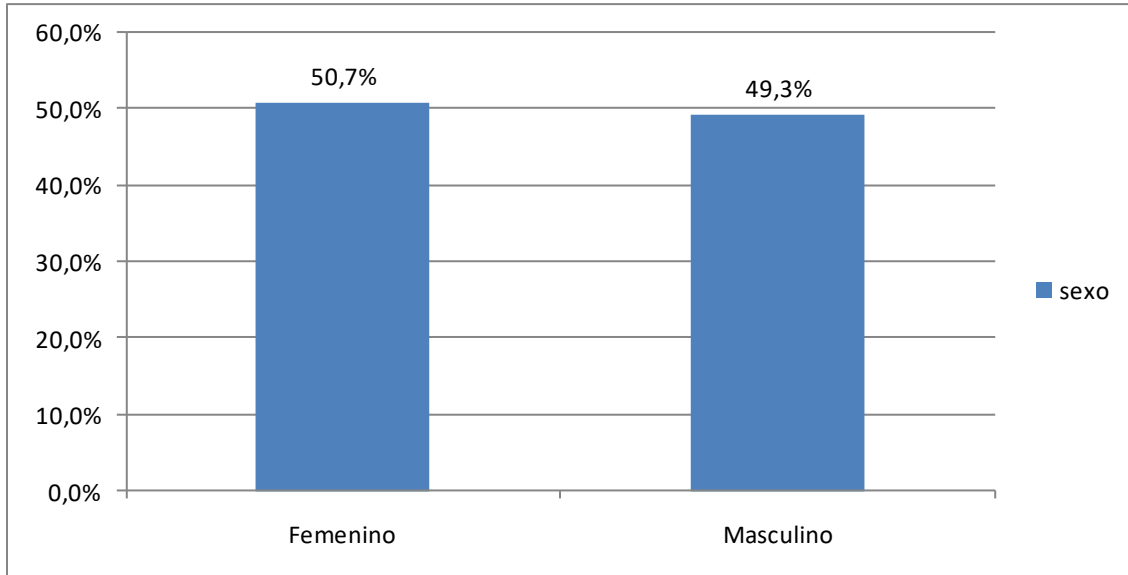
4.4 Análisis de la información obtenida en terreno

4.4.1 Muestra de viajeros en transporte férreo

Realizado los procesos de validación, depuración y corrección a los datos obtenidos en campo, se logró consolidar en la ruta Barrancabermeja – Puerto Berrío – Barrancabermeja un total de 314 encuestas de PR y en la ruta Barrancabermeja – García Cadena – Barrancabermeja se logró disponer de un total de 390 observaciones de PR, dando esto un total de 704 encuestas de PR a viajeros de modo férreo. Debido a la metodología utilizada durante la toma de información, se decidió realizar la encuesta PD a una sub-muestra que contenía sólo individuos cuyo origen y destino se encontraba en el grupo de zonas consideradas como de mayor generación-atracción y accesibilidad al tren, obteniéndose finalmente un total de 67 encuestas PD validadas, depuradas y corregidas.

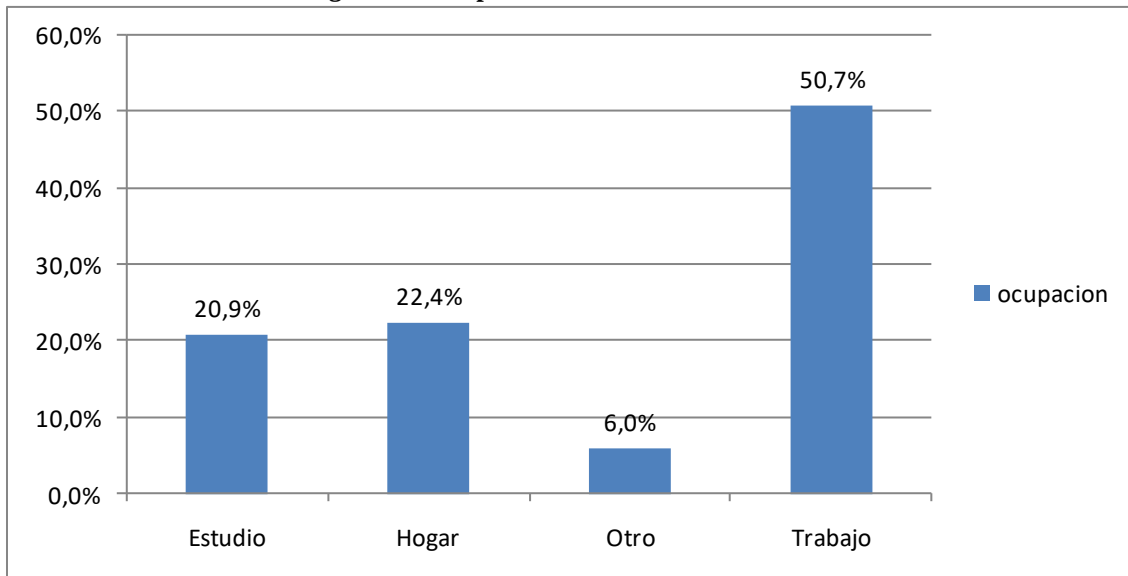
La Figura 4.2 muestra la distribución de la muestra según el género del individuo encuestado; como se aprecia en dicha figura, la muestra contiene un porcentaje similar de personas encuestadas en ambos géneros.

Figura 4.2 Género de usuarios modo férreo



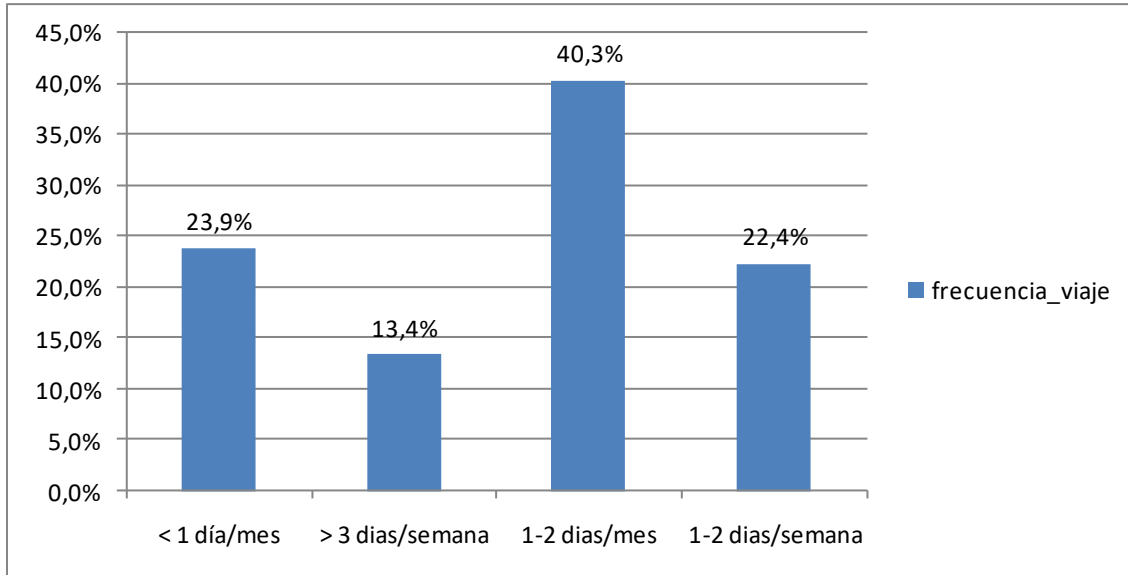
Como se puede apreciar en la Figura 4.3, un poco más del 50% de las personas encuestadas corresponde a individuos cuya ocupación principal es el trabajo con un 50,7% del total general.

Figura 4.3 Ocupación de usuarios modo férreo



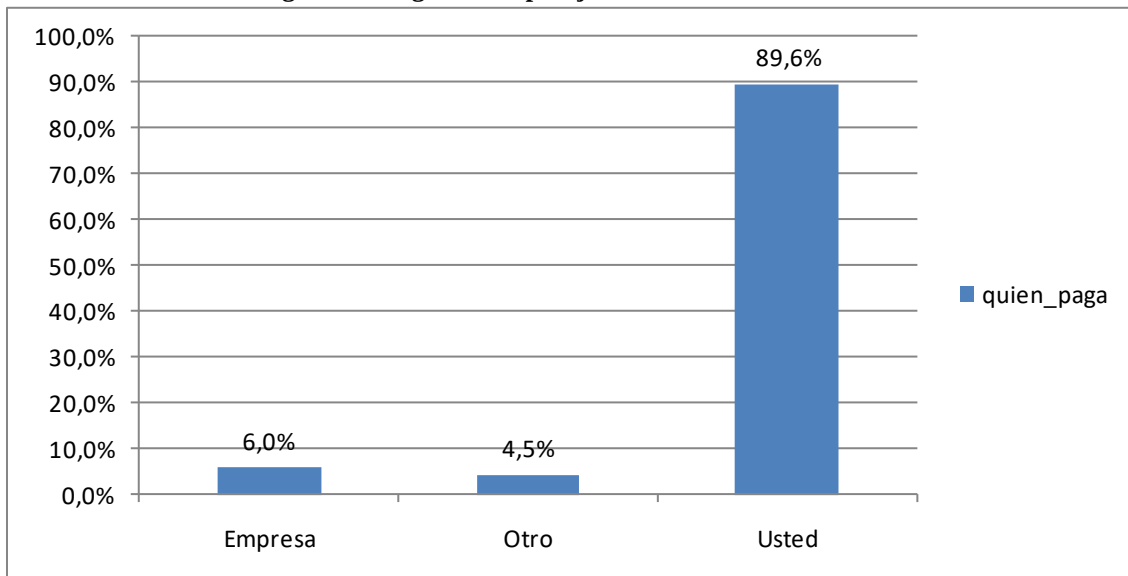
La distribución porcentual de los encuestados según la frecuencia con la que realizan el viaje se muestra en la Figura 4.4; el 40,3% de los individuos en modo férreo viajan de 1 a 2 días al mes (quincenalmente), la menor proporción de ellos (13,4%) lo realizan más de 3 días a la semana (diariamente).

Figura 4.4 Frecuencia de viaje de usuarios modo férreo



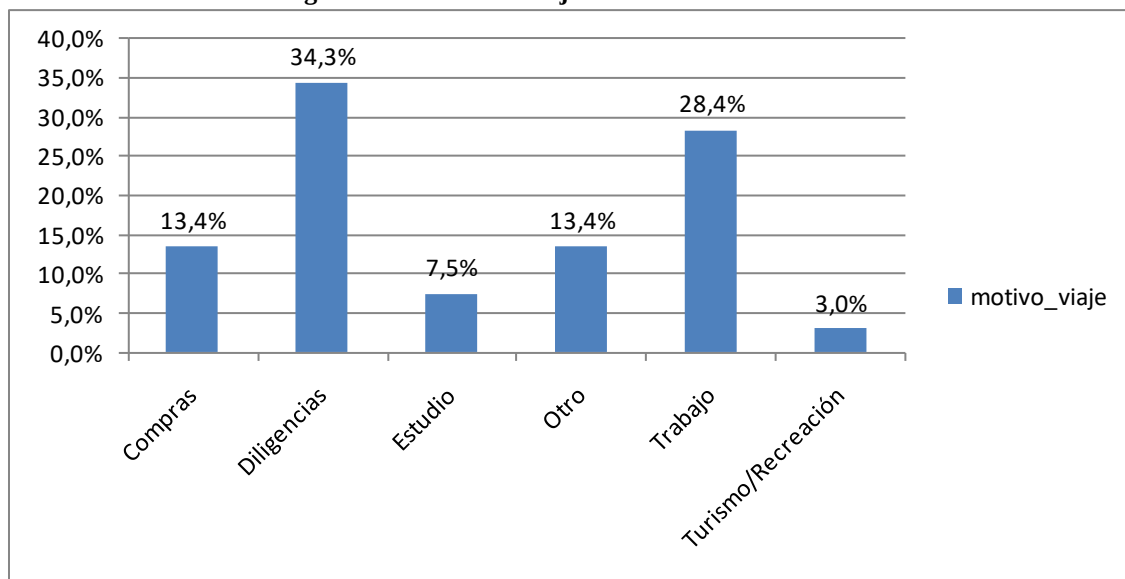
El 89,6% de los usuarios de modo férreo pagan su propio viaje; la distribución porcentual a la pregunta “¿quién pagó el pasaje?” se puede observar en la Figura 4.5.

Figura 4.5 Pagador del pasaje de usuarios modo férreo



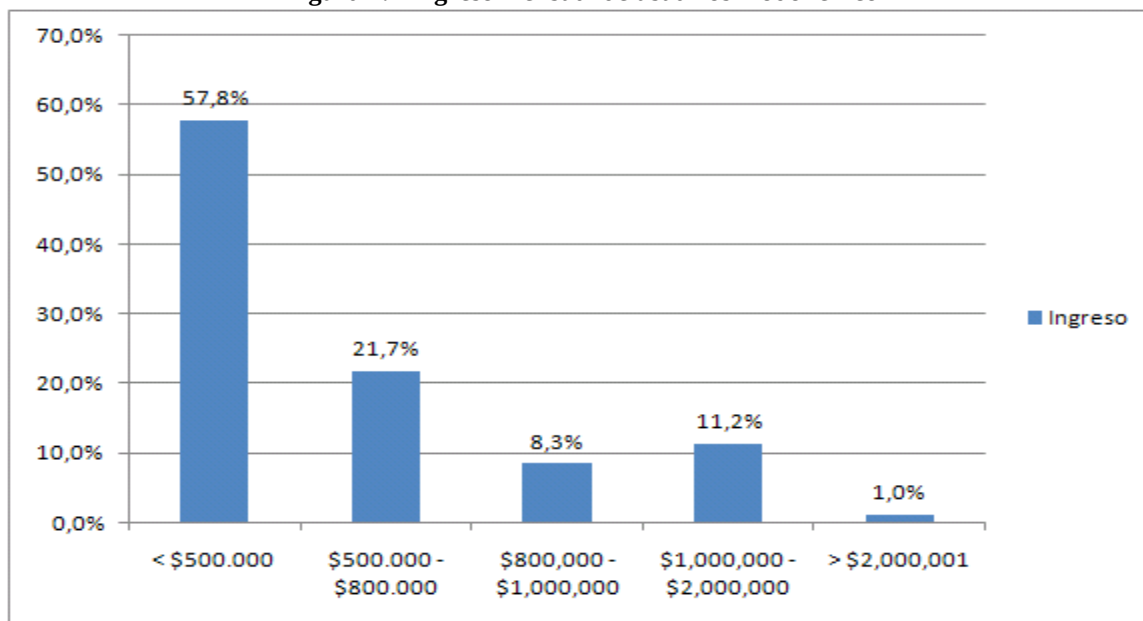
Los motivos de viaje correspondiente a los usuarios de modo férreo se muestran en la Figura 4.6; como se puede observar, los motivos con mayor porcentaje son diligencias (34,3%) y trabajo (28,4%), sumando entre ellos casi el 60% de la población.

Figura 4.6 Motivo de viaje de usuarios modo férreo



El 57,8% de los usuarios que utilizan el transporte férreo tiene un ingreso mensual inferior a \$500.000 como se observa en la Figura 4.7.

Figura 4.7 Ingreso mensual de usuarios modo férreo

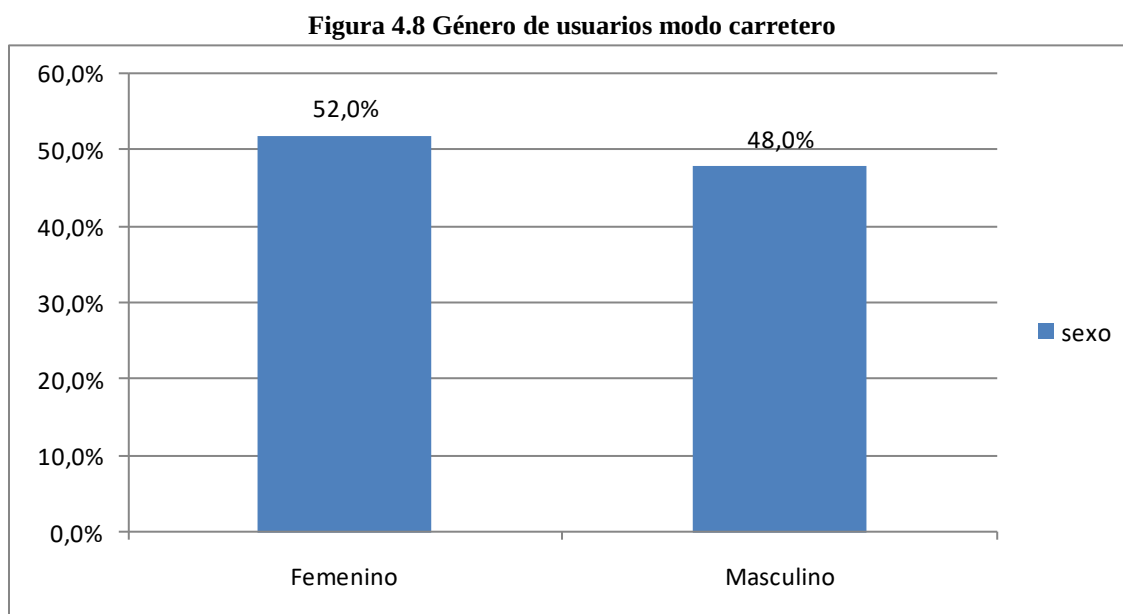


En dicha gráfica se puede ver que existe una relación inversamente proporcional entre el % de personas y el ingreso mensual.

4.4.2 Muestra de usuarios en transporte carretero

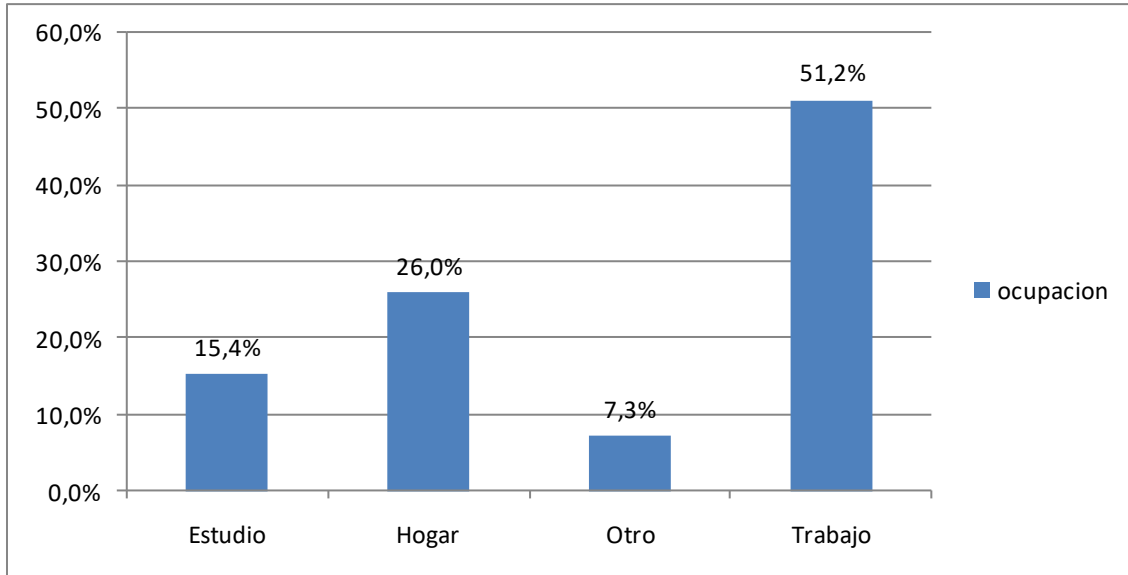
Tomados los correctivos y filtros necesarios para tener una base de datos óptima según este tipo de investigación, se finalizó con 56 PD. Con respecto a los datos PR fue posible el diligenciamiento de 181 encuestas sobre el reten de la vía que conduce de Barrancabermeja a Puerto Wilches y 144 en el reten que conduce de Barrancabermeja a Puerto Berrío.

La Figura 4.8 muestra la distribución de la muestra según el género del individuo encuestado; como se aprecia en dicha figura, la muestra contiene un 4% de diferencia entre los encuestados de ambos géneros.



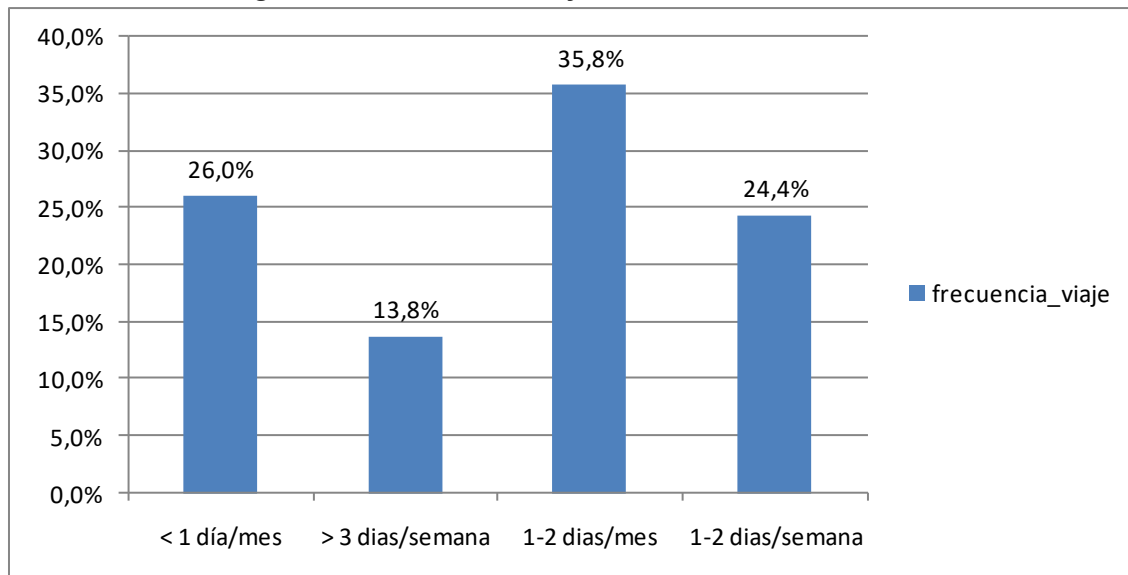
Como se puede apreciar en la Figura 4.9, un poco más del 50% de las personas encuestadas corresponde a individuos cuya ocupación principal es el trabajo con un 51,2% del total general.

Figura 4.9 Ocupación de usuarios modo carretero



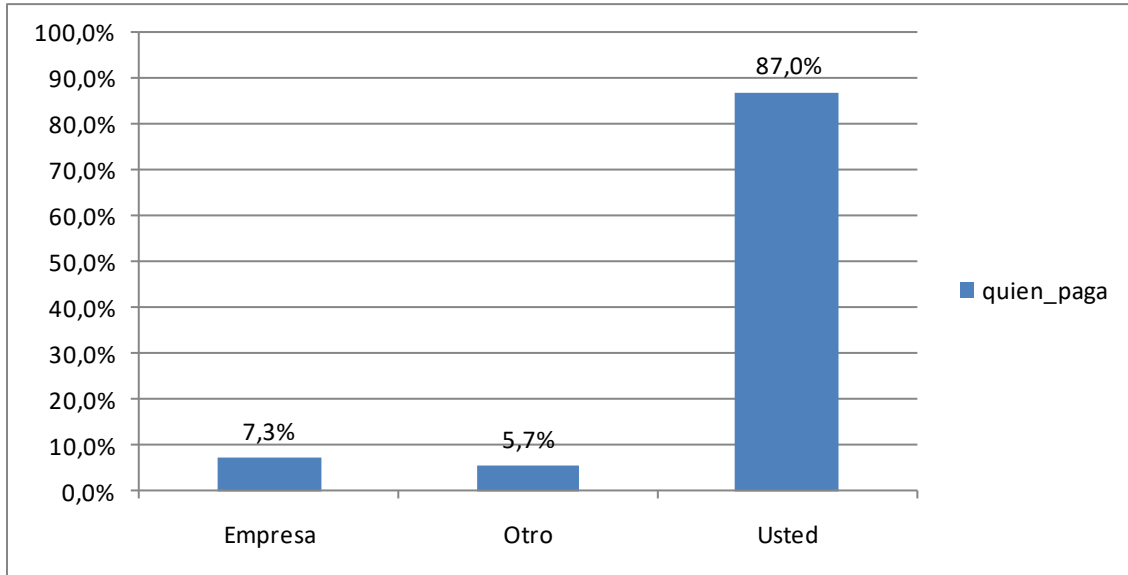
La distribución porcentual de los encuestados según la frecuencia con la que realizan el viaje se muestra en la Figura 4.10; el 35,8% de los individuos en modo carretero viajan de 1 a 2 días al mes (quincenalmente), la menor proporción de ellos (13,8%) lo realizan más de 3 días a la semana (diariamente).

Figura 4.10 Frecuencia de viaje de usuarios modo carretero



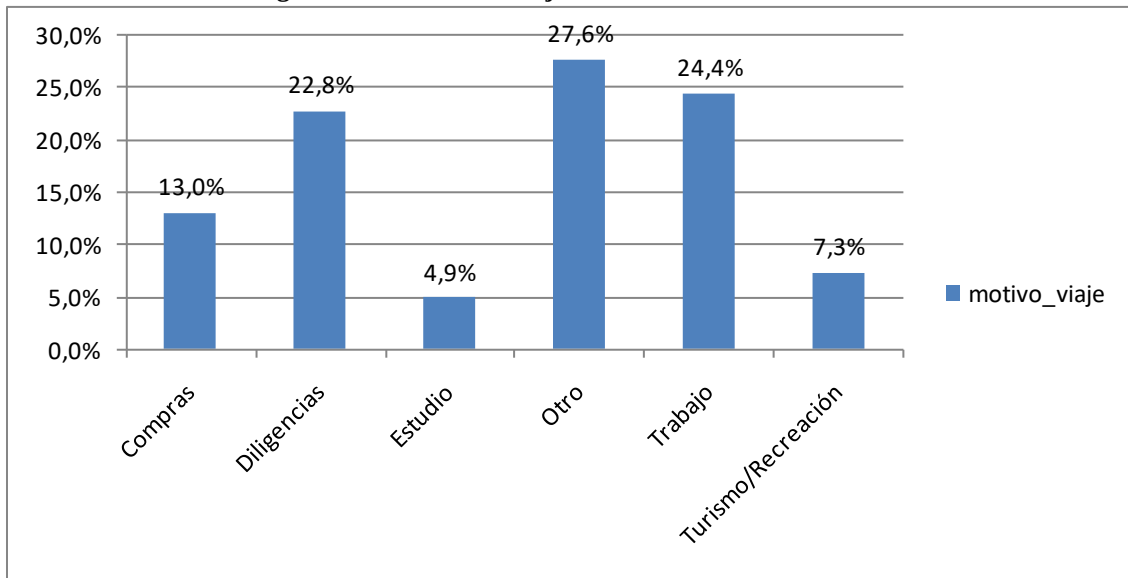
El 87,0% de los usuarios de modo férreo pagan su propio viaje; la distribución porcentual a la pregunta “¿quién pagó el pasaje?” se puede observar en la Figura 4.11.

Figura 4.11 Pagador del pasaje de usuarios modo carretero



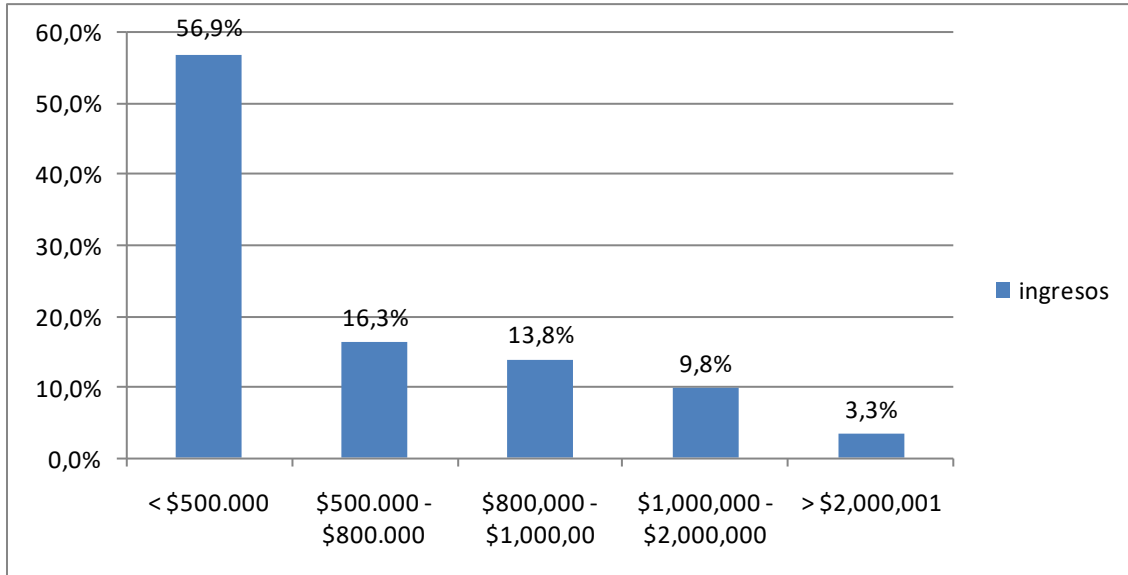
Los motivos de viaje correspondiente a los usuarios de modo carretero se muestran en la Figura 4.12; como se puede observar, los motivos con mayor porcentaje son “Otro” (27,6%) y trabajo (24,4%), sumando entre ellos el 52% de la población.

Figura 4.12 Motivo de viaje de usuarios modo carretero



El 56,9% de los usuarios que utilizan el transporte carretero tiene un ingreso mensual inferior a \$500.000 como se observa en la Figura 4.13. En dicha gráfica se puede ver que existe una relación inversamente proporcional entre el % de personas y el ingreso mensual.

Figura 4.13 Ingresos de usuarios modo carretero

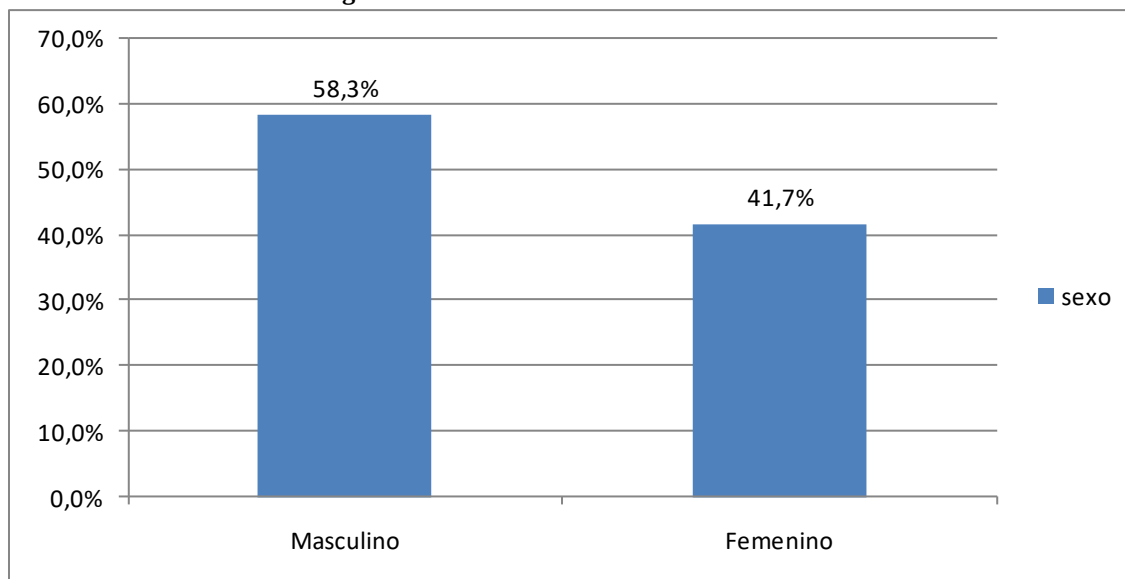


4.4.3 Muestra de usuarios en transporte fluvial

Efectuadas todas las validaciones y depuraciones del caso (al igual que en los otros dos modos) se obtuvo un total de 777 encuestas PR, de la cual fue posible obtener una submuestra para PD de 84 encuestas. La caracterización de los usuarios de modo fluvial se muestra a continuación.

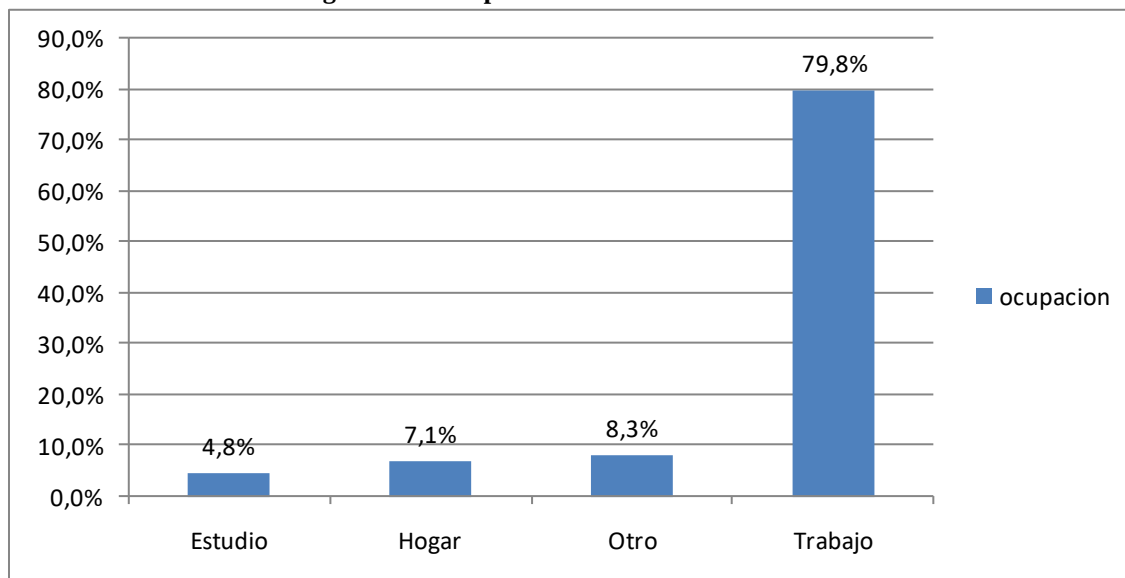
La Figura 4.14 muestra la distribución de la muestra según el género del individuo encuestado; como se aprecia en dicha figura, la muestra contiene un 16,6% de diferencia entre los encuestados de ambos géneros, teniendo el género masculino un 58,3% de encuestados.

Figura 4.14 Género de usuarios modo fluvial



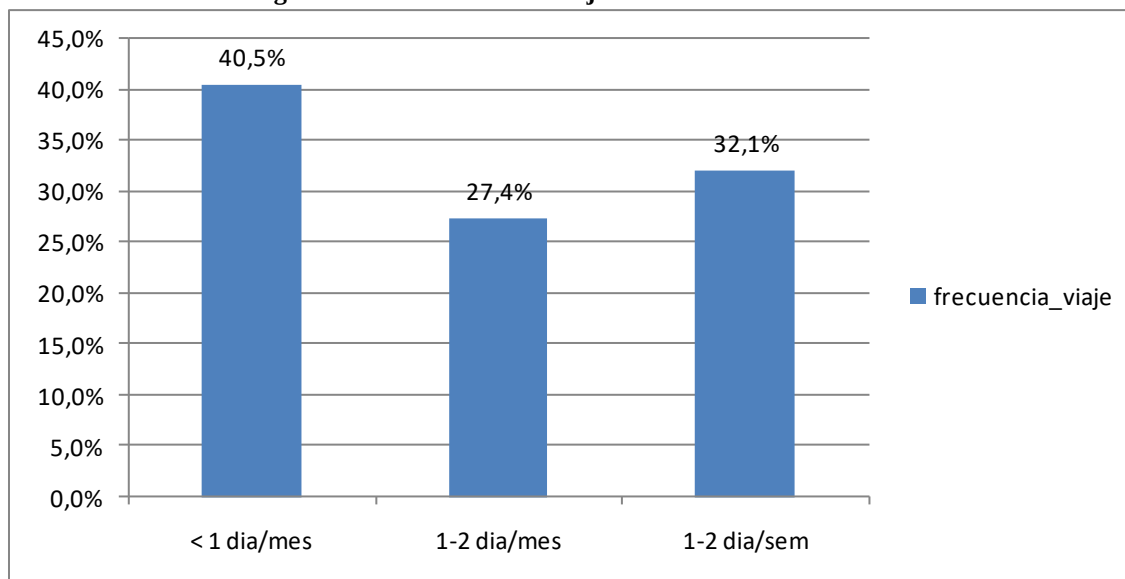
Como se puede apreciar en la Figura 4.15, las personas encuestadas corresponden a individuos cuya ocupación principal es el trabajo con un 79,8% del total general.

Figura 4.15 Ocupación de usuarios modo fluvial



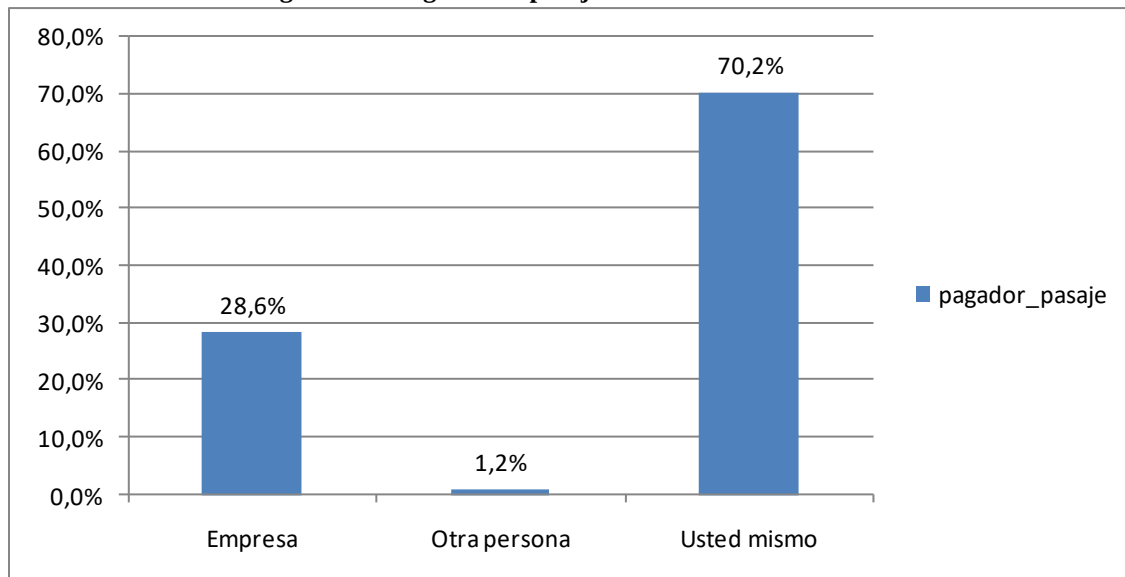
La distribución porcentual de los encuestados según la frecuencia con la que realizan el viaje se muestra en la Figura 4.16, donde el 40,5% de los individuos en modo fluvial viajan menos de un día al mes (eventualmente), la menor proporción de ellos (27,4%) lo realizan de 1 a 2 días al mes (quincenalmente). Llama la atención que dentro de esta muestra no se encuestó ningún individuo que viajara más de 3 días a la semana (diariamente).

Figura 4.16 Frecuencia de viaje de usuarios modo fluvial



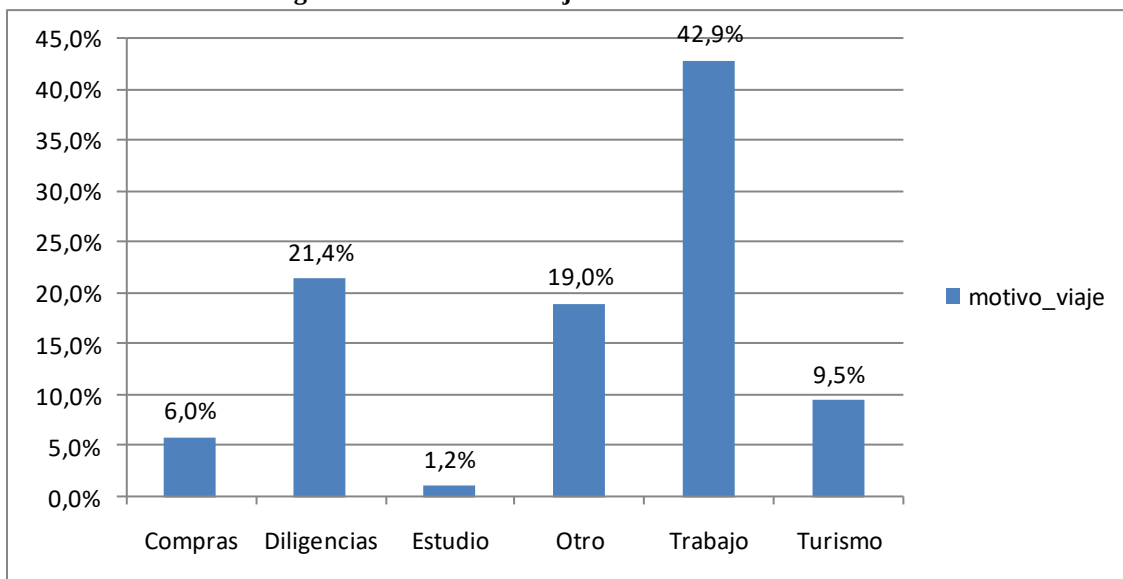
El 70,2% de los usuarios de modo fluvial pagan su propio viaje; la distribución porcentual a la pregunta “¿quién pagó el pasaje?” se puede observar en la Figura 4.17. En esta pregunta se encontró el mayor porcentaje (28,6%), con respecto a los otros modos, de personas que el pasaje lo paga la empresa donde trabajan.

Figura 4.17 Pagador de pasaje de usuarios modo fluvial



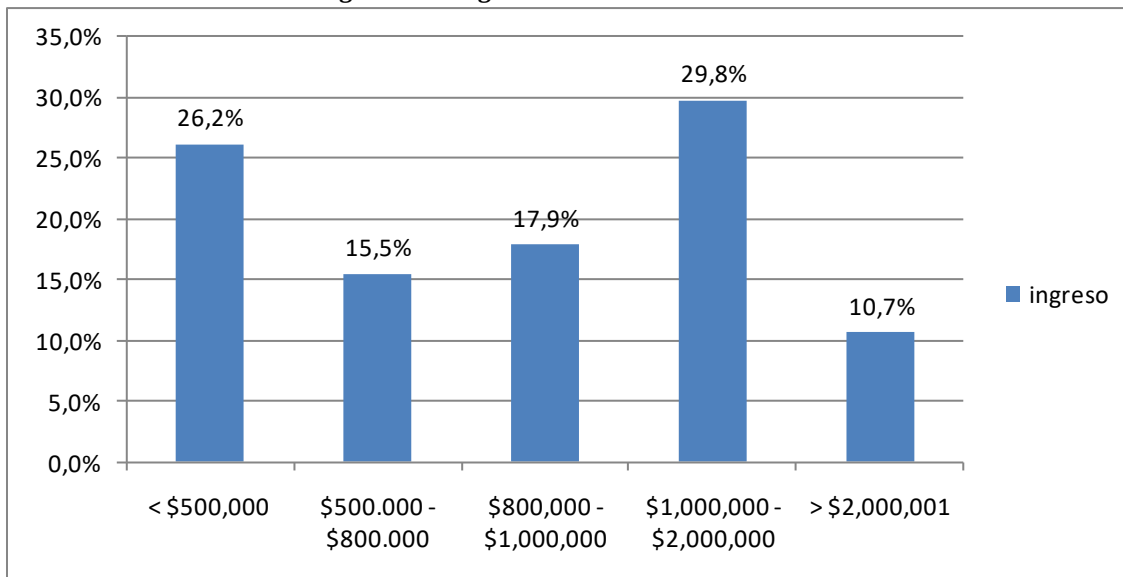
Los motivos de viaje correspondiente a los usuarios de modo fluvial se muestran en la Figura 4.18; como se puede observar, los motivos con mayor porcentaje son “Trabajo” (42,9%) y “Diligencias” (21,4%), sumando entre ellos el 64,3% de la población.

Figura 4.18 Motivo de viaje de usuarios modo fluvial



El 26,2% de los usuarios que utilizan el transporte fluvial tiene un ingreso mensual inferior a \$500.000 como se observa en la Figura 4.19. En dicha gráfica se puede ver que contrario a la población que utiliza los modos férreo y carretero, en modo fluvial el 29,8% tiene ingresos mensuales entre \$1.000.000 a \$2.000.000.

Figura 4.19 Ingreso de usuarios modo fluvial



5 ZONIFICACIÓN

El proceso de zonificación consiste en la agregación de unidades geográficas manejables para la modelación de futuros objetivos o propósitos. Los principales aspectos tenidos en cuenta en el proceso de zonificación para el área de estudio en la prueba piloto modo férreos incluyen la correspondencia con la división político administrativa, el tamaño de las zonas y los límites geográficos.

5.1 Criterios de zonificación

En la zonificación se procuró un tamaño de zonas que permitiera minimizar el error de agregación, causado por la suposición que todas las actividades son concentradas en el centroide.

A su vez, como la gran mayoría de los viajes captados en el corredor férreo tienen como origen y/o destinos los municipios de Barrancabermeja, Puerto Berrío, Puerto Parra, Puerto Wilches, Cimitarra y Simacota, para ellos se utilizó una zonificación a nivel de municipio ya que estos hacen parte del corredor férreo. En el caso de los municipios que no hacían parte de dicho corredor pero que pertenecían al Departamento de Santander se crearon zonas agrupando municipios que tuviesen características similares y para el resto del país fueron creadas zonas externas más grandes conformadas por la agregación de departamentos y algunos países vecinos. Nótese además, que se procuró compatibilidad con la división político-administrativa, en particular con zonas de censo, con los límites municipales y departamentales.

Un criterio fundamental es el de homogeneidad en varios aspectos como composición de la población, composición demográfica, actividad económica y en las rutas de acceso de las poblaciones que componen la zona

La sencillez y facilidad para la definición del centroide conllevó a procurar que todas las zonas contengan un centro urbano o población de gran tamaño, en donde se concentren la generación y atracción de viajes.

5.2 Codificación y nomenclatura de las zonas

Para las zonas internas el primero o los primeros dos dígitos corresponden al código DANE del departamento donde se encuentra la zona. En el caso de que una zona esté conformada por más de un departamento estos dígitos corresponden al departamento más representativo. Los siguientes dos dígitos del código de zona corresponden a un

consecutivo para cada zona de un departamento, comenzando por la zona que contenga su capital.

Para el caso de las zonas externas, se utilizó un número de una cifra que agrupa diferentes departamentos y zonas internacionales, utilizando números consecutivos.

5.3 Resumen de zonificación

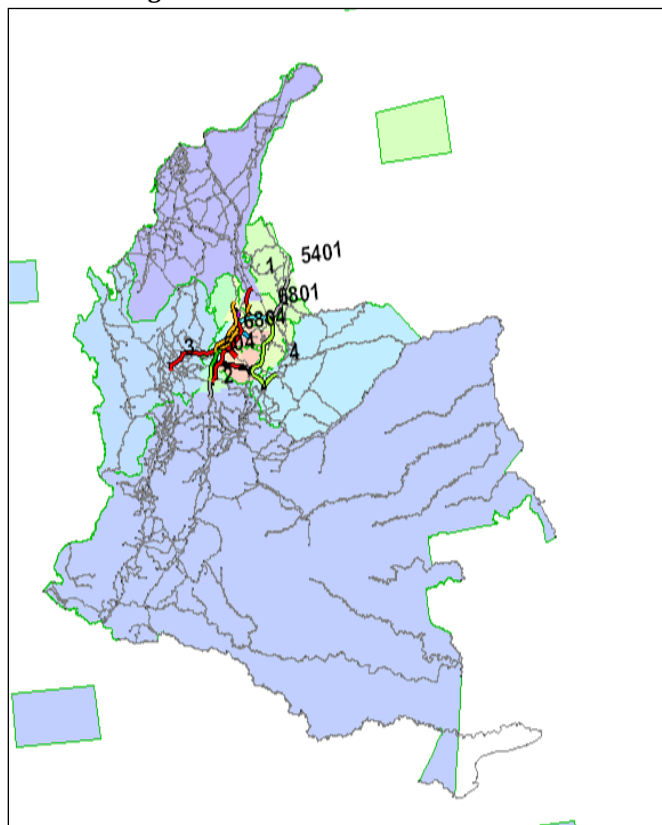
A partir de los criterios de zonificación anteriormente descritos se definieron un total de 18 zonas, de las cuales 6 están sobre el corredor férreo y 12 zonas son externas al corredor. En la Figura 5.1 se muestra la zonificación realizada para todo el país, mientras que en la Figura 5.2 se detalla la zonificación de la zona de influencia del corredor férreo. En la Tabla 5.1 se muestran los códigos y nombres de la zonificación realizada.

Tabla 5.1 Códigos y nombres de zonas

COD_ZONA	NOMBRE_ZONA
1	Zona Caribe
2	Zona Sur de Colombia
3	Zona Choco y Antioquia
4	Zona Arauca, Casanare y Boyacá
502	Zona Yondó
503	Zona Puerto Berrío
504	Zona Puerto Nare
505	Zona Puerto Triunfo
1302	Zona sur de Bolívar
1502	Zona Puerto Boyacá
5401	Zona Norte de Santander y Venezuela
6801	Zona Bucaramanga
6802	Zona Puerto Wilches
6803	Zona Barrancabermeja
6804	Zona Puerto Parra
6805	Zona Cimitarra
6807	Zona San Vicente y Vélez
6808	Zona Simacota

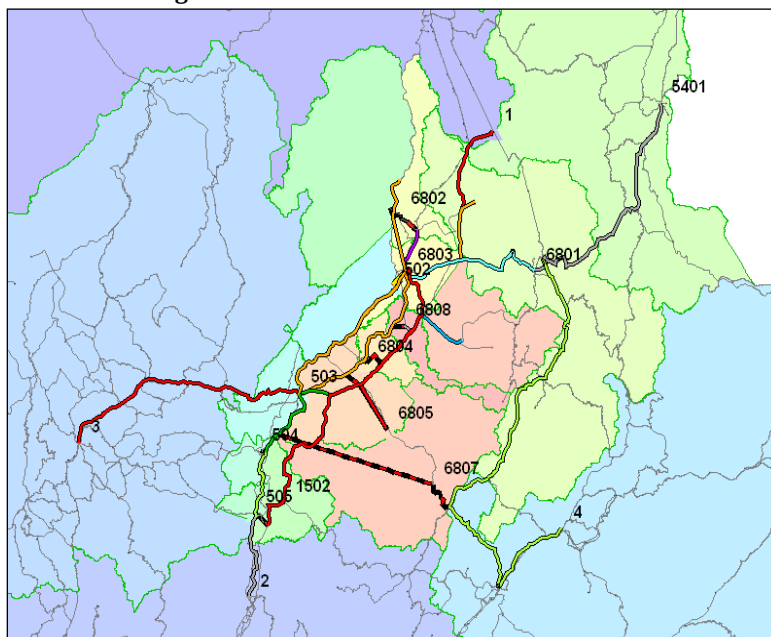
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.1 Zonificación Vista General



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2 Zonificación del corredor férreo



Fuente: Elaboración propia

6 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Obtenida la información, sigue el procesamiento de los datos que inicia con la depuración y posterior expansión para seguidamente continuar con la estimación de modelos.

6.1 Cálculo de factores de expansión

6.1.1 Modo férreo

Siendo $N_{enc}^{r,d}$ el número de encuestas PR realizadas en el recorrido r en autoferro, en el día d , el vector días de estudio es $d=[J, V, S]$ y $P^{r,d}$ el número de pasajeros aforados con el formato AD para cada viaje de recorrido r , en el día d , se define un factor de expansión $FE^{r,d}$ como sigue:

$$FE^{r,d} = \frac{P^{r,d}}{N_{enc}^{r,d}} \quad (6.1)$$

Para la estimación de $P^{r,m}$, se suman la cantidad de pasajeros aforados para un recorrido r definido un día d específico. Igualmente, para la estimación de $N_{enc}^{r,d}$, se suman la cantidad de encuestas en formato PR para un recorrido r definido un día d específico.

Dado que en los tres días correspondientes a la prueba piloto de modo férreo se pudo aforar la totalidad de los viajes ofertados y encuestar aproximadamente al 53% de los pasajeros movilizados, se optó por estimar los factores de expansión para cada recorrido como se especifico anteriormente.

6.1.2 Modo carretero

6.1.2.1 Transporte público

Para cada punto p de recolección de datos, sea $v_{i,j}^{p,d,m(l,n)}$ el número de viajes captados en transporte público con origen i y destino j en el día d , realizado en el tipo de vehículo m por la ruta de servicio con origen l y destino n . Los días de estudio son $d=[J,V,S,D]$ y los tipos de vehículo $m=[T,B,D,V,W]$ para transporte público.

Donde:

Para los días, J: Jueves; V: Viernes; S: Sábado y D: Domingo y para los modos, T: Taxi; B: Bus; D: Buseta y Microbús V: Vans y W: Mixto.

Se ha renombrado Auto (A) en transporte público como Taxi (T) para que no fuera confundido con Auto (A) en transporte particular. Por otro lado, dadas las similitudes encontradas en campo entre los tipos de vehículos Auto (A) y Camioneta (C), de transporte público, se han unido en la categoría T. Por la misma razón, se han unido las categorías Buseta (D) y Microbús (M) en la categoría D.

El número de viajes $v_{i,j}^{p,d,m(l,n)}$ proviene de las encuestas de pasajeros de transporte. Con esto se puede construir la matriz de viajes $v^{p,d,m}$, que representa la muestra obtenida en la recolección de datos y es la base para la expansión.

Siendo $N_{enc}^{p,d,m(l,n)}$ el número de encuestas realizadas en el punto p , en el día d para pasajeros que viajaban en el tipo de vehículo m con ruta de servicio de origen l y destino n y $P^{p,d,m(l,n)}$ el número de pasajeros en el punto p , el día d y vehículo m con ruta de servicio de origen l y destino n , se define un factor de expansión como sigue:

$$FE^{p,d,m(l,n)} = \frac{P^{p,d,m(l,n)}}{N_{enc}^{p,d,m(l,n)}} \quad (6.2)$$

6.1.2.2 Transporte privado

Para cada punto p de recolección de datos, sea $v_{i,j}^{p,d,m}$ el número de viajes captados con origen i y destino j en el día d , realizado en el tipo de vehículo m . Los días de estudio son $d = [J, V, S, D]$ y los tipos de vehículo $m = [A, M]$ para transporte particular.

Donde:

Para los días, J: Jueves; V: Viernes; S: Sábado y D: Domingo y para los modos, A: Auto y M: Moto.

El número de viajes $v_{i,j}^{p,d,m}$ proviene de las encuestas de pasajeros de transporte particular. Con esto se puede construir la matriz de viajes $v^{p,d,m}$, que representa la muestra obtenida en la recolección de datos y es la base para la expansión.

Siendo $N_{enc}^{p,d,m}$ el número de encuestas realizadas en el punto p , en el día d para pasajeros que viajaban en el tipo de vehículo m y $P^{p,d,m}$ el número de pasajeros en el punto p , el día d y vehículo m , se define un factor de expansión como sigue:

$$FE^{p,d,m} = \frac{P^{p,d,m}}{N_{enc}^{p,d,m}} \quad (6.3)$$

6.1.3 Modo fluvial

Sea d los días de estudio, donde $d = \{\text{Jueves, Viernes, Sábado}\}$, p los puertos donde fueron recolectados los datos, siendo $p = \{1, 2\}$ (Barrancabermeja y Puerto Berrío). En cuanto a los pasajeros, se define i como el origen y j el destino de estos, mientras que para las embarcaciones, l será el origen y m el destino.

La cantidad de viajes con origen i y destino j que movilizan en las embarcaciones con origen l y destino m captados el día d , $v_{l,m}^{d,i,j}$, es obtenida mediante las encuestas realizadas en los diferentes puertos y con esta información es posible definir una matriz de viajes $v^{d,p,pto}$ que es la base para realizar la expansión.

Sea $P_{l,m}^{d,p}$ el total de pasajeros que se movilizaron en las embarcaciones con origen l y destino m durante el día d y $E_{l,m}^{d,p}$ la cantidad de pasajeros encuestados que se movilizaban en todas las embarcaciones con origen l y destino m durante el día d . Por lo tanto se define un factor de expansión para cada una de las embarcaciones con origen l y destino m durante el día d de la siguiente manera:

$$FE_{l,m}^{d,p} = \frac{P_{l,m}^{d,p}}{E_{l,m}^{d,p}} \quad (6.4)$$

6.2 Estimación de matrices origen-destino

6.2.1 Modo férreo

Para cada recorrido r en autoferro, sea $v_{i,j}^{r,d}$ el número de viajes captados con origen i y destino j en el día d , realizado en autoferro. La matriz expandida de viajes en el día d para cada recorrido r en autoferro se define de la siguiente manera:

$$V^{r,d} = FE^{r,d} * v^{r,d} \quad (6.4)$$

Para un día laboral L , la matriz de viajes resulta ser el promedio de las matrices de viaje para los días jueves y viernes:

$$V^{r,L} = \frac{\Sigma V^{r,J} + \Sigma V^{r,V}}{2} \quad (6.5)$$

Para un día no laboral N , la matriz de viajes resulta ser la matriz de viaje para el día sábado:

$$V^{r,N} = \Sigma V^{r,S} \quad ()$$

La matriz promedio semanal se estima así:

$$V^{r,PS} = \frac{5V^{r,L} + 2V^{r,N}}{7} \quad (6.6)$$

Y finalmente, la matriz global de viajes V^g para los tres días de prueba se estima con la siguiente expresión:

$$V^g = \Sigma V^{r,J} + \Sigma V^{r,V} + \Sigma V^{r,S} \quad (6.7)$$

Las matrices expandidas para cada uno de los casos mostrados anteriormente se muestran en los anexos digitales en formato Excel ® de este documento.

6.2.2 Modo carretero

6.2.2.1 Transporte público

La matriz expandida de viajes en el día d para el modo m con ruta de servicio de origen l y destino n en el punto p queda entonces como:

$$V^{p,d,m} = FE^{p,d,m(l,n)} * v^{p,d,m(l,n)} \quad (6.8)$$

Para un día laboral L , la matriz de viajes resulta ser el promedio de las matrices de viaje para los días jueves y viernes:

$$V^{p,L,m} = \frac{V^{p,J,m} + V^{p,V,m}}{2} \quad (6.9)$$

La matriz promedio semanal como:

$$V^{p,PS,m} = \frac{5V^{p,L,m} + V^{p,S,m} + V^{p,D,m}}{7} \quad (6.10)$$

Y finalmente, la matriz global de viajes V^g para los tres días de prueba se estima con la siguiente expresión:

$$V^g = \Sigma V^{r,J} + \Sigma V^{r,V} + \Sigma V^{r,S} \quad (6.11)$$

Las matrices expandidas para cada uno de los casos mostrados anteriormente se muestran en los anexos digitales en formato Excel ® de este documento.

6.2.2.2 Transporte particular

Para la estimación de $P^{p,m,d}$, en transporte particular, se calculan las tasas de ocupación promedio por tipo de vehículo (A, como la agregación de Camioneta, Campero y Auto, y M para Moto), en los cuatro días de estudio, y se multiplican por el número de vehículos según vehículo (agregados). La matriz expandida de viajes en el día d para el modo m en el punto p queda entonces como:

$$V^{p,d,m} = FE^{p,d,m} * v^{p,d,m} \quad (6.12)$$

La estimación de las matrices para el día promedio, día laboral y general es idéntica a la descrita en el párrafo de transporte público. Las matrices expandidas para cada uno de los casos mostrados anteriormente se muestran en los anexos digitales en formato Excel ® de este documento.

6.2.3 Modo fluvial

Teniendo el factor de expansión calculado con la anterior ecuación, se puede obtener la matriz expandida de viajes en el día d y en el puerto p , quedando de la siguiente manera:

$$V^{d,p} = FE_{l,m}^{d,p} * v_{l,m}^{d,i,j} \quad (6.1)$$

El día laboral para las matrices de viaje resulta ser el promedio de los viajes obtenidos el día jueves y el día viernes, que resulta ser de la siguiente manera:

$$V^{Laboral,p} = \frac{V^{jueves,p} + V^{viernes,p}}{2} \quad (6.2)$$

Para un día típico de la semana, la matriz de viaje se obtiene así:

$$V^{diatipico,p} = \frac{5V^{laboral,p} + 2V^{sabado,p}}{7} \quad (6.3)$$

En los anexos digitales se encuentran las matrices por día $d = \{Jueves, Viernes, Sábado, Día Laboral, Día Típico\}$.

Las matrices expandidas para cada uno de los casos mostrados anteriormente se muestran en los anexos digitales en formato Excel ® de este documento.

7 MODELACIÓN DEL CORREDOR MULTIMODAL

Para la modelación del corredor multimodal se requirió de la extensa teoría del modelo clásico de transporte de cuatro etapas: generación de viajes, distribución, partición modal y asignación de los viajes a las redes modales respectivas. A continuación se desglosan las formulaciones de cada una de las etapas del modelo al igual que la especificación del mismo para finalizar su desarrollo y estimación.

7.1 Formulación y estimación del modelo de generación y atracción

Con el objeto de estimar la generación y atracción de viajes de las distintas zonas de estudio han sido calibrados modelos como una función de las características socioeconómicas y de la accesibilidad. La construcción de los modelos de generación y/o atracción de viajes se realizó a partir de variables que expliquen los viajes, que fueron cuantificados a partir de la información de campo. La evaluación estadística de los modelos y su consistencia interna ha sido cuidadosamente revisada, a fin de garantizar su confiabilidad y pertinencia.

7.1.1 Especificación del modelo

Para explicar la generación y atracción de viajes se plantean modelos agregados de regresión múltiple (modelos lineales generales, con variables explicativas a nivel de zonas). La experiencia de los consultores e investigadores en estos modelos es satisfactoria, siempre y cuando se empleen rigurosamente los criterios estadísticos de diagnóstico y validación de los modelos (garantizando la no presencia de zonas influyentes a posterior que debiliten la calidad de los resultados de las pronósticos realizadas con los modelos de regresión). Se proponen modelos de regresión con una variable explicativa como es la población⁵ de la zona, que ha resultado significativa y de fácil obtención. Igualmente, se decidió incluir modelos donde se incorpora la variable accesibilidad (Williams H., 1977), cuya estimación ha sido posible a partir de los datos disponibles. Herramientas computacionales estándar han sido suficientes para estimar el modelo.

⁵ Los datos de población de las zonas se obtuvieron del DANE.

7.1.2 Variables

Para poder explicar la generación y atracción de las zonas contempladas en el estudio se tuvo en cuenta variables de tipo socioeconómico de la zona; el detalle de las mismas se explica a continuación:

- **Población:** La población del año 2009, 2015 y 2020 se estimó a partir de la proyección realizada por el Departamento Nacional de Estadísticas, DANE, a través de la historia censal de cada municipio.
- **Accesibilidad:** Existe una forma de representar la accesibilidad de cada una de las zonas a partir de los costos generalizados de viaje. Inicialmente se debe calibrar el modelo de distribución y obtener el parámetro β y la matriz de la función de costo (Williams H., 1977). El “Logsum” de cada zona ha sido asimilado a la accesibilidad.

7.1.3 Estimación del modelo de generación

Se calibraron modelos utilizando el análisis de regresión lineal múltiple, ajustando los parámetros por mínimos cuadrados para evaluar el número de viajes totales generados a partir de la variable “Población” de cada zona. A estos modelos se les realizaron las pruebas estadísticas que permiten evaluar su confiabilidad. En la Tabla 7.1 mostrada a continuación se presenta el modelo estimado:

Tabla 7.1 Modelo de generación de viajes por regresión lineal

	Coefficientes	Estadístico t
Intercepción	0	-
POBLACIÓN	0,003706581	5,46

De la misma manera, la Tabla 7.2 muestra las estadísticas del modelo de regresión estimado:

Tabla 7.2 Estadísticas del modelo de generación con regresión lineal

Descripción	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0,92
Coefficiente de determinación R^2	0,85
R^2 ajustado	0,65
Error típico	137,42
Observaciones	6

Igualmente se calibraron modelos a partir de la variable “Población”, en miles de habitantes, y “accesibilidad” correspondiente a la zona. A estos modelos se les realizaron las pruebas estadísticas que permiten evaluar su confiabilidad. En la Tabla 7.3 mostrada a continuación se presenta el modelo estimado:

Tabla 7.3 Modelo de generación de viajes por regresión lineal con accesibilidad

	Coeficientes	Estadístico t
Intercepción	0	-
POBLACIÓN	3,270602	3,44
ACCESIBILIDAD	0,003079953	0,70

En la Tabla 7.4 se muestran las estadísticas del modelo de regresión estimado:

Tabla 7.4 Estadísticas del modelo de generación con regresión lineal con accesibilidad

Descripción	Valor
Coeficiente de correlación múltiple	0,93
Coeficiente de determinación R^2	0,87
R^2 ajustado	0,58
Error típico	144,89
Observaciones	6

7.1.4 Estimación del modelo de atracción

Se calibraron modelos utilizando el análisis de regresión lineal múltiple, ajustando los parámetros por mínimos cuadrados para evaluar el número de viajes totales atraídos a partir de la variable “Población”, en miles de habitantes, correspondiente a la zona. A estos modelos se les realizaron las pruebas estadísticas que permiten evaluar su confiabilidad. En la Tabla 7.5 mostrada a continuación se presenta el modelo estimado:

Tabla 7.5 Modelo de atracción de viajes por regresión lineal

	Coeficientes	Estadístico t
Intercepción	0	-
POBLACIÓN	3,938629	6,19

De la misma manera se presenta en la Tabla 7.6 mostrada a continuación las estadísticas del modelo de regresión estimado:

Tabla 7.6 Estadísticas del modelo de atracción con regresión lineal

Descripción	Valor
Coeficiente de correlación múltiple	0,94
Coeficiente de determinación R^2	0,88
R^2 ajustado	0,68
Error típico	129,98
Observaciones	6

Igualmente se calibraron modelos utilizando el análisis de regresión lineal múltiple, ajustando los parámetros por mínimos cuadrados para evaluar el número de viajes totales atraídos a partir de la variable “Población” y “Accesibilidad” correspondiente a la zona. A estos modelos se les realizaron las pruebas estadísticas que permiten evaluar su confiabilidad. En la Tabla 7.7 mostrada a continuación se presenta el modelo estimado:

Tabla 7.7 Modelo de atracción de viajes por regresión lineal con accesibilidad

	Coeficientes	Estadístico t
Intercepción	0	-
POBLACIÓN	3,678234	3,98
ACCESIBILIDAD	1,839548	0,43

De la misma manera se presenta en la Tabla 7.8 muestra a continuación las estadísticas del modelo de regresión estimado:

Tabla 7.8 Estadísticas del modelo de atracción con regresión lineal con accesibilidad

Descripción	Valor
Coeficiente de correlación múltiple	0,94
Coeficiente de determinación R^2	0,89
R^2 ajustado	0,61
Error típico	142,04
Observaciones	6

Los resultados, tanto para el análisis de atracciones como generaciones indican que no es significativo el aporte de la variable accesibilidad para el corredor estudiado.

7.1.5 Modelo predictivo

Haciendo uso de los modelos de generación y atracción estimados anteriormente, se procede a calcular los vectores de generación y atracción de viajes para los horizontes de los años 2015 y 2020 en cada una de las zonas internas del corredor. Debe aclararse que

para las zonas externas al corredor se utilizaron factores de crecimiento extrapolando los flujos actuales de viajes en función del crecimiento de la población y la actividad económica en las zonas. En la Tabla 7.9 se muestran las proyecciones para los años 2015 y 2020 estimados a partir de los modelos de generación y atracción estimados para las zonas internas del corredor.

Tabla 7.9 Vectores de generación y atracción proyectados al año 2015 y 2020

ZONA	Población año 2015 ⁶	Población año 2020 ⁷	Accesibilidad año 2015	Accesibilidad año 2020	Viajes generados		Viajes atraídos	
					2015	2020	2015	2020
Puerto Berrío	46.883	51.079	17875,37	17875,37	208	222	203	219
Puerto Wilches	31.511	31.509	18466,51	18466,51	158	159	149	148
Barrancabermeja	191.768	191.144	18489,62	18489,62	686	684	739	736
Puerto Parra	7.548	8.133	18137,68	18137,68	78	80	60	62
Cimitarra	44.733	50.892	18302,02	18302,02	201	222	197	219
Simacota	7.789	7.297	17047,49	17047,49	76	74	59	57

Fuente: Elaboración propia

7.2 Formulación y estimación del modelo de distribución

Dentro del proceso de modelación de la demanda ha sido necesario estimar adicionalmente el número de viajes entre cada par origen – destino, para lo cual se ha calibrado un modelo de distribución.

7.2.1 Especificación del modelo

El modelo planteado está soportado en el enfoque de Maximización de Entropía, utilizando el método de Hyman con balanceos proporcionados por la metodología de Furness.

7.2.2 Estimación de resultados

Aplicada la regresión lineal a la transformada de Berkson Thail sobre los datos agregados de las proporciones de mercado entre pares origen destino, se obtuvo las penalidades

⁶ Proyecciones del DANE

⁷ Proyecciones del DANE

modales δ_{k*} , y el valor del parámetro λ de los costos generalizados (en miles de pesos). Se destaca que en esta regresión lineal se debe tomar un modo como referencia para el cálculo de los cocientes de viajes y las diferencias de costos generalizados, así como hacer uso de variables mudas ya que son varios los modos de transporte estudiados (en el ejemplo práctico: férreo, carretero y fluvial). En resumen, con los datos relativos al corredor multimodal, los valores finalmente encontrados se muestran en la Tabla 7.10.

Tabla 7.10 Valores finales de las penalidades modales δ y el valor del parámetro λ

	Valores
λ	0,3092
$\delta_{\text{férreo}}$	0
$\delta_{\text{carretero}}$	2,70
δ_{fluvial}	1,67

A partir de estos datos se calcularon los costos compuestos entre cada par de zonas utilizando el concepto de “máxima utilidad esperada” (Williams, 1977). Con la matriz de costos compuestos se procedió a calibrar el modelo de distribución de viajes. Realizados los balanceos e iteraciones necesarias establecidas en el método de Hyman. De esta manera se estimó un valor β igual a 0,1498. La consistencia interna del modelo se verifica dado que $\lambda > \beta$.

7.2.3 Modelo predictivo

Luego de realizadas los ajustes y calibraciones del caso para la estimación del parámetro β , se procede a realizar valoraciones de matrices de viaje para los horizontes de los años 2015 y 2020. Considerando que uno de los objetivos de este trabajo es poder evaluar la variación de la demanda y la oferta de transporte férreo mediante la implementación de políticas, se decidió evaluar el cambio en las matrices de viaje si se lograba una mejora en las velocidades de transporte férreo, de manera que se incrementara a 60 km/hr, teniendo en cuenta que las observaciones obtenidas en campo nos arroja una velocidad de operación entre 30 y 35 km/hr. Con el aumento de la velocidad de operación, se obtendrá una notable reducción en los tiempos de viajes del corredor estudiado. En el Anexo 2, se muestra la matriz de viajes actual con sus respectivos parámetros calibrados al igual que la matriz para los horizontes de 2015 y 2020 dado la implementación de políticas en mejora en la velocidad de transporte férreo.

7.3 Formulación y estimación del modelo de elección modal

A continuación se describe el proceso metodológico seguido para la estimación del modelo de elección modal. Inicialmente, ha sido necesario definir la conceptualización del modelo, incluyendo el soporte teórico y las variables involucradas. Una vez lograda esta definición, se diseñó el trabajo de campo, para lo cual se tomó información de Preferencias Declaradas (PD) donde se contrastaron los modos férreo, carretero y fluvial.

7.3.1 Especificación del modelo

El modelo planteado se basa en el uso de datos mixtos PR/PD; su estructura parte de la suposición de dos funciones de utilidad para ambos tipos de datos:

$$U_1 = \theta X_1 + \alpha Y + \varepsilon_1 \quad (7.1)$$

$$U_2 = \theta X_2 + \omega Z + \varepsilon_2 \quad (7.2)$$

En el cual θ es un vector de parámetros a estimar (cuyo valor se supone igual en ambos conjuntos de datos; X_1 y X_2 son vectores de variables observadas comunes para ambos conjuntos de datos, Y y Z son vectores de variables específicas para cada conjunto de datos, α y ω son vectores de parámetros a estimar de las variables específicas, y ε_1 y ε_2 son los errores residuales de las funciones de utilidad.

Se ha supuesto que los errores residuales ε distribuyen Gumbell IID en cada conjunto de con media cero y varianza σ^2 . Como se parte de la hipótesis que las varianzas pueden ser distintas para ambos tipos de datos, nos encontramos con una condición la cual permite estimar un Logit simple.

En este caso, la estimación conjunta se ha realizado siguiente el enfoque de escalamiento, que implica el cálculo de un factor de escala, μ dado por la relación entre las varianzas de cada conjunto de datos (Ben-Akiva & Morikawa, 1990). El factor de escala afecta los datos de preferencias reveladas y se define:

$$\mu^2 = \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_\eta^2} \quad (7.3)$$

Donde μ es un parámetro de escala, a estimar, σ_ε^2 y σ_η^2 son las varianzas de las utilidades de PR y PD, respectivamente.

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \mu^2 \sigma_{\eta}^2 \quad (7.4)$$

7.3.2 Metodología planteada

Con la información tomada del trabajo de campo, se procedió a estimar modelos de partición modal. Los datos recogidos permiten obtener información de los modos disponibles por los individuos, de sus características socioeconómicas, de los atributos de las alternativas y de las características del viaje. Los atributos de las alternativas fueron definidos como sigue:

- Tiempo de viaje. Es el tiempo (min) mientras el modo de transporte está en movimiento
- Costo. Es el costo (miles de pesos colombianos) del viaje.
- Frecuencia. Se definió como el tiempo (min) entre las salidas de dos vehículos consecutivos.

A partir de los datos se evaluaron distintos modelos, con distintas características en la definición de la matriz de covarianza, y en la forma funcional de la función de utilidad. Cada uno de los modelos es escrutado en correspondencia con criterios estadísticos y de consistencia microeconómica para finalmente escoger los que serán utilizados en la modalidad predictiva.

7.3.3 Estimación y desarrollo de modelos

El modelo de demanda planteado se basa en el uso de datos mixtos PR/PD. En este caso, la estimación conjunta se ha realizado siguiendo el enfoque de escalamiento (Ben-Akiva & Morikawa, 1990). El factor de escala afecta los datos de preferencias reveladas.

La función de utilidad modal fue definida en términos de los principales atributos del nivel de servicio así como también de las características socioeconómicas de los individuos. Se lograron estimar algunas utilidades marginales de interacciones entre las variables socio económicas y atributos inherentes al nivel de servicio (Espino, Román, & Ortúzar, 2006). Se incluye la interacción de la variable “*qpagau*” (variable muda que vale 1 si la persona encuestada paga su pasaje, 0 en otro caso) con la variable costo de viaje; también fue posible analizar la variable socioeconómica “*Motet*” (variable muda que toma el valor de 1 si el motivo de viaje es trabajo, 0 en otro caso). Además de las variables ya nombradas, la utilidad para las alternativas expuestas en el experimento de PD (una nueva ruta mejorada en modo férreo, modo carretero y modo fluvial) es especificada como una función de los

atributos incluidos en el experimento de elección: costo de pasaje, tiempo de viaje y frecuencia de viaje.

Fueron estimados modelos tipo logit multinomial y logit mixto (cuyos parámetros aleatorios corresponden a el tiempo de viaje y frecuencia de despacho), no obstante, también fueron consideradas varias especificaciones incluyendo modelos logit jerárquico que no fueron incluidos en el reporte final por no resultar significativos.

La estimación de los modelos se muestra en la Tabla 7.11, donde se definieron los modos férreo, carretero y fluvial como 1, 2 y 3, respectivamente. Puede notarse que se fijó en cero (0) la constante modal correspondiente a modo fluvial. En los modelos MNL_1, MNL_2 y MNL_3 se estimaron parámetros específicos para el tiempo de viaje (minutos) , considerando que puede haber percepciones diferentes referidas a viajar en cada uno de ellos; entretanto, en el modelo Logit Mixto ML_1, el parámetro correspondiente al tiempo de viaje y frecuencia de despacho (minutos) se consideraron aleatorio. El MNL_4 contempla la estimación de un modelo con las variables básicas de servicio (costo, tiempo y frecuencia), dicho modelo cuenta con la verosimilitud más elevada con respecto a los demás modelos. En general para todos los modelos, los test t son significativos a un nivel de confianza del 95%, excepto la variable “*Motet*” en el MNL_3.

La variación sistemática del parámetro del costo (miles de pesos) respecto de quién paga, muestra que cuando es el individuo quién paga es mayor el decrecimiento en la marginal del costo respecto de cuando lo hace la empresa o un tercero. Se aprecia, por otra parte, que es mayor el decrecimiento en la marginal del tiempo para el viaje en el modo fluvial y menor en el caso de los buses.

Es claro que el modelo que presenta mejor ajuste es el Logit Mixto de variaciones aleatorias, evidenciando variaciones significativas en los gustos. Se destaca que en el 18% de los casos el parámetro del tiempo es positivo, lo cual se puede interpretar como que se trata de personas que disfrutan de viajar, hecho sobre el cual existen evidencias (Mokhtarian & Salomon, 2001), especialmente en viajes interurbanos no obligados; es interesante notar que el 15% de los encuestados se desplazaba por motivos relacionados con ocio y turismo.

Tabla 7.11 Estimación de resultados

Parámetro	MNL_1	MNL_2	MNL_3	MNL_4	ML_1
ASC1	-3,95 (-2,48)	-3,68 (-2,36)	-3,79 (-2,39)	0,319 (+0,44)	-1,99 (-1,55)
ASC2	-5,8 (-3,65)	-5,53 (-3,55)	-5,63 (-3,56)	-1,43 (-2,41)	-5,21 (-4,41)
ASC3	0 -	0 -	0 -	0 -	0 -
Costo (c) (1,2,3)	-0,418 (-4,00)	-0,417 (-3,99)	-0,316 (-3,24)	-0,545 (-4,63)	-0,545 (-9,80)
Tiempo (t) (1,2,3)	- -	- -	- -	-0,0416 (-5,85)	-0,0583 (-9,05)
Tiempo (t) (1)	-0,0337 (-4,49)	-0,0336 (-4,48)	-0,034 (-4,48)	- -	- -
Tiempo (t) (2)	-0,023 (-4,13)	-0,0229 (-4,13)	-0,0232 (-4,13)	- -	- -
Tiempo (t) (3)	-0,0656 (-4,78)	-0,0659 (-4,77)	-0,0663 (-4,74)	- -	- -
Frecuencia (f) (1,2,3)	-0,0132 (-4,38)	-0,0132 (-4,37)	-0,0132 (-4,32)	-0,021 (-6,08)	-0,0299 (-6,56)
Motet (3)	- -	0,689 (+2,32)	0,43 (+1,45)	- -	- -
Costo (qpagau) (1,2,3)	- -	- -	-0,135 (-1,97)	- -	- -
μ	0,591 (2,90)	0,594 (2,86)	0,583 (2,98)	0,456 (5,60)	0,345 (3,55)
σ (Tiempo)	- -	- -	- -	- -	0,0634 (9,98)
σ (Frecuencia)	- -	- -	- -	- -	0,0433 (10,10)
ρ^2	0,118	0,12	0,12	0,115	0,307
$l(0)$	-1752,3	-1752,3	-1752,3	-1752,3	-1752,3
$l(\theta)$	-1535,8	-1531,9	-1529,3	-1550,7	-1214,8
Observaciones	2070	2070	2070	2070	2070

7.3.4 Valoración de atributos

Los modelos permiten estimar las disposiciones a pagar (DP) por mejoras marginales en los atributos. De especial interés es la estimación del valor subjetivo del tiempo (VST), dado

por la tasa marginal de sustitución entre el tiempo y el costo. La Tabla 7.12 presenta los VST medidos para el corredor multimodal de características interurbanas de baja demanda. En general, los VST son más bajos cuando la persona que viaja es la misma que percibe el costo del boleto. Dado que fue posible obtener parámetros específicos del tiempo para cada modo, se estimaron VST según el modo, observándose que los viajeros en modo fluvial tenían la mayor valoración del tiempo y los viajeros por carretera cuentan con las valoraciones más bajas. Esta última tendencia puede deberse a que los servicios prestados en este modo y su actual infraestructura no se encuentra en condiciones favorables.

Tabla 7.12 Mediciones de VST

	Modo férreo	Modo carretero	Modo fluvial
VST (COL\$/min)*	81,8	55,8	159,4
VST cuando paga el usuario	75,4	51,4	147,0
VST cuando paga otra persona	107,6	73,4	209,8

*1US\$=2000COL\$

La disposición al pago por mejoras en la frecuencia de despacho, entendida como la cantidad que están dispuestos los usuarios a pagar por disminuir en un minuto el intervalo entre vehículos se presenta es de COL\$=29 cuando paga el individuo y de COL\$=41 cuando paga un tercero o la empresa. Puede explicarse que estos valores resulten menores que los del tiempo de viaje considerando que los individuos, conocedores de los horarios de despacho, viajan a las terminales en la hora de su conveniencia; por tanto, diferente al caso urbano, generalmente no hay un tiempo de espera importante asociado con las frecuencias.

7.3.5 Análisis de elasticidades

Para evaluar medidas de política a tomar en el corredor, se analizaron elasticidades de la demanda para los distintos modos respecto del costo, el tiempo y la frecuencia. Los valores se presentan en la Tabla 7.13. Destaca que la demanda del modo fluvial es altamente sensible al costo del ticket y al tiempo de viaje. Para los tres modos estudiados, la frecuencia de despacho es el atributo que menos afecta.

Tabla 7.13 Estimaciones de elasticidades

Elasticidad/Modo	Férreo	Carretero	Fluvial
Costo	-0.595	-0.699	-0.990
Tiempo	-0.507	-0.282	-0.760
Frecuencia	-0.370	-0.194	-0.263

7.3.6 Análisis de políticas sobre el corredor

Es posible realizar predicciones de demanda a partir de la implementación de políticas que consideren reducciones y/o incrementos de algunos de los atributos de las alternativas. Las

políticas contempladas consideran aumentos en las tarifas, reducciones en los tiempos de viaje y aumento en las frecuencias de despacho (reducción de tiempos entre las salidas de modos). La respuesta de la demanda ante los posibles cambios hechos mediante políticas se evalúan como cambio porcentual en la partición modal agregada de la alternativa j con respecto a la situación inicial:

$$\Delta P_j = \frac{P_j^1 - P_j^0}{P_j^0} * 100 \quad (7.5)$$

Donde: ΔP_j (%) corresponde al porcentaje de cambio en la partición de mercado para el modo j con respecto a la situación inicial; P_j^0 es la partición de mercado inicial para el modo j ; P_j^1 es la partición de mercado para el modo j después de implementada la política.

La Tabla 7.14, Tabla 7.15 y Tabla 7.16 muestra las predicciones utilizando el modelo MNL3 después de aplicadas las políticas de incremento y reducción en el costo del boleto, tiempo de viaje y la frecuencia de despacho. El primer caso que se consideró (1) corresponde a la aplicación de cambios sobre el modo férreo; el segundo caso (2), corresponde a la aplicación de cambios sobre el modo carretero y finalmente el caso (3) en el cual se considera al modo fluvial.

Tabla 7.14 Predicciones para el 20% de incremento en el costo del boleto

Política/Modos	Férreo	Carretero	Fluvial
$\Delta P(\%)$ (1)	-19,5%	21,4%	5,2%
$\Delta P(\%)$ (2)	17,3%	-27,9%	27,0%
$\Delta P(\%)$ (3)	3,3%	7,9%	-41,8%

Tabla 7.15 Predicciones para el 20% de reducción en el tiempo de viaje

Política/Modos	Férreo	Carretero	Fluvial
$\Delta P(\%)$ (1)	-16,4%	18,2%	3,8%
$\Delta P(\%)$ (2)	7,7%	-12,4%	11,9%
$\Delta P(\%)$ (3)	2,4%	6,0%	-31,6%

Tabla 7.16 Predicciones para el 20% de incremento en la frecuencia de despacho

Política/Modos	Férreo	Carretero	Fluvial
$\Delta P(\%)$ (1)	-13,6%	13,4%	9,0%
$\Delta P(\%)$ (2)	5,7%	-8,9%	7,7%
$\Delta P(\%)$ (3)	1,3%	2,1%	-12,9%

Dado que uno de los objetivos del estudio es poder realizar mejoras de nivel de servicio del modo férreo, es evidente que las ganancias en la partición de mercado para el modo férreo (17,3%) ocurren cuando se incrementa en 20% en el costo del boleto en modo carretero. Puede notarse que el modo fluvial es muy sensible a las políticas de incremento en el costo del boleto y al tiempo de viaje, lo cual se explica porque en gran parte del corredor es el único modo por el cual algunas comunidades tienen accesibilidad.

7.3.7 Modelo predictivo

Del modelo de distribución se ha estimado una matriz actual de viajes amodal con la cual, aplicando el modelo de elección modal, es posible hallar matrices de viaje por modo. Para poder realizar estimaciones de matrices modales para los horizontes de los años 2015 y 2020, al utilizar modelo de elección discreta se consideró un escenario caracterizado por mejoras en los tiempos de viajes en el modo férreo que durante el desarrollo del modelo de distribución también se realizaron, es decir, se contempló la posibilidad de que el modo férreo a futuro tendrá cambios en el nivel de servicio incrementando la velocidad de operación promedio a 60 km/hr. Para estimar las matrices modales en el año base se estiman las probabilidades de elección de modo dadas las preferencias y percepciones de los usuarios obtenidas durante la aplicación de los instrumentos a nivel zonal para el corredor. En el Anexo 3 se muestran las matrices modales para el año base y los horizontes de 2015 y 2020.

Con el objeto de apreciar en mejor forma la evolución de la demanda, en la Tabla 7.17 y en la Tabla 7.18 se presenta la evolución por año en cantidad de pasajeros y en porcentaje (partición modal). De los resultados presentados se puede inferir que para la situación actual y las proyecciones el modo fluvial es el que tiene la mayor participación, destacándose que variaciones en los niveles de servicio en los demás modos no afectan de manera significativa la participación de este modo. De hecho, puede notarse que en el caso de que a futuro el modo férreo mejore sus condiciones de operación, logrando reducciones en los tiempos de viaje, se impactará principalmente al modo carretero.

Tabla 7.17 Evolución de la demanda por año

	Año 2009	Año 2015	Año 2020
Férreo	424	687	715
Carretero	679	560	562
Fluvial	256	160	164
Total	1359	1407	1441

Tabla 7.18 Partición modal por año

	Año 2009	Año 2015	Año 2020
Férreo	28%	49%	50%
Carretero	55%	40%	39%
Fluvial	17%	11%	11%
Total	100%	100%	100%

7.4 Formulación y estimación del modelo de asignación

Dada la caracterización y cuantificación de la demanda en el corredor estudiado, sigue la confrontación con la oferta mediante asignación de los flujos a la red multimodal, a fin de establecer la utilización de los arcos y los servicios de transporte.

7.4.1 Especificación del modelo

A través de este enfoque se propone utilizar un modelo de asignación de equilibrio de usuario estocástico. Estructuralmente parte de la elaboración de modelos de equilibrio en los que los costos de viaje son la suma de una parte fija mas una componente aleatoria, es decir los usuarios eligen una u otra ruta dependiendo de la distribución de probabilidad de los costos aleatorios (Verástegui, 2006), teniendo en cuenta que los individuos tienen percepciones diferentes del costo del viaje de un determinado trayecto. El resultado es que se usan múltiples rutas con desiguales costos para satisfacer las necesidades de transporte entre ciertos pares origen-destino.

Esta metodología de equilibrio estocástico asume que los usuarios del sistema no tienen un conocimiento exacto del tiempo de viaje ni una percepción uniforme de su costo, motivo por el que no siempre coinciden el camino óptimo y el camino escogido para desarrollar un desplazamiento, existiendo múltiples relaciones O/D que son utilizadas por los usuarios.

$$C_g = \sum \gamma_1 * C_a + V_t * \left\{ \sum \gamma_2 * T_t + \sum \left(\gamma_3 * T_e + \gamma_4 * T_p + \gamma_5 * T * \left(1 + \alpha * \left(\frac{V}{C} \right)^\beta \right) \right) \right\} \quad (7.6)$$

Donde:

Cg: Costo generalizado para desarrollar un desplazamiento

Ca: Tarifa de acceso a la ruta

γ_1 : Peso o ponderación de la tarifa

Vt: Valor monetario del tiempo

γ_2 : Peso o ponderación del tiempo del trasbordo

Tt: Tiempo de trasbordo

γ_3 : Peso o ponderación del tiempo de espera

Te: Tiempo de espera

γ_4 : Peso o ponderación del tiempo de acceso por parada

Tp: Tiempo asociado a cada parada en función de la gente que suba

γ_5 : Peso o ponderación del tiempo del viaje en vehículo

T : Tiempo del recorrido en vehículo, incluye el tiempo de acceso multiplicado por su factor de peso

V : Volumen asignado de viajes a cada ruta

C : Capacidad de cada ruta

α, β : Parámetros de la función de costo BPR para la razón volumen asignado / capacidad.

7.4.2 Metodología planteada

A partir de la información tomada del trabajo de campo por medio de las PR, se procedió a definir los modos disponibles en el corredor intermodal en el cual es prestado por empresas de servicio férreo, carretero y fluvial, las cuales sirven las rutas entre diferentes orígenes y destinos que para efectos de este estudio fueron agrupados en tres modos descritos a continuación:

(1) $T1$: Transporte férreo

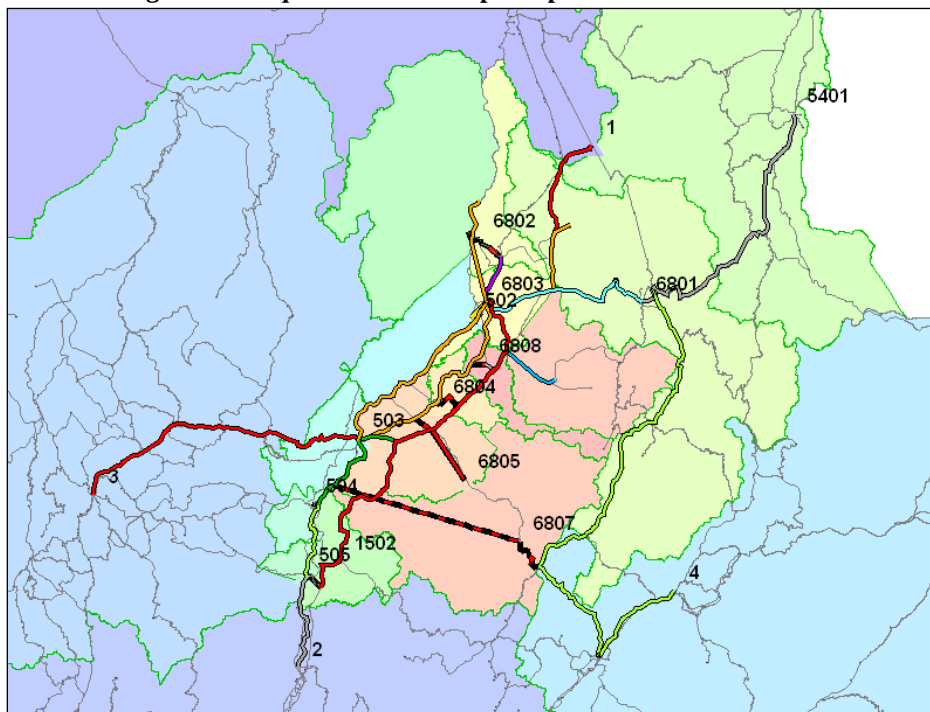
(2) $B1$: Transporte carretero

(3) $F1$: Transporte fluvial

Ha sido necesario definir una red de transporte, para lo cual se identificaron primeramente los criterios de zonificación, las codificaciones y nomenclaturas de las zonas, las cuales se mantienen tal como fueron establecidas en este documento, en total son 18 zonas de las cuales 6 son zonas internas y 12 zonas externas.

La red que representa la infraestructura de transporte fue trazada sobre un archivo geográfico que contiene además atributos como las longitudes, velocidades, tiempos de recorrido, entre otros. En la Figura 7.1 se presenta el esquema de la red de infraestructura de transporte utilizada en el estudio.

Figura 7.1 Esquema de las vías principales del área de estudio



Sobre la red que representa la infraestructura se creó la red de los servicios de transporte. Es así como se crearon líneas de transporte para los servicios en cada modo, considerando los orígenes y destinos servidos por las empresas que los prestan. Las rutas establecidas dentro de la red son codificadas utilizando los nodos y arcos que indican los caminos permitidos para viajar de un origen a un destino, indicando en cuales se permite abordar y descender. Los enlaces en la red de transporte intermodal representan los segmentos reales entre dos paradas consecutivas, y los segmentos de la capa vial o de infraestructura subyacente proporcionan conectividad a la red desde los conectores de los centroides hasta los arcos que dan acceso a cada sitio de parada o trasbordo.

La asignación de cada uno de atributos principales sobre la red de transporte entre modos provienen directamente sobre el sistema de rutas, mediante su enlace con la tabla de rutas, sobre la cual se establecen atributos como la capacidad, la frecuencia, el tiempo de viaje, la tarifa y los ponderadores de cada ruta, aunque algunos atributos secundarios provienen de la capa que representa la red vial.

Durante la creación de la red, cada segmento de ruta, entendido como el segmento entre dos paradas consecutivas de la misma ruta, se convertirá en un enlace direccional y por tal razón el sistema de rutas por sí mismo contiene la información de los sentidos de circulación. Siempre que fue posible, los centroides se ubicaron sobre la red vial; en los casos tal que la topología no lo facilitara, eran enlazados por medio de conectores. Los

arcos conectores solo permitían “caminatas” desde un centroide hacia un paradero. A los arcos “caminata” no se les asignó tarifa, sólo los tiempos de accesibilidad. Los “paraderos” se ubicaron al comienzo y final de cada ruta, en sitios de abordaje y descenso, y en los sitios donde se permite transbordo dentro de un modo o con otro modo. La topología de la red permite que a una zona se pueda acceder por uno o más paraderos.

7.4.3 Configuración de la red de transporte

Considerando el contexto de la zona de estudio, el modelo de equilibrio estocástico fue escogido debido a las ventajas que presenta sobre otros modelos disponibles en la herramienta de modelación. Esta aproximación permite considerar diferencias en percepciones, más aún considerando las diferencias entre los modos; otros algoritmos, como rutas mínimas o itinerarios óptimos en el contexto de un corredor como el analizado normalmente conllevan a asignación del tipo “todo o nada”. A continuación se presentan los parámetros generales que incluye el método seleccionado:

- Los atributos de la capa que contiene el sistema de rutas, tales como: intervalos, penalidades por transferencias y tiempos de permanencia en las paradas.
- Valores límite para atributos como el número de transferencias, máximos y mínimos tiempos de espera, costo total de viaje, tiempo máximo de transferencias, tiempos máximos de acceso y egreso y el tiempo máximo de viaje.
- Ponderadores de los tiempos de espera, tiempos de viaje, tiempos de permanencia, tiempos de caminata y tiempos de transferencia.
- Información de la estructura tarifaria.
- Información específica de cada modo⁸.
- Información de las transferencias entre modos.

Específicamente, el método de modelación seleccionado brinda distintas posibilidades de configuración, que facilitan las tareas de calibración del modelo, tales como: configuración general, por modo, tarifaria, ponderadores y otras.

7.4.4 Configuración general

El método utilizado permite definir los parámetros generales de la red de transporte, tal como se muestra a continuación.

⁸ Los modos considerados son: T1, B1, F1 y el modo “caminata” (W).

Tabla 7.19 Parámetros de la red de transporte

Parámetro	Descripción
Tiempo del arco	El tiempo de recorrido asociado a la red vial subyacente
Tiempo por modo	Cada modo puede tener definido su propio tiempo de viaje
Máximo costo de viaje	Previene caminos no razonables al establecer un valor máximo permitido en términos del costo generalizado
Máximo número de transferencias	Previene caminos no razonables al limitar las transferencias en la realización de un viaje
Valor del tiempo	Es usado como un factor de conversión para la función de costo generalizado
Centroides	Se definen los centroides zonales
Viajes a pie	Se indica si son permitidos o no los viajes exclusivamente a pie
Accesos por paradas	Se restringe el acceso a las rutas de transporte público sólo a través de las paradas
Máximo número de caminos a pie	Restringe el número de caminos considerados para la caminata desde el centroide

Fuente: Manual TransCad ®

7.4.5 Configuración de modos

El método de "Equilibrio Estocástico" para la configuración de cada modo requiere los parámetros indicados en la Tabla 7.20:

Tabla 7.20 Parámetros asociados a los modos.

Parámetro	Descripción
Modo de la ruta	Especifica, para cada ruta del sistema, el modo correspondiente
Modo usado	Activa o desactiva el modo o los modos a usar, dependiendo del escenario de modelación
Velocidad	Establece la velocidad de cada modo de transporte
Acceso	Activa o desactiva los accesos por caminata a un modo determinado
Egreso	Activa o desactiva los egresos por caminata en un modo determinado
Prohibición de transferencias	Se puede especificar los modos entre los cuales se prohíben las transferencias
Penalización	Tiempo considerado para cada transferencia
Tarifa	Valor a pagar por cada transferencia
Transferencias en el mismo modo	Se puede activar o desactivar la opción de permitir transferencias sólo en un mismo modo de transporte

Fuente: Manual TransCad ®

7.4.6 Configuración de políticas tarifarias y de transferencias

Aunque el programa utilizado, TRANSCAD®, brinda la posibilidad de elegir entre distintos tipos de tarifas, el sistema de transporte que presenta en el corredor intermodal se ajusta a un sistema tarifario zonal para cada tipo de servicio, ya que la tarifa en los modos estudiados depende directamente de la distancia recorrida. Por ello, se definieron matrices de costos entre zonas.

7.4.7 Configuración de ponderadores de la función de costo generalizado

El uso de ponderadores en el método de "Equilibrio Estocástico" permite incorporar en el modelo diferentes valoraciones de los componentes de costo. Estos factores de ponderación pueden tomar virtualmente cualquier valor, aunque por costumbre se toma un ponderador igual a 1 como referencia.

Tabla 7.21 Componentes del costo generalizado

Parámetro	Descripción
Tarifa	Define el ponderador a aplicar a las tarifas
Tiempo sobre el arco	Define el ponderador a aplicar al tiempo de viaje sobre los arcos
Penalización por transferencia	Define el ponderador a aplicar a los tiempos de transferencia
Tiempo de espera inicial	Define el ponderador a aplicar al tiempo de espera cuando se espera la ruta inicial
Tiempo de espera en transferencias	Define el ponderador a aplicar a el tiempo de espera en las rutas por transferencias
Tiempo en paraderos	Define el ponderador a aplicar al tiempo que tardan los pasajeros dentro del vehículo en los paraderos
Tiempo de caminata	Define el ponderador a aplicar a los tiempo de caminata
Parámetro inter-arribo	Define la forma de calcular el tiempo de espera en función de las frecuencias de las rutas

Fuente: Manual de TransCad

El ajuste y configuración de estos ponderadores por ruta o por modo son claves en el proceso de calibración de la red de transporte. Incluso, de ser necesario, en el proceso de calibración puede ajustarse el valor del tiempo inicialmente considerado. En este caso, la calibración se llevó a cabo ajustando por tanteo los distintos componentes de la función de costo generalizado y los flujos, teniendo en consideración la información conocida que se obtuvo de las encuestas realizadas. Para la prueba, se examinaba que el sistema funcionara correctamente en cuanto a la conectividad de las zonas y a la obtención de rutas razonables entre un número significativo de pares origen destino, confrontando los resultados del modelo con la información proveniente de conteos de ascenso - descenso y de encuestas a bordo de los vehículos.

Dentro del proceso de modelación de asignación se utilizaron dos enfoques, el primero se abordó una modelación conjunta, es decir, todas las redes (red férrea, carretas y fluviales) en la misma capa, resolviendo simultáneamente el problema de elección modal y asignación mientras que en el segundo enfoque se abordan los problemas de manera independiente, es decir, se modelan las redes de cada modo separadamente, para lo cual previamente se calculan matrices modales utilizando modelos de elección discreta y seguidamente se realiza la asignación a cada red en forma independiente. Este último enfoque es el teóricamente más adecuado, pero puede resultar complejo

7.4.8 Primer enfoque: Modelación conjunta de red multimodal

El primer enfoque de modelación del involucra una red multimodal, resolviendo conjuntamente los problemas de elección modal y asignación. En este caso se parte de una matriz de viajes amodal obtenida de la modelación de la demanda y posteriormente los usuarios se asignan a la red en atención a los niveles de servicio de los arcos. Los resultados del proceso de asignación a la red de transporte público permiten establecer:

- Una matriz con indicación de los pares OD que utilizan parte de una determinada ruta.
- Datos de pasajeros totales en cada corredor de transporte.
- Matrices de costos para cada uno de los componentes de la función de costo generalizado y el costo ponderado total.
- Tablas con movimientos y transferencias.
- Flujos sobre los arcos de la red subyacente al sistema de rutas.

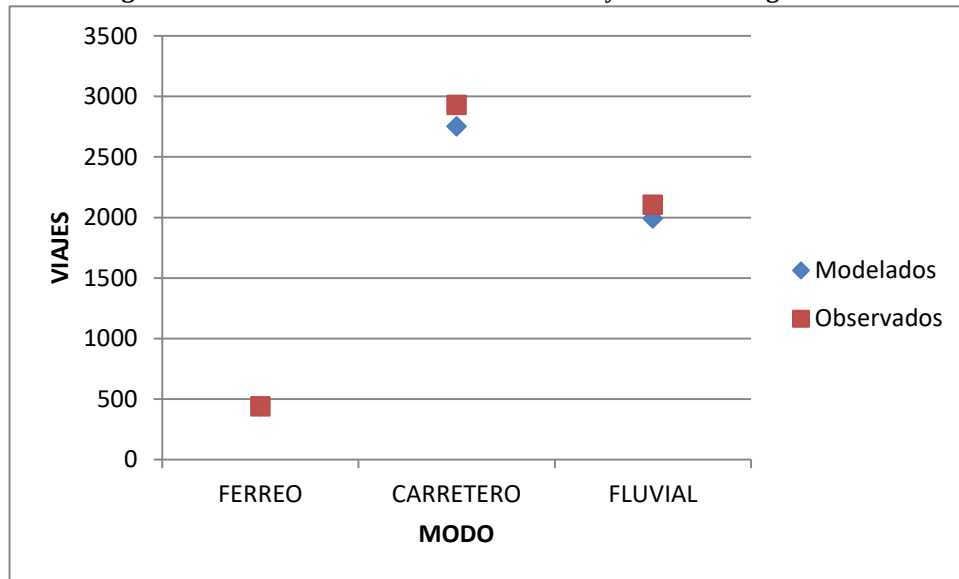
Calibrada la red del corredor multimodal a partir de la situación base, se obtuvieron los flujos en la red. En la Tabla 7.22 se presenta los flujos observados, los flujos globales modelados y la diferencia porcentual entre la medición observada y la modelada. Según estos datos las proporciones de mercado obtenidas del modelo de asignación son muy similares a las observadas.

Tabla 7.22 Flujos estimados y observados según modo

Modo	Modelados	Observados	Diferencia (%)
Férreo	439	440	0%
Carretero	2753	2930	-6%
Fluvial	1991	2105	-5%

La Figura 7.2 muestra la distribución global de los datos modelados y estimados, notando que se presentan diferencias poco significativas.

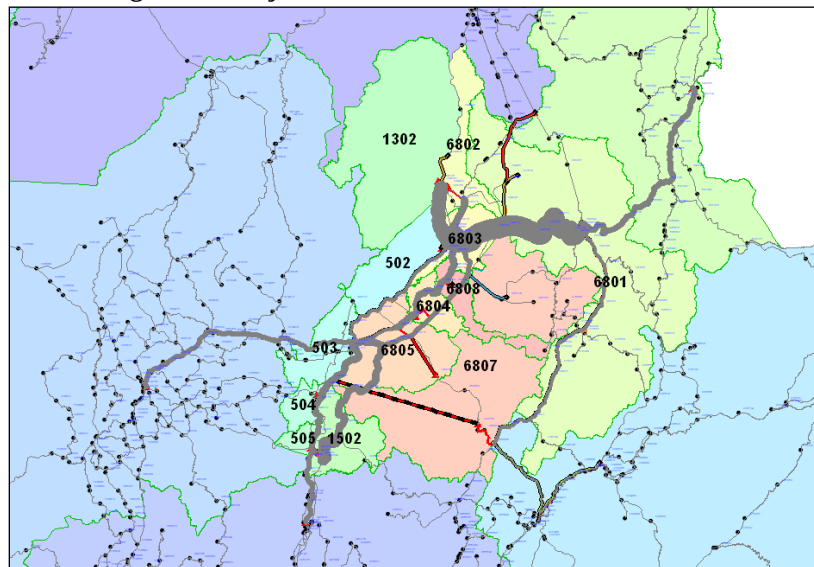
Figura 7.2 Distribución de datos observados y estimados según modo



La calibración se realizó modificando los parámetros que se describieron en la explicación del método, destacando la relevancia del “*link time*” que representa la percepción del tiempo en el modo. Se ajustó para el modo férreo un valor 1,0 es el modo férreo y de 1,4 para los modos carretero y fluvial. Fue igualmente necesario realizar calibraciones para cada una de las rutas o servicios de transporte.

La Figura 7.3 muestra en forma grafica los flujos en las zonas que intervienen en el corredor intermodal, representando el flujo con el grosor de las líneas.

Figura 7.3 Flujos en las zonas del corredor multimodal



Los costos generalizados ponderados de todas las zonas y específicamente de las zonas internas se presentan en la Tabla 7.23 en la cual se puede observar que la ponderación de los costos generalizados son mayores cuando se analizan todas las zonas del corredor comparadas con las zonas internas estudiadas, dicha afirmación es muy valedera si se tiene en cuenta que los viajes entre las zonas internas son relativamente cortos y que se encuentran presentes las tres alternativas para los viajes.

Tabla 7.23 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Intermodal base)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	62,126
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	31,277

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7.24 muestra los valores máximos y mínimos de costos generalizados, tarifas y tiempos de espera, de transferencia y de viaje.

Tabla 7.24 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Intermodal Base)

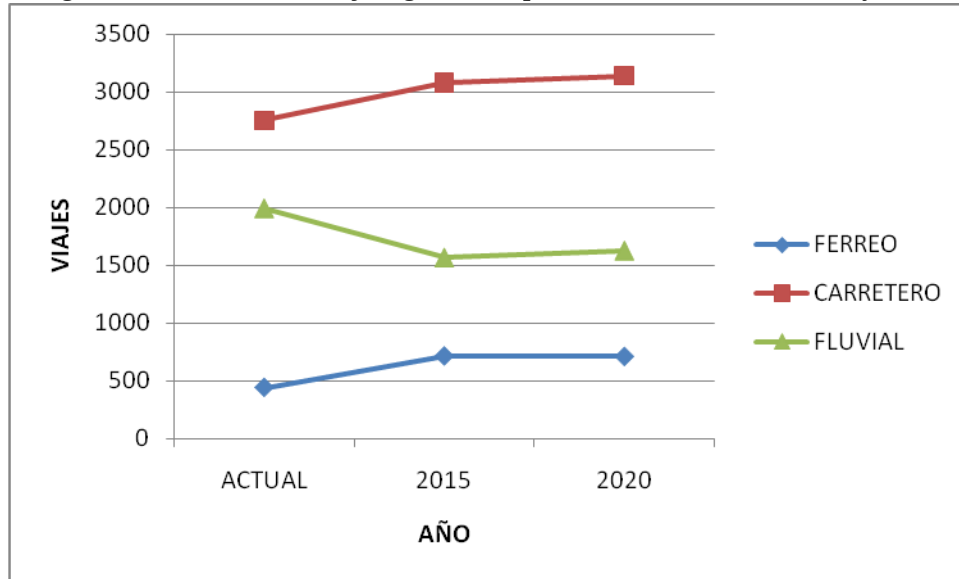
	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	284,0075	0,776509
Tarifa (miles de pesos)	104	0
Tiempo en vehículo (min)	735,3365	16,9299
Tiempo de espera inicial (min)	178,0392	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	580,0685	0
Tiempo de viaje en transporte público (min)	716,8406	16,75649

Fuente: Elaboración propia

Una vez calibrada la situación actual se procedió a estimar los flujos para los años 2015 y 2020 utilizando una matriz de demanda amodal obtenida del modelo de distribución. Para las proyecciones a los horizontes de los años 2015 y 2020 se planteó el escenario en el cual la velocidad en el modo férreo aumentaba a 60 km/hr, mientras que los modos fluvial y carretero conservaron las características actuales.

En la Figura 7.4 se muestra la variación de flujo para la situación actual y las proyecciones para los horizontes de 2015 y 2020. Allí puede notarse los cambios en las proporciones de mercado.

Figura 7.4 Variación del flujo según modo para la situación actual, 2015 y 2020



En la Figura 7.5 y Figura 7.6 se aprecian los flujos de manera gráfica de los años proyectados para el escenario de modelación planteado. Es evidente que sobre el corredor correspondiente al modo férreo hay un gran aumento de viajes dado las mejoras planteadas en el nivel de servicio de este modo.

Figura 7.5 Flujos para primer escenario en el año 2015

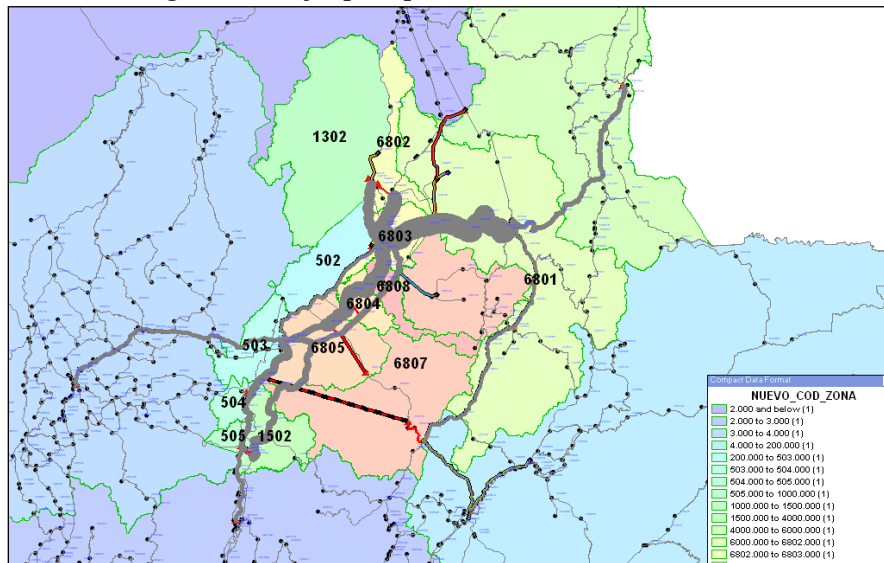
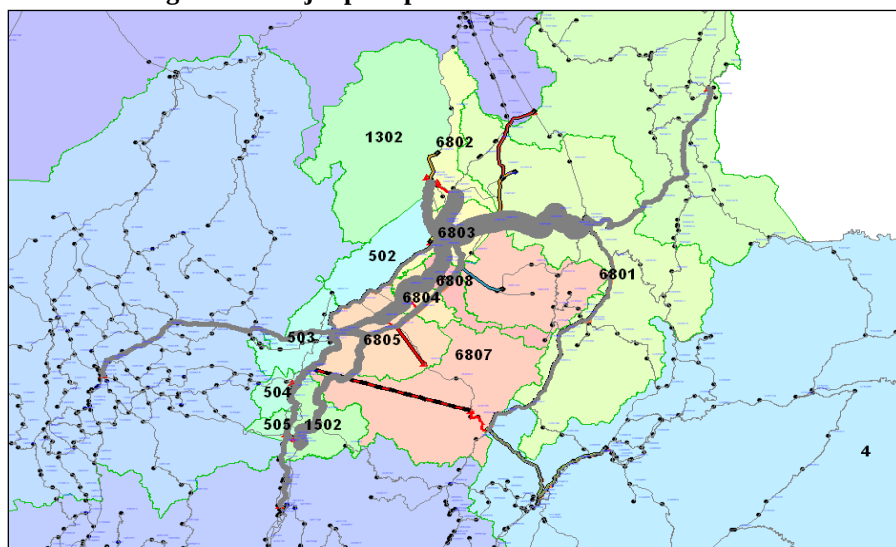


Figura 7.6 Flujos para primer escenario en el año 2020.



En las Tabla 7.25 y Tabla 7.26 se aprecia la ponderación de los costos generalizados para los años 2015 y 2020 respectivamente, estos valores son similares a los observado en el año base, una causa que explica esta proporción es la interacción de los viajes entre modos y las características de estos, el aumento de la demanda es compensada con la disminución en los tiempos de viaje por el aumento de la velocidad al modo férreo.

Tabla 7.25 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Intermodal 2015)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	62,128
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	29,797

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.26 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Intermodal 2020)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	62,240
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	29,504

Fuente: Elaboración propia

Los máximos y mínimos que se presentan en la Tabla 7.27 y Tabla 7.28 para los escenarios 2015 y 2020 respectivamente no presentan variaciones significativas dichos valores se mantienen similares a los obtenidos en el año base.

Tabla 7.27 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Intermodal 2015)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	286,0276	0,782796
Tarifa (miles de pesos)	104	0
Tiempo en vehículo (min)	752,017	17,62667
Tiempo de espera inicial (min)	180	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	598,6607	0
Tiempo de viaje en transporte público (min)	699,868	16,75649

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.28 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Intermodal 2020)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	287,2673	0,777012
Tarifa (miles de pesos)	104	0
Tiempo en vehículo (min)	752,4039	17,48161
Tiempo de espera inicial (min)	180	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	599,1704	0
Tiempo de viaje en transporte público (min)	699,868	16,75649

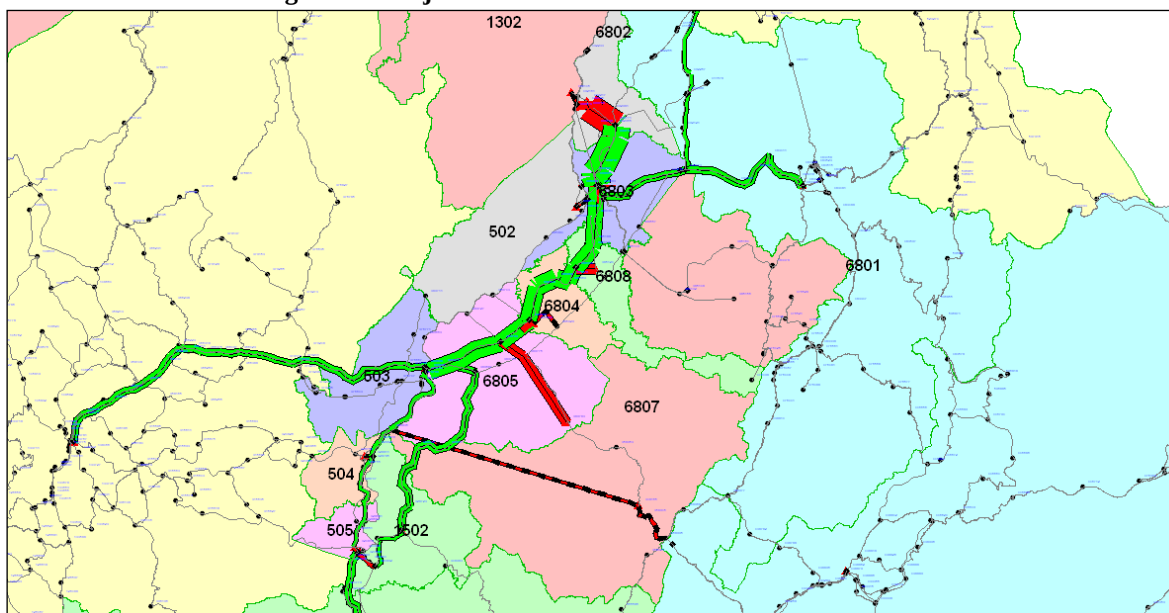
Fuente: Elaboración propia

7.4.9 Segundo enfoque: Modelación de redes modales

El segundo enfoque de modelación sobre el corredor multimodal para el proceso de asignación de viajes separa las etapas de elección modal y asignación. Inicialmente se obtienen matrices modales utilizando el modelo de elección discreta previamente calibrado y seguidamente cada matriz es cargada a la red del modo correspondiente. Este enfoque es teóricamente más robusto, ya que ajusta los flujos actuales y futuros a los calibrados en la demanda y no se fuerza a una elección modal en el proceso de asignación, como ocurre en el primer enfoque. Nuevamente, la asignación de viajes para este segundo enfoque se estimó mediante el método de equilibrio estocástico.

La Figura 7.7, Figura 7.8 y Figura 7.9 muestra los flujos modelados para la situación en los modos férreo, carretero y fluvial respectivamente. Con respecto a la modelación en modo carretero se puede apreciar que el corredor Barrancabermeja – García Cadena (Puerto Wilches) – Barrancabermeja (Ruta Norte) presenta mayor carga que el corredor Barrancabermeja – Puerto Berrío – Barrancabermeja (Ruta Sur). Los resultados muestran que al tratarse de un corredor de baja demanda, no hay congestión.

Figura 7.7 Flujos modelación modo férreo situación actual



Los costos generalizados para la situación actual concuerdan con la realidad en la Tabla 7.29 se presenta el costo generalizado ponderado de las zonas internas y externas, en la Tabla 7.30 se aprecia los valores máximos y mínimos de costo generalizado, tarifa, tiempo de espera, tiempo de transferencia y tiempos de viaje.

Tabla 7.29 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Férreo actual)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	52,998
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	32,823

Fuente: Elaboración propia

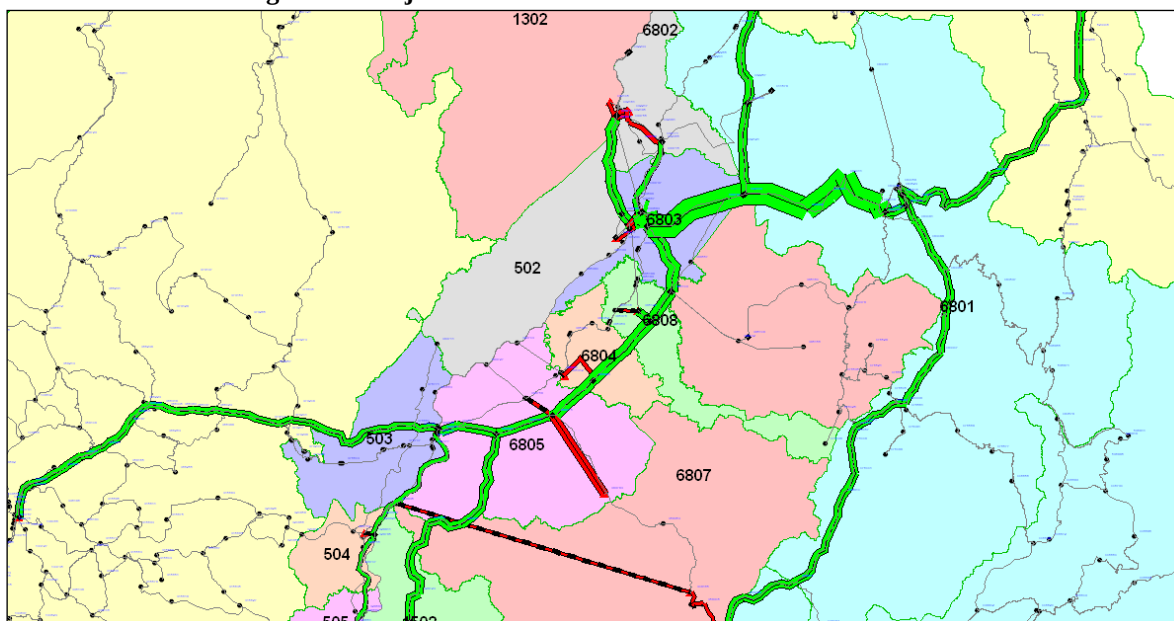
Tabla 7.30 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Férreo actual)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	250,7967	0,705559969
Tarifa (miles de pesos)	104	0
Tiempo en vehículo (min)	721,0249634	16,76329231
Tiempo de espera inicial (min)	150	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	541,5790405	0,000
Tiempo de viaje en modo férreo (min)	716,8406372	172,6675873

Fuente: Elaboración propia

El modo carretero soporta la mayor proporción de la demanda; además, por ser el que tiene la red más extensa, actúa como alimentador de otros modos, particularmente los viajes que realizan desde y hacia la zona de Bucaramanga. Igualmente son significativos los flujos que vienen desde la zona del sur de Bolívar, zona Sur del país y la zona de Antioquia, la mayor parte de los cuales necesariamente utiliza la carretera.

Figura 7.8 Flujos modelación modo carretero situación actual



Al igual que en el modo férreo en la Tabla 7.31 se presenta los costos generalizados ponderados del modo carretero, también se aprecia en la Tabla 7.32 los máximos y mínimos de los costos generalizados, las tarifas, tiempos de espera y de viaje.

Tabla 7.31 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Carretero actual)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	35,258
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	33,062

Fuente: Elaboración propia

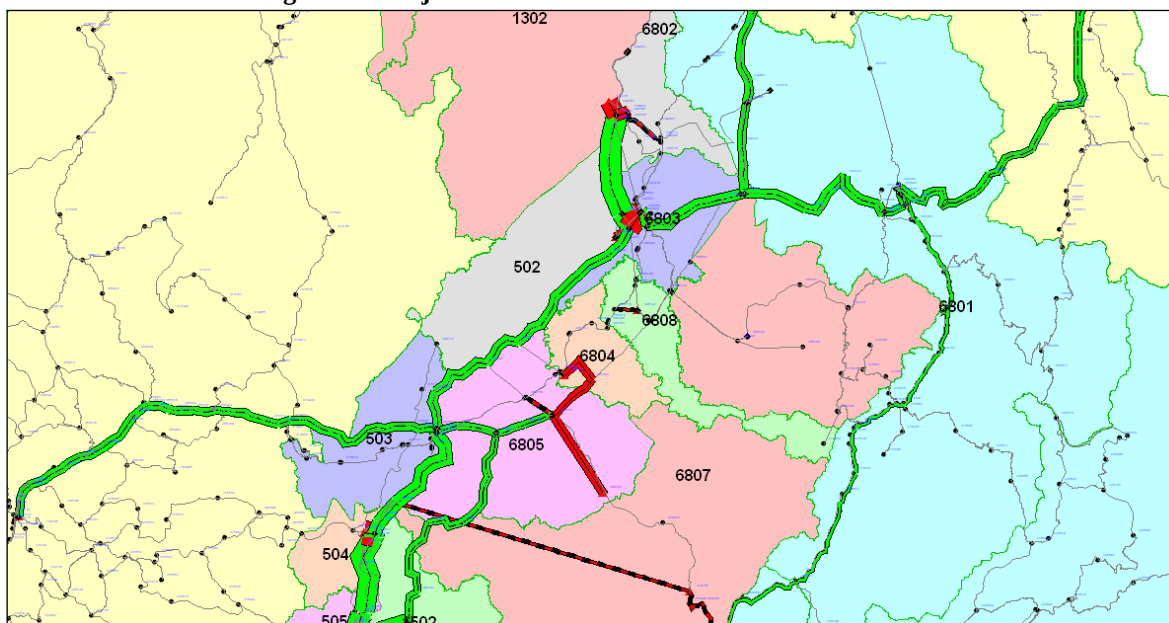
Tabla 7.32 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Carretero actual)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	250,7967	0,705559969
Tarifa (miles de pesos)	104	0
Tiempo en vehículo (min)	721,0249634	16,76329231
Tiempo de espera inicial (min)	150	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	541,5790405	0,000
Tiempo de viaje en modo carretero (min)	716,8406372	172,6675873

Fuente: Elaboración propia

La modelación de la situación para el modo fluvial se destaca por la gran cantidad de flujo que alimenta al corredor desde la zona del Sur de Bolívar y los municipios aledaños a lo largo de la rivera del Río Magdalena. Esta tendencia se debe a que para muchas de estas zonas la única forma de transporte es a través del río.

Figura 7.9 Flujos modelación modo fluvial situación actual



Se puede apreciar en la Tabla 7.33 y Tabla 7.34 algunos costos y tiempos que influyen en este modo.

Tabla 7.33 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Fluvial actual)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	52,189
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	36,529

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.34 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Fluvial actual)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	301,6676	0,705816
Tarifa (miles de pesos)	125	0
Tiempo en vehículo (min)	784,2199	21,11612
Tiempo de espera inicial (min)	150	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	538,6316	0
Tiempo de viaje en modo fluvial (min)	210,3345	69,80078

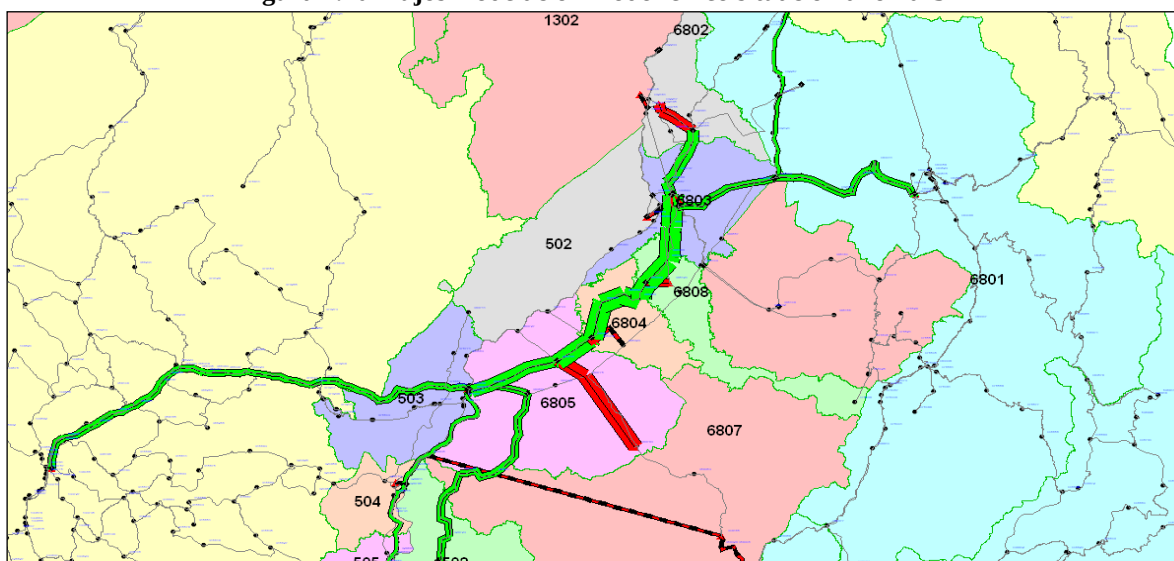
Fuente: Elaboración propia

Los flujos para la modelación de la situación futura para el horizonte del año 2015 para los modos férreo, carretero y fluvial se muestran en la Figura 7.10, Figura 7.11 y Figura 7.12, respectivamente. Como ya se había dicho anteriormente la modelación de la situación futura involucra un escenario en el cual la velocidad del tren se ha aumentado a 60 km/hr.

Los resultados muestran que el corredor Sur (Ruta: Barrancabermeja - Puerto Berrío - Barrancabermeja) se encuentra más cargado que el corredor Norte (Ruta: Barrancabermeja - García Cadena - Barrancabermeja). Es evidente que el aumento de la velocidad hace más atractivo al modo férreo, aumentando su demanda, especialmente hacia el corredor Sur. La

demanda de los demás modos (carretero y fluvial) solo se ve afectada en la zona de estudio (zonas internas) del corredor estudiado.

Figura 7.10 Flujos modelación modo férreo situación año 2015



Para la situación futura se presentan los mismos parámetros presentados en las situaciones actuales para así poder ver la evolución de estos en el escenario futuro, como lo muestra la Tabla 7.35, en las zonas internas y externas se incrementa el costo generalizado ponderado, una explicación para ello es el aumento de los viajes en el modo debido al aumento de velocidad en este y al no aumento en las tarifas de viaje.

Tabla 7.35 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Férreo 2015)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	43,919
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	42,903

Fuente: Elaboración propia

Los valores máximos y mínimos de costos y tiempos se aprecian en la Tabla 7.36 donde comparados con la situación actual presentan disminución tanto en tiempos de viajes como en costo generalizado y tarifas, esto debido al aumento de la velocidad al modo.

Tabla 7.36 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Férreo 2015)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	310,5567	0,921921
Tarifa (miles de pesos)	121	1,000
Tiempo en vehículo (min)	778,3383	9,758633
Tiempo de espera inicial (min)	180	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	605,75	0,000
Tiempo de viaje en modo férreo (min)	95,56737	0,229723

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la modelación en el año 2015 para los modos carretero y fluvial, estos siguen conservando sus mismas características y no sufren mayores modificaciones. Las

tendencias de fuertes flujos en modo carretero desde Barrancabermeja hacia la Zona de Bucaramanga y viceversa se siguen conservando.

Figura 7.11 Flujos modelación modo carretero situación año 2015

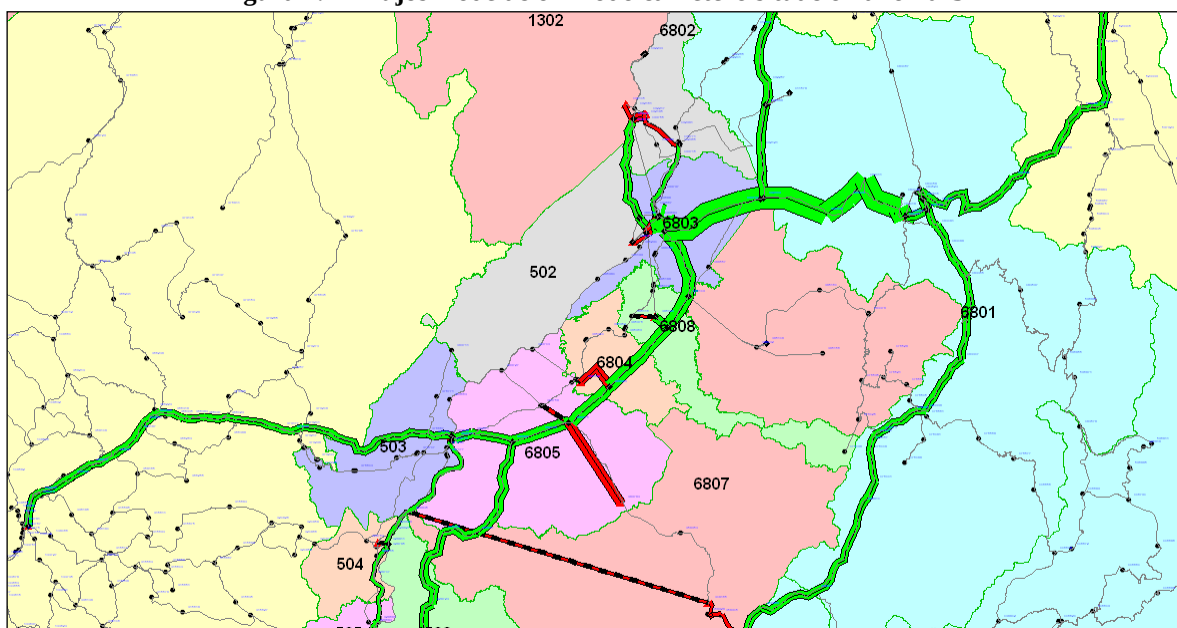


Tabla 7.37 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Carretero 2015)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	48,328
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	40,343

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7.37 muestra la variación del costo generalizado ponderado en el modo carretero, esta variación se presume es debida a los cambios en el número de viajes que presenta este modo, la Tabla 7.38 presenta los valores en otros parámetros los cuales no presentan variaciones significativas.

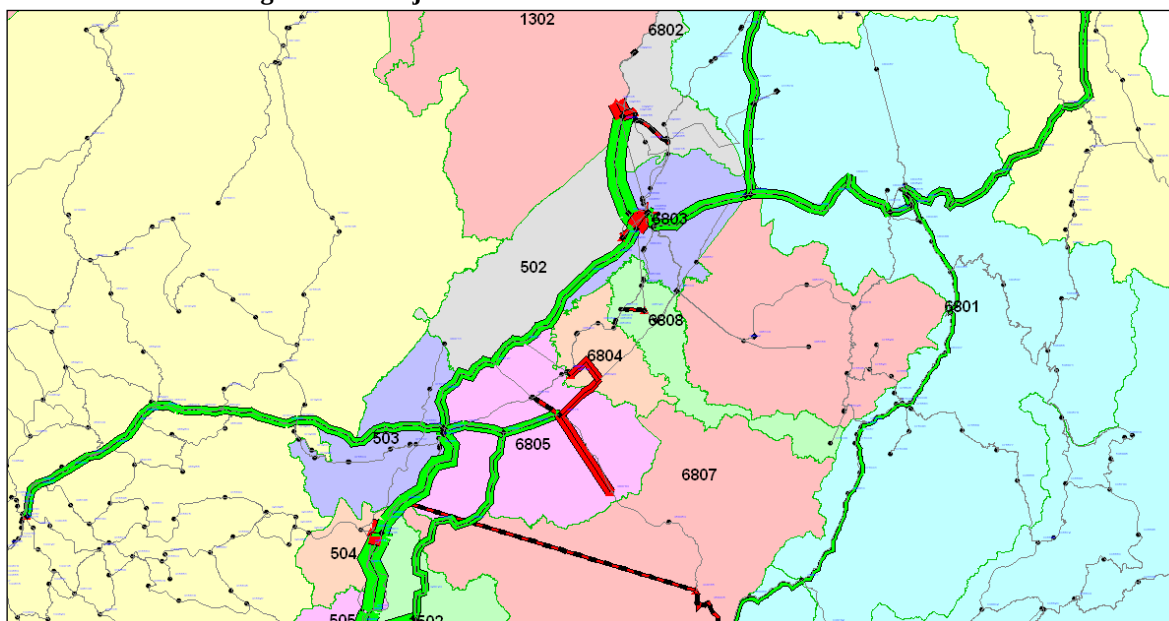
Tabla 7.38 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Carretero 2015)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	250,8861	0,705571
Tarifa (miles de pesos)	104	1,000
Tiempo en vehículo (min)	725,5386	16,79789
Tiempo de espera inicial (min)	150	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	541,579	0,000
Tiempo de viaje en modo carretero (min)	716,8406	172,6676

Fuente: Elaboración propia

Las tendencias de fuertes flujos que alimentan al corredor en el modo fluvial se siguen dando a lo largo de la rivera del Rio Magdalena.

Figura 7.12 Flujos modelación modo fluvial situación año 2015



La Tabla 7.39 muestra el costo generalizado ponderado para el modo fluvial en el año 2015, presenta aumento de este en la zonas internas, una explicación para este fenómeno se basa en que para poder acceder a los municipios intermedios entre Barrancabermeja y Puerto Berrío no se encuentran puertos de embarque y desembarque lo cual obliga al viajero a llegar a uno de estos dos puertos y luego tomar otro medio de transporte para llegar el destino final del viaje.

Tabla 7.39 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Fluvial 2015)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	54,983
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	57,902

Fuente: Elaboración propia

Los máximos y mínimos de tiempos de viaje, de espera, costos generalizados y tarifas se aprecian en la Tabla 7.40, los cuales comparados con la situación actual no presentan variaciones significativas.

Tabla 7.40 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Fluvial 2015)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	301,3217	0,705566
Tarifa (miles de pesos)	125	0
Tiempo en vehículo (min)	785,3993	21,16446
Tiempo de espera inicial (min)	150	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	538,6316	0
Tiempo de viaje en modo fluvial (min)	210,3345	69,80078

Fuente: Elaboración propia

Considerando el mismo escenario para el 2020, se evidencia nuevamente que el corredor férreo entre Barrancabermeja - Puerto Berrío se sigue cargando en mayor cantidad que el corredor Barrancabermeja – García Cadena (Puerto Wilches).

La Tabla 7.41, Tabla 7.43 y Tabla 7.45 presentan el costo generalizado ponderado para los modos férreo, carretero y fluvial respectivamente, estos costos presentan el mismo comportamiento al presentado en escenario 2015, la Tabla 7.42, Tabla 7.44 y Tabla 7.46 presentan los valores máximos y mínimos de costo generalizados, tarifas y tiempos de espera y de viaje de los modos mencionados, estos también presentan el mismo comportamiento a los presentados en el escenario 2015, una explicación para ello es la no variación de parámetros entre los escenarios y el cambio mínimo en la demanda de viajes entre las zonas.

Figura 7.13 Flujos modelación modo férreo situación año 2020

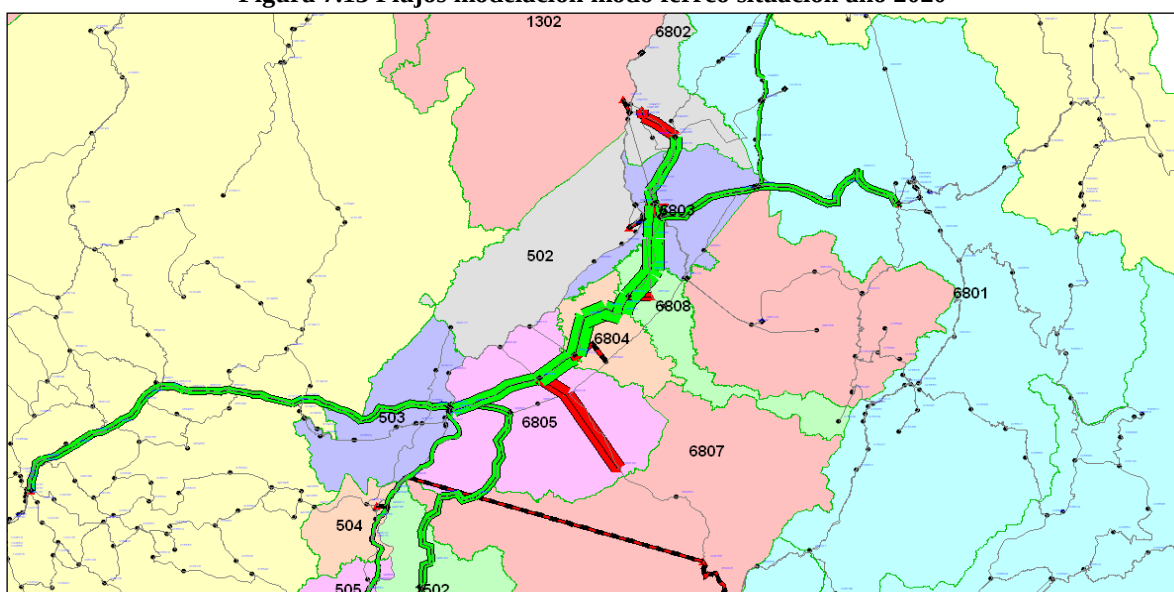


Tabla 7.41 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Férreo 2020)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	44,188
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	43,161

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.42 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Férreo 2020)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	310,5567	0,921921
Tarifa (miles de pesos)	121	0
Tiempo en vehículo (min)	778,3383	9,758633
Tiempo de espera inicial (min)	180	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	605,75	0
Tiempo de viaje en modo férreo (min)	95,56737	0,229723

Fuente: Elaboración propia

Para el horizonte del año 2020 se conservan las mismas tendencias mostradas en la modelación del horizonte del año 2015. Los modos carretero y fluvial tienen alta cantidad de flujos entre la zona de Barrancabermeja y la zona del Sur Bolívar; igualmente existe una alta cantidad de flujos hacia la zona oriente del país (Zona de Bucaramanga y Zona de Norte de Santander).

Figura 7.14 Flujos modelación modo carretero situación año 2020

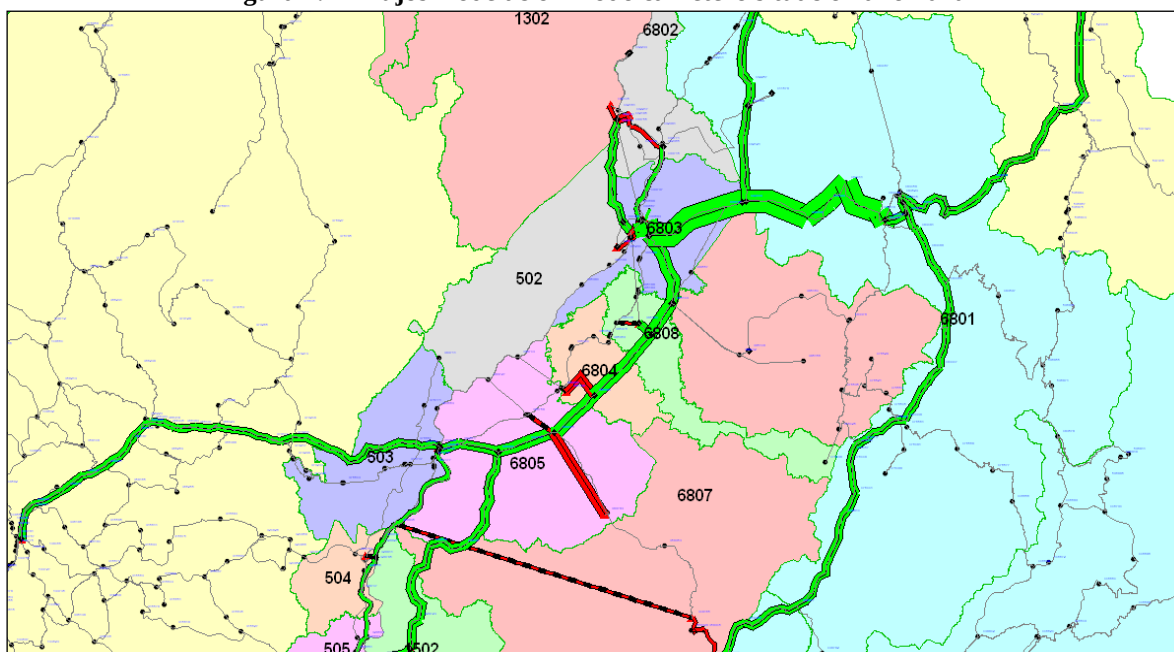


Tabla 7.43 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Carretero 2020)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	48,585
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	40,465

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.44 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Carretero 2020)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	250,8861	0,705571
Tarifa (miles de pesos)	104	1,000
Tiempo en vehículo (min)	725,5386	16,79789
Tiempo de espera inicial (min)	150	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	541,579	0,000
Tiempo de viaje en modo carretero (min)	716,8406	172,6676

Fuente: Elaboración propia

Figura 7.15 Flujos modelación modo fluvial situación año 2020

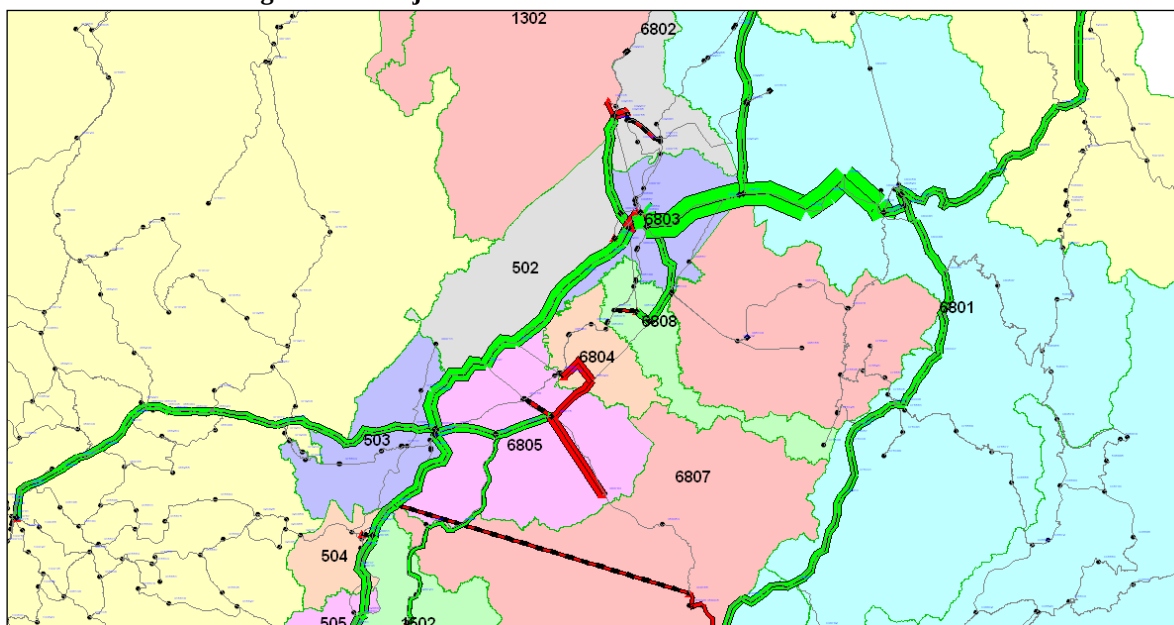


Tabla 7.45 Costo generalizado ponderado en miles de pesos (Fluvial 2020)

Costo generalizado ponderado (Entre todas las zonas)	55,139
Costo generalizado ponderado (Zonas internas)	59,105

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.46 Valores máximos y mínimos para distintos aspectos del viaje (Fluvial 2020)

	Máximo	Mínimo
Costo Generalizado (miles de pesos)	301,3217	0,705566
Tarifa (miles de pesos)	125	0
Tiempo en vehículo (min)	785,3993	21,16446
Tiempo de espera inicial (min)	150	30
Tiempo de espera de transferencia (min)	538,6316	0
Tiempo de viaje en modo fluvial (min)	210,3345	69,80078

Fuente: Elaboración propia

8 CONCLUSIONES

El proceso de toma de datos, digitación, depuración y procesamiento la información para la generación de las estadísticas básicas y el desarrollo de las matrices OD, permitió identificar las posibilidades de mejoras del instrumento y la metodología, consecuentemente, proponer cambios, que se reflejan en los instrumentos definitivos.

Se enfatiza que debe planificarse al máximo el proceso de organización, depuración y digitación de la información obtenida en campo. Esto implica el diseño detallado de sistemas de auditorías y control sobre la información en todas las etapas de su tratamiento, desde la recolección en campo (revisiones constantes durante la toma de información a cargo del supervisor de turno), la depuración del papel (una búsqueda exhaustiva de errores en campo) hasta la digitación (controles en el aplicativo web de digitación que impidan la inserción de datos anómalos y auditoría digital constante por parte del supervisor a cargo).

Se trata de un corredor multimodal de baja demanda en el cual la zona que genera y atrae mayor cantidad de viajes es la zona de Barrancabermeja con 689 (51%) viajes diarios generados y 755 (56%) viajes atraídos. Por su parte, la zona externa con la que se tiene mayor interacción es Bucaramanga.

Los datos muestran que en el corredor ferroviario para un día laboral aproximadamente se movilizan 427 personas, mientras que para un día no laboral este dato corresponde a 473 personas. Es de resaltar que el día sábado es que registra una cantidad ligeramente mayor de viajes con 473. Con respecto a los modos fluvial y carretero, estos movilizan un promedio diario de 256 y 679 pasajeros, respectivamente. Estas estadísticas indican bajos niveles de movilidad sobre el corredor estudiado, pero ponen de relieve el potencial del transporte ferroviario con los demás modos en la zona de estudio.

Los recorridos en modo férreo correspondientes a Barrancabermeja – García Cadena y Barrancabermeja – Puerto Berrío tienen los mayores porcentajes de pasajeros movilizados con el 26% y 27%, respectivamente; esto ratifica a la zona de Barrancabermeja como la mayor generadora de viajes en el modo ferroviario para el corredor estudiado. El corredor Barrancabermeja – Puerto Berrío – Barrancabermeja moviliza el 52,5% del total de viajes, el restante lo moviliza el corredor Barrancabermeja – García Cadena – Barrancabermeja.

Se notó que los motivos representativos de viaje para la zona en estudio son las “diligencias” y “trabajo”, los cuales presentan en promedio un 34,3% y 28,4% para modo férreo, 22,8% y 24,4% para modo carretero y 21,4% y 42,9% para modo fluvial respectivamente. Llama la atención que el 27,6% de los motivos de viaje en modo carretero

corresponden a el motivo denominado “Otros”. Por otra parte, casi la totalidad de los usuarios paga el pasaje; este porcentaje corresponde al 89,6%, 87% y 70,2% de los modos férreo, carretero y fluvial, respectivamente; el 28,6 de los viajes en modo fluvial son pagados por la empresa en la cual trabajan los viajeros de dicho modo.

Entretanto, la caracterización socioeconómica muestra que cerca del 57,8% de los usuarios del modo férreo presentan ingresos inferiores a \$500.000, mientras que 56,9% y 26,2% de los usuarios de modo carretero y fluvial respectivamente presentan ingresos inferiores a \$500.000; los encuestados no fueron renuentes a declarar sus ingresos. Realizando un exhaustivo análisis de estadísticas se destaca que las características de movilidad correspondiente a los usuarios en los modos férreo y carretero son muy similares, mientras que esta tendencia no se observa en los viajeros de modo fluvial.

A lo largo del trabajo se analizan varios aspectos de la modelación de viajes sobre un corredor multimodal interurbano de baja demanda donde se tienen en competencia los modos férreo, carretero y fluvial. Utilizando información conjunta proveniente de datos de preferencias reveladas y preferencias declaradas, se estimaron modelos desagregados que permitieron evaluar políticas referentes a mejorar el nivel de servicio para el modo ferroviario.

Los modelos calibrados de generación y atracción de viajes demuestran que la influencia de variables como población de la zona es relevante, habiendo obtenido altos indicadores de significancia estadística en los modelos. Aunque la variable de accesibilidad no fue significativa al 95% de confianza se decidió dejarla como parte de la estructura del modelo ya que en la revisión bibliográfica se ha encontrado como una variable relevante para este tipo de casos; no obstante, es recomendable realizar este tipo de estimaciones con una mayor cantidad de datos ya que para este caso solo contábamos con solo 6 (seis) observaciones para la estimación. Cabe destacar que los modelos presentados tienen un carácter predictivo, ya que pueden ser usados en pronóstico y es posible proyectar valores futuros tanto de la población como de la accesibilidad de zona dada.

A partir de la aplicación de datos de el corredor multimodal y observando la matrices de viajes obtenidas por Máxima Entropía, utilizando el método de Hyman se aprecia una de las características de este modelo, que es que para una matriz inicial con varias celdas vacías, se obtiene una matriz final sin celdas vacías o viajes entre cualquier origen y destino, salvo en los siguientes casos: las matrices finales no presentan viajes en aquellas celdas donde los viajes generados en la zona origen son nulos, donde los viajes atraídos en la zona de destino son nulos y en celdas de la diagonal (no se tienen en cuenta los viajes intrazonales). Tal y como era de esperar se ha obtenido un valor de β (0.1498) menor que el de λ (0.3092).

A partir de los modelos de elección discreta estimados fue posible realizar estimaciones de mediciones de valor subjetivo del tiempo, medición de elasticidades y disposiciones a pagar por mejoras en el nivel de servicio. Pudo notarse que hay diferencias en la valoración del tiempo entre los usuarios de los modos, siendo mayor para el modo fluvial y menor para los usuarios de la carretera. A su vez, en el modelo involucrando un parámetro aleatorio para el tiempo de viaje, la probabilidad de que sea positivo (utilidad marginal positiva del tiempo de viaje) es sensiblemente similar a la proporción de usuarios que viajaba con motivo turismo o placer. Por otra parte, también resulta interesante anotar que la desutilidad marginal del costo es mayor cuando es el mismo viajero quién paga el pasaje.

Los modelos de elección de modo calibrados en la presente investigación pueden utilizarse efectivamente para realizar predicciones de viajes a horizontes futuros. En este caso, se mostró el escenario de modelación en cual se realizaban mejoras al nivel de servicio (disminución de tiempos de viaje) del modo férreo arrojando resultados coherentes. No obstante se debe ser muy cauteloso al momento de realizar variaciones de variables explicativas de los modelos calibrados para obtener predicciones lógicas.

Se efectuaron dos tipos de enfoques de modelación para el corredor multimodal. En primera instancia se modeló el proceso de asignación-elección modal de manera conjunta lo cual arrojó unos resultados satisfactorios con algunos márgenes de errores que debilitan este tipo de enfoque. En segunda instancia se modeló la asignación de manera separada de la elección modal lo que permitió simular y calibrar el proceso de mejor forma. En el caso de los escenarios futuros planteados con las características especificadas, se demostró que un aumento en la velocidad al modo férreo atraería un flujo significativo a este medio de transporte (particular y significativamente a la ruta Barrancabermeja – Puerto Berrío - Barrancabermeja), convirtiéndose en una alternativa importante para el transporte de personas en la zona de estudio. Incrementar la velocidad del ferrocarril incrementa su demanda; sin embargo, dado los bajos niveles de demanda, seguramente las mejoras deberán ser subsidiadas.

Los modelos obtenidos resultan robustos a la luz de criterios econométricos, por lo cual es posible suponer que las proyecciones son razonables. Aparte del resultado obvio de que los modelos representan correctamente la sensibilidad de la demanda ante indicadores de nivel de servicio.

Dados los resultados de la modelación se puede concluir que es posible la adaptación del modelo estratégico de transporte, utilizando información mixta de preferencias declaradas (PD) y preferencias reveladas (PR) para estimar la demanda y equilibrio con la oferta en un corredor intermodal interurbano de transporte de pasajeros; igualmente el uso del modelo clásico secuencial de transporte permitió calibrar la demanda de viajes actual y proyecciones a horizontes de modelación futuros; de la misma forma la modelación de la

oferta evaluó políticas pertinentes a mejorar el sistema de transporte férreo en la situación actual y proyecciones a futuro sobre un corredor multimodal de transporte regional de pasajeros. La metodología utilizada para recolección de datos y posterior modelación resultaron ser eficientes y mostraron resultados satisfactorios.

Se propone demostrar que en un corredor con las características del estudiado el enfoque estocástico para la asignación es más adecuado en tanto no se tienen problemas de congestión y hay alta variabilidad e incertidumbre en el conocimiento que los usuarios tienen del sistema.

Futuras investigaciones sobre corredores con las características descritas se enfocarán en la posibilidad de ofrecer servicios combinados, logrando integración operacional y tarifaria entre los modos de transporte que actualmente están en competencia.

9 BIBLIOGRAFÍA

Ahern, A. A., & Tapley, N. (2008). *The use of stated preference techniques to model modal choices on interurban trips in Ireland*. *Transportation Research Part A* 42 15–27.

Ben-Akiva, M. E., & Buldoc, D. (1996). *Multinomial probit with a logit kernel and a general parametric specification of the covariance structure*. Documento de Trabajo, Département d'économique, Université Laval.

Ben-Akiva, M. E., & Morikawa, T. (1990). *Estimation of travel demand models from multiple data sources*. In: *Proceedings 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Yokohama.

Daly, A., & Zachary, S. (1978). *Improved multiple choice models*. En D. A. Hensher y M. Q. Dalvi (eds.) *Determinants of Travel Choice*, 335-357. Saxon House, Sussex.

Diagnóstico del sector Transporte 2007. Oficina Asesora de Planeación. MINTRANSPORTE.

Domencich, T., & McFadden, D. (1975). *Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis*. North-Holland, Amsterdam.

Espino, R., Román, C., & Ortúzar, J. d. (2006). *Analysing demand for suburban trips: a mixed RP/SP model with latent variables and interaction effects*. *Transportation* 33, 241–261.

Jara-Díaz, S. R., & Ortúzar, J. d. (1986). *Valor subjetivo del tiempo y rol del ingreso en la especificación de la demanda de transporte*. *Apuntes de ingeniería* 24, 5-36.

Kocur, G., Adler, T., Hyman, W., & Aunet, B. (1982). *Guide to forecasting travel demand with direct utility assessment*. Report N° UMTA-NH-11-0001-82, Urban Mass Administration, US Department of Transportation, Washington, D.C.

Louviere, J. J., Hensher, D. A., & Swait, J. D. (2000). *Stated Choice Methods: Analysis and Application* Cambridge: Cambridge University Press.

Matas, A. (1991). *La demanda de transporte urbano: un análisis de las elasticidades y valoraciones del tiempo*. *Investigaciones Económicas XV*, 249-267.

McFadden, D., & Train, K. E. (2000). *Mixed MNL models for discrete response*. *Journal of Applied Econometrics* 15, 447-470.

Mokhtarian, P. L., & Salomon, I. (2001). *How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations. Transportation Research Part A-Policy and Practice* 35 (8), pp. 695.

Moura, J. L.; Ibeas, Á.; dell'Olio, L.; Vega, Á. (2006) *Dos Modelos de Distribución de Viajes: Modelo de Entropía (Hyman) versus Triproporcional a través de una aplicación en la Ciudad de Concepción (Chile). Revista de Obras Públicas*, 153 (3462): 33 – 40.

Muñizaga, M., Heydecker, B., & Ortúzar, J. d. (2000). *Representation of heteroskedasticity in discrete choice models. Transportation Research* 34B, 219-240.

Ortúzar, J. d. (1998). *Modelos de Demanda de Transporte*. Santiago: Ediciones Universidad Católica de Chile.

Ortúzar, J. d., & González, R. M. (2002). *Inter-Island travel demand response with discrete choice models. Journal of Transport Economics and Policy*, Volume 36, Part 1, pp 115-138.

Ortúzar, J. d., & Willumsen, L. G. (2001). *Modelling Transport (3ª Edición Corregida)*. Chichester: John Wiley and Sons.

Román, C., Espino, R., & Martín, R. (2007). *Competition of high-speed train with air transport: The case of Madrid-Barcelona. Journal of Air Transport Management* 13. Pag 277–284.

Train, K. (2009) *Discrete choice model with simulation*. Cambridge University Press, 2ed.

Verastegui, D. (2006). *Estimación de matrices origen - destino y calibración de parámetros en el problema de asignación de tráfico en redes congestionadas. Universidad de castilla la mancha. Ciudad Real. 2006. Pag 29-31.*

Williams, H. (1976). *A comparison of some calibration techniques for doubly constrained models with an exponential cost function. Transportation Research* 10(2), 91-104.

Williams, H. (1977). *On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. Environment and Planning* 9A, 285-344.

Wilson, A. G. (1976). *A comparison of some calibration techniques for doubly constrained models with an exponential cost function. Transportation Research* 10(2), 91-104.

[http://www.uclm.es/area/dip/WEBCONFLICTO/datos%20colombia_archivos/Matis_Colombia\[1\].pdf](http://www.uclm.es/area/dip/WEBCONFLICTO/datos%20colombia_archivos/Matis_Colombia[1].pdf)

http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portaIIG/home_1/recursos/01_general/mapas/contenidos/15042008/22_santander.jsp#.