

# **TRANUS: Sistema de Simulación Integrado de Localización de Actividades y transporte**

En este documento se presenta una descripción general del modelo integral de usos del suelo y transporte Tranus. La descripción hace énfasis en los aspectos conceptuales de manera relativamente extensa y detallada. Este documento está orientado a aquellos que desean conocer el sistema y tener una visión de sus propósitos y capacidades. Para quien conoce versiones anteriores de Tranus, este documento le permite conocer los últimos desarrollos y nuevas facilidades incorporadas al sistema de modelos. Para quien desee conocer aspectos específicos acerca del sistema, se ofrecen los siguientes documentos complementarios:

- Formulación matemática y algorítmica de Tranus
- Operación de la Interfaz Gráfica del sistema Tranus
- Operación de los programas de cómputo del sistema Tranus
- Generación de reportes de resultados en Tranus

Estos materiales están disponibles en la página Web de Modelística ([www.modelistica.com](http://www.modelistica.com)), la cual incluye también algunos artículos de interés relacionados con el sistema de modelación Tranus. El software de Tranus puede ser bajado, instalado y utilizado de manera gratuita.

## **Objetivo y rango de aplicaciones**

Tranus es un modelo de simulación integral de la localización de actividades, usos del suelo y de transporte, que puede ser aplicado tanto a escala regional como urbana. Está especialmente orientado a la simulación de los efectos probables de la aplicación de políticas y proyectos diversos en ciudades o regiones, y evaluarlos desde un punto de vista social, económico, financiero, energético y ambiental.

La característica más destacable del sistema Tranus es la forma verdaderamente integrada en que se representan los principales componentes del sistema urbano o regional, tales como la localización e interacción de actividades, el mercado inmobiliario y el sistema de transporte. Todos estos componentes están relacionados entre sí de manera explícita y de acuerdo a una teoría claramente desarrollada para este fin. De esta manera el fenómeno del movimiento de personas y mercancías se explica por las relaciones económicas y espaciales entre las actividades que los generan. A su vez, la accesibilidad que resulta del sistema de transporte afecta la forma en que interactúan las actividades entre sí, se localizan en el espacio e interactúan con el sistema inmobiliario. La evaluación económica forma también parte integral del sistema de modelación y de la formulación teórica, proveyéndose todas las herramientas necesarias para el análisis de políticas y proyectos.

Un sistema integrado de esta naturaleza permite evaluar los efectos de políticas de transporte sobre la localización de actividades y el uso del suelo. También es posible analizar los efectos de políticas de usos del suelo sobre el sistema de transporte, y naturalmente el efecto de políticas combinadas. Si bien es en la planificación integrada donde el sistema Tranus rinde su potencial máximo, el sistema puede ser utilizado como un modelo *sólo-transporte*, asignando matrices dadas de demanda, lo cual puede ser útil para la evaluación de políticas de transporte a corto plazo.

El enfoque integrado permite, además, estimar matrices origen-destino de viajes a un costo reducido. Las matrices que se derivan de encuestas en hogares son muy costosas, y aún con una muestra muy amplia, no se puede garantizar la solidez estadística de los resultados. La alternativa es utilizar una muestra pequeña para calibrar un modelo integrado de localización y transporte, con lo cual es posible construir analíticamente las matrices, y obtener resultados más confiables a un costo mucho menor.

En cuanto a escala de aplicaciones, el sistema Tranus permite la simulación de:

- Áreas urbanas detalladas

- Areas metropolitanas
- Regiones metropolitanas
- Regiones, estados o provincias
- Nivel nacional
- Regiones formadas por varios países

El sistema permite representar tanto los movimientos de carga como de pasajeros en transporte público y privado, en una misma red de transporte, simulando el efecto conjunto sobre la capacidad de la infraestructura vial. En aplicaciones urbanas, se suele dar prioridad a la representación de los movimientos de pasajeros, incluyendo exógenamente los movimientos de carga, para incluir su efecto en la congestión. En aplicaciones regionales o nacionales, ambos elementos, carga y pasajeros, son igualmente relevantes. En este caso, es posible realizar una completa contabilidad tipo insumo-producto, con representación explícita de importaciones y exportaciones, y evaluar su efecto en la utilización de la red multimodal de transporte.

El rango de políticas y proyectos que se pueden analizar con el sistema es muy amplio. Pueden representarse políticas de ordenación urbanística, controles sobre los usos del suelo, y diversos proyectos y políticas de transporte. Estas políticas de usos del suelo y transporte pueden ser combinadas y evaluadas conjuntamente. Una lista completa de las posibilidades del sistema sería muy extensa, pero la siguiente puede servir como guía:

- Planes de desarrollo urbanístico
- Controles a los usos del suelo
- Impacto de proyectos puntuales, como industrias o complejos residenciales
- Planes de desarrollo regional
- Planes habitacionales e incentivos a la construcción
- Programas de protección del medio ambiente, a través de controles sobre áreas especiales
- Nueva vialidad y mejoras a la vialidad existente
- Reorganización del sistema de transporte público (nuevas rutas, tarifas, etc.)
- Vías exclusivas para buses
- Sistemas de transporte masivo de pasajeros (metro, LRT, etc.)
- Autopistas de peaje, urbanas o regionales
- Vías exclusivas para automóviles de alta ocupación
- Restricciones en la circulación de automóviles
- Políticas de precios, tales como impuestos a los combustibles o a estacionamientos
- Park-and-ride
- Tarifación vial selectiva o tarifación por congestión
- Rehabilitación de carreteras interurbanas
- Políticas de mantenimiento de carreteras
- Proyectos ferroviarios o mejora de los existentes
- Nuevas facilidades portuarias o relocalización de las existentes
- Reubicación de aeropuertos de carga y pasajeros

Tranus ha sido aplicado en numerosos estudios en ciudades y regiones de muy diversa índole y correspondientes a realidades sociales y económicas muy diferentes, tales como América Latina, USA, Europa y Japón. También se utiliza en investigación académica y en cursos de postgrado en numerosas universidades y centros de investigación alrededor del mundo.

TRANUS fue desarrollado, desde el comienzo, para microcomputadoras personales, y en este sentido fue pionero, ya que fue el primer modelo de este tipo en estar disponible para PC. Hoy en día, con la creciente capacidad y reducido costo de las computadoras personales, estas ventajas resultan evidentes, y la mayoría de los modelos de este tipo están disponibles hoy para PCs. Sin embargo, al estar TRANUS diseñado desde sus inicios para estos equipos, hubo una fuerte disciplina en su programación y esfuerzos para optimizar los recursos. Desde la aparición de Windows, el mundo de las aplicaciones en PCs cambió dramáticamente, y Tranus ha aprovechado las ventajas que ofrece a los usuarios, siendo el primer modelo integrado o de transporte en contar con una interfaz gráfica Windows. Hoy en día el sistema aprovecha el importante desarrollo de otros programas con los cuales interactúa favorablemente, especialmente procesadores de texto, hojas de cálculo, sistemas de información geográficos GIS y modelos de tráfico. Con todas estas herramientas existen facilidades específicas.

Tranus es desarrollado por Modelística desde 1982, empresa que se encarga también del soporte, mantenimiento y asesoría. El nombre Tranus es una marca registrada y el sistema está protegido por las normas internacionales de copyright. Continuamente se producen nuevas versiones que incorporan mejoras y ampliaciones como resultado de investigación, requerimientos prácticos y avances en los sistemas de computación. Además de Modelística, se han establecido convenios de colaboración con empresas consultoras en Gran Bretaña, España, Bélgica, USA, Venezuela, Colombia y Chile.

## Marco teórico del sistema TRANUS

### Antecedentes

En las últimas décadas hubo importantes avances teóricos en el campo de la localización de actividades y del transporte. Muchos de ellos se deben a desarrollos teóricos formales, utilizando métodos cuantitativos para mejorar la comprensión de los sistemas urbanos y regionales. La literatura sobre el tema es demasiado vasta como para ser tratada en detalle aquí, de tal manera que se mencionarán sólo los hitos de mayor relevancia, en especial aquellos que han tenido una especial influencia sobre el sistema Tranus. La Figura 1 muestra el 'árbol genealógico' del sistema, de acuerdo a las principales líneas de investigación.

Los orígenes del análisis espacial se remontan a los trabajos de Von Thünen en 1826 que dio lugar a la escuela denominada de *microeconomía espacial*. De esta escuela Tranus toma los conceptos fundamentales de economía espacial y la formación de renta inmobiliaria. La segunda línea que se presenta es la conocida como modelos de gravedad y entropía. Si bien sus inicios son anteriores, los aportes de Hansen (1959) y Lowry (1964) se pueden considerar como los primeros dentro de una vasta área de investigación. La primera generación de modelos de tipo gravitatorio de los años 60 condujeron eventualmente al importante trabajo de Wilson (1970), quien no sólo introdujo técnicas de maximización de la entropía a la modelación espacial, sino que señaló también el camino de los modelos integrados de localización de actividades y transporte. Wilson demostró que un sistema urbano o regional se podía representar con un sólo cuerpo teórico unificado y consistente. Esta consideración, y en general el enfoque de interacción espacial entre actividades, forma parte fundamental del modelo integral Tranus.

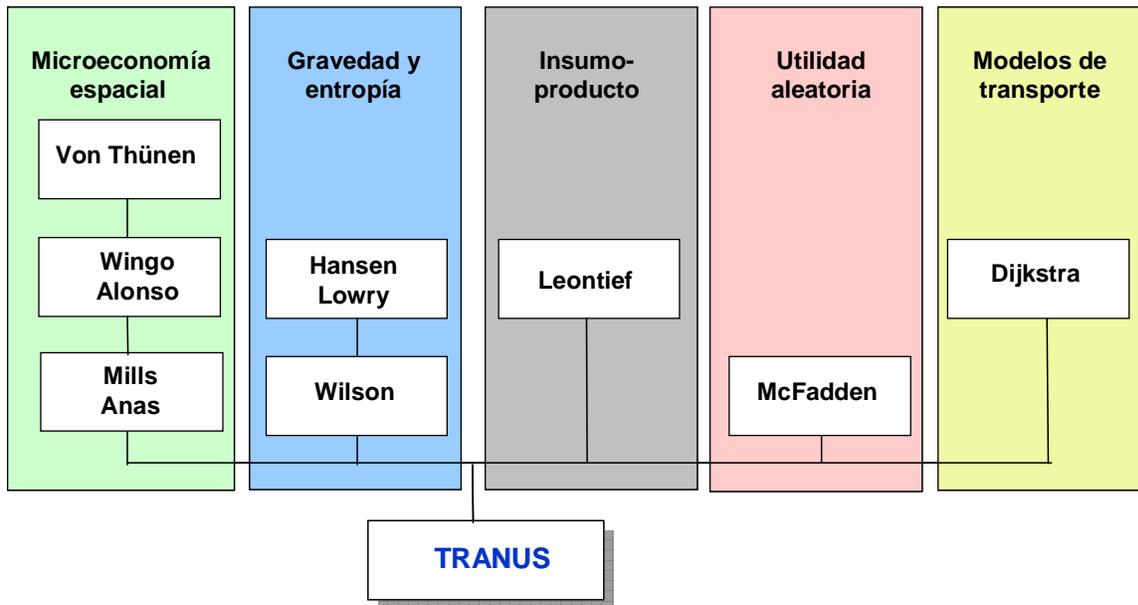
Por otra parte, el trabajo de Leontief y Strout (1963) sobre modelos de insumo-producto es de gran importancia, tanto a escala nacional como regional. El sistema Tranus incorpora una completa representación de la economía a través de una contabilidad insumo-producto, incluyendo la formación de precios y la representación de importaciones y exportaciones. Esta concepción ha sido especializada e integrada al sistema de transporte y a los demás componentes del sistema urbano-regional.

Tranus también está inserto en la importante escuela de modelos de decisión discretos y utilidad aleatoria liderizados por los trabajos de McFadden (1975). Si bien éste y otros autores plantearon un modelo general, la mayor parte de las investigaciones de esta escuela se han centrado en el problema de la separación modal en transporte, no habiéndose desarrollado modelos específicos para representar el resto de los elementos urbanos y regionales, menos aún de forma integrada. En Tranus esta formulación teórica se extiende a todos los niveles de decisión, desde la generación de viajes, selección modal y asignación, hasta la localización espacial de las actividades urbanas y las opciones del mercado inmobiliario. En rigor, Tranus es una extensa cadena de modelos de deci-

sión discretos encadenada en múltiples niveles. Los autores del sistema de modelos han colaborado en importantes desarrollos teóricos sobre modelos discretos, e incluye los desarrollos más recientes y avanzados.

Finalmente el árbol genealógico incluye una línea sobre los modelos de transporte convencionales, de los cuales Tranus ha tomado gran cantidad de elementos, tales como teoría de grafos, redes, colas y otros, comenzando por los algoritmos de búsqueda de pasos desarrollados por Dijkstra en los años 50.

**Figura 1: Antecedentes teóricos del sistema TRANUS**



Una de las características exclusivas del modelo de transporte en Tranus es que mantiene una total consistencia teórica al representar todos los procesos con base en modelos de decisión discretos, lo cual incluye especialmente la separación modal y la asignación. De hecho, ambos procesos pueden estar totalmente integrados en un sólo procedimiento enteramente multimodal. Este procedimiento distingue y distancia al sistema Tranus de los modelos convencionales de transporte basados en el concepto de equilibrio. En Tranus la asignación multimodal está enteramente basada en modelos de decisión discretos, lo cual le da gran consistencia con las investigaciones *de preferencias declaradas* y le otorga gran flexibilidad, además de la poderosa base de comportamiento económico de la cual carecen los modelos de equilibrio. Además, al utilizar sólo modelos de decisión discretos se tiene la integración necesaria y la base teórica para estimar los beneficios a los usuarios del sistema de transporte.

Cabe destacar que el modelo de transporte de Tranus permite una detallada representación del sistema de transporte público en sus más diversas modalidades. La importancia del transporte colectivo en América Latina es bien conocida, de allí que un modelo desarrollado en dicho ámbito haya prestado una especial importancia a este aspecto. El modelo permite la representación de sistemas de transporte masivo con simulación detallada ruta-a-ruta, tarifas integradas, sistemas no-motorizados, modos informales, y provee todas las estadísticas necesarias y los mapas GIS correspondientes. Probablemente es el modelo de transporte público más avanzado que se dispone.

La teoría subyacente en el sistema Tranus puede encontrarse en De la Barra (*Integrated Land Use and Transport Modelling*, Cambridge University Press, 1989). Sobre esa base, Modelística ha seguido, desde entonces, un proceso continuo de investigación, cuyos resultados forman parte de la actual versión. Como modelo de decisión discreto se adoptó originalmente una formulación *logit*. Gradualmente esta formulación fue mejorada con-

siderablemente. Recientemente se desarrolló una formulación alternativa (opcional) denominada como *modelos powit*, según la propuesta formulada por el Dr. Tristán Gálvez. La Formulación Matemática del Manual de Referencia desarrolla este tema en detalle.

## Principales componentes del sistema de modelos

En las secciones siguientes se describe la estructura general del modelo de usos del suelo y transporte. Esto es complementado con secciones que describen cada uno de los componentes principales: localización e interacción de actividades, el módulo de interfaz, el sistema de transporte y el procedimiento de evaluación.

### Estructura general del modelo

Los componentes principales del sistema integrado usos del suelo-transporte se muestran en la Figura 2, en donde se identifican los dos subsistemas: actividades y transporte. Dentro de cada subsistema se distingue entre los elementos de demanda y de oferta, los cuales interactúan para generar un estado de equilibrio.

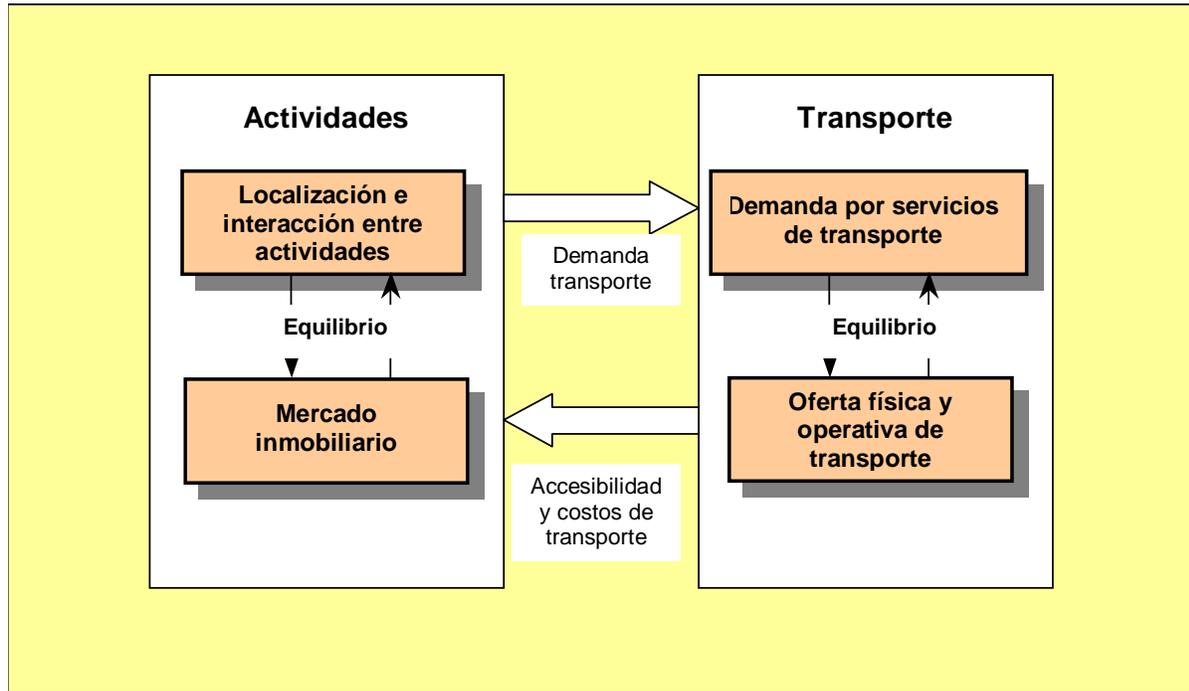
La localización e interacción entre actividades representa la demanda en el subsistema de actividades. Actividades, tales como industrias u hogares, se localizan en lugares específicos e interactúan entre sí para llevar a cabo sus funciones. Las actividades también requieren suelo y edificaciones para su funcionamiento, espacio que proveen los promotores inmobiliarios y que por lo tanto representan el sector oferta. La interacción entre ambos debe conducir a un estado de equilibrio. Si la demanda por espacio sobrepasa la oferta en algún lugar específico, los precios inmobiliarios se incrementarán para reducir la demanda. Los precios o *rentas* inmobiliarias representan, por lo tanto, el elemento variable que conduce al sistema hacia un estado de equilibrio.

Por su parte, la interacción entre actividades genera necesidades de viaje. En el subsistema de transporte, la demanda está representada por las necesidades de transporte, que puede tomar la forma de personas viajando a sus sitios de trabajo o mercancías producidas en un lugar y consumidas en otro. En la oferta de transporte, por su parte, se hace una distinción entre la *oferta física* y la *oferta operativa*. La oferta física está constituida por la infraestructura en forma de red, compuesta por carreteras, vías férreas, rutas marítimas, y cualquier otro componente relevante. La oferta operativa está formada por un conjunto de operadores que proveen los servicios de transporte, tales como rutas de buses, empresas de camiones, aerolíneas, e incluso el automóvil particular, caminar, etc. La oferta operativa utiliza a la oferta física para proveer sus servicios.

El equilibrio entre demanda y oferta de transporte se alcanza mediante una combinación de dos elementos: precios y tiempo. Si la demanda sobrepasa la capacidad de un servicio, el precio del servicio puede aumentar, pero puede ser que el tiempo de viaje también se incremente. Por ejemplo, si el número de pasajeros que intenta abordar un servicio de buses sobrepasa su capacidad, los tiempos de espera se incrementarán. De manera similar, si el número de vehículos que intentan circular en una vía se acerca o sobrepasa la capacidad, se genera congestión, reduciendo la velocidad. En otras palabras, el tiempo es un componente importante en el equilibrio demanda-oferta del sistema de transporte.

El resultado de este equilibrio se sintetiza en el concepto de accesibilidad, que representa la fricción impuesta por el sistema de transporte que inhibe las interacciones entre actividades. En consecuencia, la accesibilidad retroalimenta al subsistema de actividades, afectando la localización e interacción y los precios de equilibrio en el mercado inmobiliario. Como se trata de una función de costos, la accesibilidad se llama también *desutilidad de transporte*.

Figura 2: Componentes principales del sistema usos del suelo-transporte



Como puede verse, actividades y transporte están concebidos como un sistema íntimamente interrelacionado con dependencias mutuas. La interacción entre actividades da lugar a la demanda por transporte, y el equilibrio en el transporte, a su vez, afecta la localización de actividades y los precios inmobiliarios. Adicionalmente, los dos componentes principales del modelo: actividades y transporte, se relacionan en una estructura dinámica: ambos se influyen a través del tiempo, como se indica en la Figura 3, con base en intervalos discretos representados como  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ , y así sucesivamente. Generalmente se asume que  $t_1$  corresponde a la situación actual o situación base, a partir de la cual se desarrollan diversos períodos a futuro.

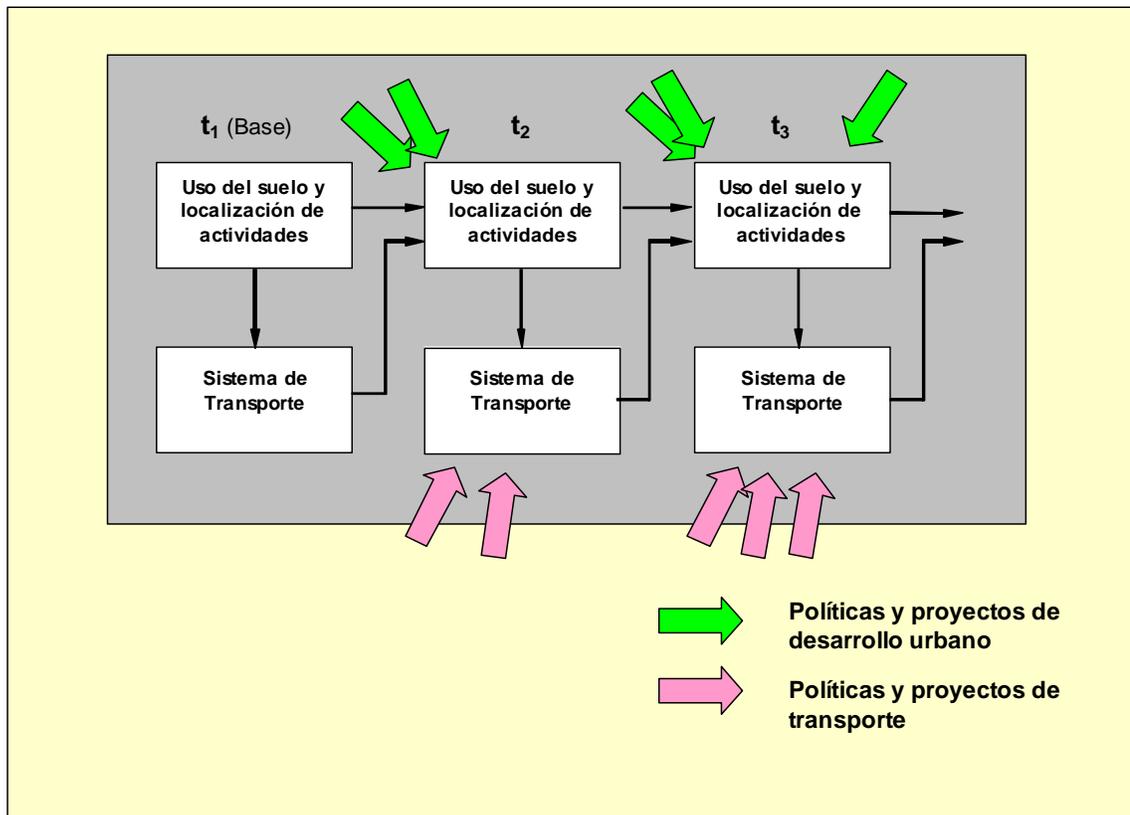
En términos generales, actividades y transporte se influyen mutuamente en el tiempo. En esta dinámica es importante distinguir entre efectos a corto plazo y efectos a largo plazo. Los efectos a corto plazo se representan en el mismo período, mientras los efectos a largo plazo tienen efecto en los períodos siguientes. Así, las actividades económicas localizadas en el espacio interactúan entre sí generando *flujos funcionales*, de los cuales se deriva la demanda de transporte. Este se considera como un efecto a corto plazo, de modo que la demanda se asigna a la oferta de transporte en el mismo período de tiempo. El equilibrio demanda/oferta de transporte determina las condiciones de accesibilidad entre zonas, e incide en los flujos económicos en el sistema de actividades. Esta retroalimentación, sin embargo, se considera como un efecto a largo plazo, y por lo tanto no ocurre en el mismo período, sino después de un *retardo* o *time-lag*. Por lo tanto, la accesibilidad en un período  $t_1$  afecta la distribución de los flujos en un período  $t_2$ . Como existen elementos de inercia en la localización de actividades entre un período y otro, los cambios en el sistema de transporte pueden tardar varios períodos para generar efectos significativos en la localización de actividades y el uso del suelo.

De esta manera, un cambio en el transporte, como una nueva autopista o un sistema de transporte masivo, tendrá un efecto inmediato a corto plazo en la demanda de viajes, pero sólo afectará los flujos económicos en el período siguiente a largo plazo. Por su parte, los cambios en el sistema de actividades, tales como incrementos de producción en determinados sectores, una nueva oferta de suelo o inversiones en edificios, tendrán un efecto inmediato a corto plazo sobre los flujos y la demanda de transporte.

Otro aspecto importante en la dinámica del sistema es la distinción entre eventos internos o *endógenos* y eventos externos o *exógenos*. Ambos afectan el comportamiento del sistema actividades-transporte en el tiempo. Así, por ejemplo, al crecer las actividades se generan diversos efectos endógenos sobre los usos del suelo, tales como incrementos en los valores de renta inmobiliaria. Al subir los precios inmobiliarios se pueden generar otros eventos endógenos, tales como el desplazamiento de algunas actividades que cambian su localización si los precios suben. De esta manera se pueden dar complejas cadenas de eventos endógenos. El modelo de usos del suelo, en este caso, simula estos múltiples eventos endógenos. Un cambio en las regulaciones urbanísticas, en cambio, tal como un cambio en las regulaciones urbanísticas, no puede ser estimado por el modelo, y por lo tanto debe ser introducido como un dato exógeno. La construcción de un conjunto residencial por parte del gobierno también puede ser considerado como un evento exógeno. Naturalmente que para la modelación estos elementos exógenos sólo pueden ocurrir en períodos futuros. En la figura están representados con unas flechas y denominados como ‘políticas y proyectos de desarrollo urbano’.

De igual manera en el transporte el crecimiento de la demanda puede generar cambios endógenos de diversa índole, como incrementos en la congestión, en los tiempos de espera, en las frecuencias de los servicios de transporte público, en la selección de modos y muchos otros. La construcción de una nueva vía, la puesta en operación de un medio de transporte masivo, la imposición de restricciones de velocidad, o cambios en las tarifas se consideran como eventos exógenos que deben ser dados al modelo. Están representados en la figura como ‘políticas y proyectos de transporte’.

**Figura 3: Relaciones dinámicas entre las actividades y el transporte**



La Figura 4 muestra las etapas principales en la secuencia de cálculo del modelo integral usos del suelo-transporte. La descripción comienza por el modelo de actividades y luego el de transporte. El proceso comienza por la localización de actividades que, como se describirá más adelante, está compuesto por la localización de la demanda final o producción exógena y la localización de la producción inducida. Luego de localizadas las actividades, se revisan las relaciones entre demanda y oferta en todos los sectores y zonas en que puedan estar limitadas, de particular relevancia para los consumos de suelo y edificaciones. Esto inicia un primer proceso iterativo para estimar precios de equilibrio que iguallen demanda y oferta.

Una vez el sistema de actividades ha llegado a un equilibrio, el modelo de usos del suelo produce como resultados la localización de actividades, los consumos de espacio y la renta inmobiliaria. Además produce un conjunto de matrices origen-destino con los flujos funcionales por sector de actividad. Estas matrices son un insumo para el modelo de transporte.

Los cálculos relativos a transporte comienzan con un proceso que se denomina *búsqueda de pasos*. El modelo toma como datos la descripción de la red, la oferta de servicios de transporte y una serie de parámetros adicionales tales como tarifas, costos de operación, valores del tiempo, preferencias, etc. Con base en esta información estima diversas opciones de viaje, que representan combinaciones de diferentes enlaces, modos y rutas para alcanzar un destino desde un origen.

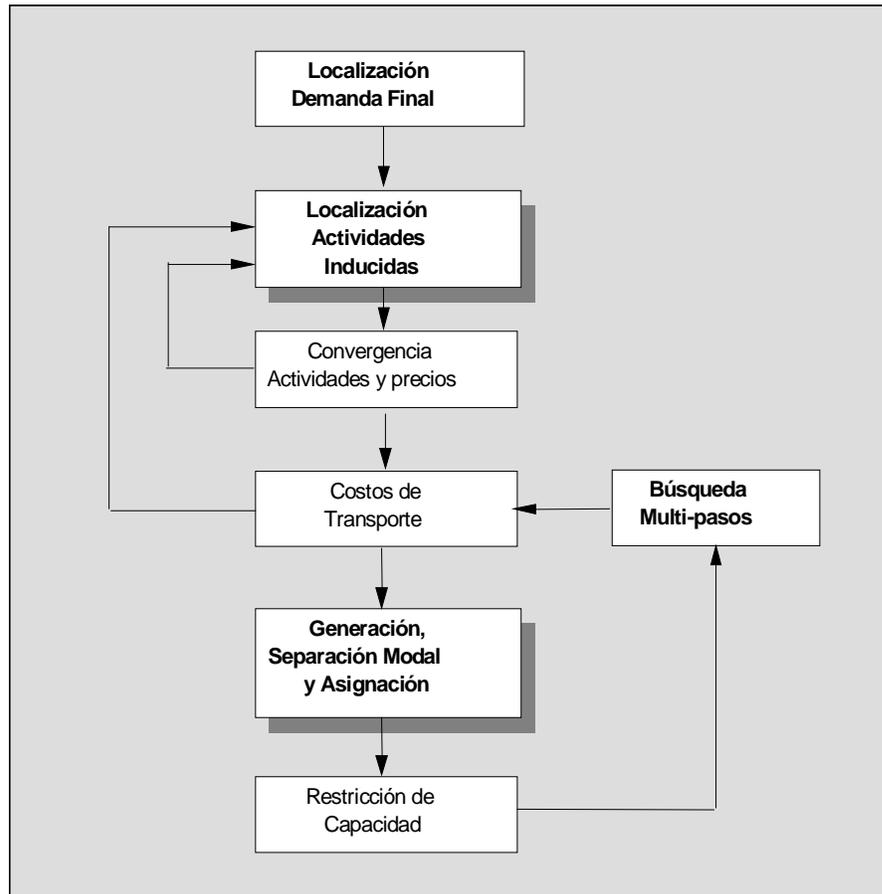
La siguiente etapa es la estimación de los costos detallados de cada opción intermodal de viaje. Aquí se calcula el costo monetario, la valoración del tiempo y otros componentes de la *desutilidad de transporte*. Con base en estas desutilidades se estima el número de viajes a realizar en función de los flujos funcionales y funciones elásticas de generación. Los viajes estimados pueden separarse en conjuntos modales, como transporte público y privado, pero esto es opcional ya que la asignación multimodal puede cumplir esta función. La asignación multimodal tiene por objeto distribuir probabilísticamente los viajes entre las opciones o pasos. El resultado es el número de viajes en cada combinación de enlace, modo y ruta de la red, y el consecuente número de vehículos.

La etapa final es la restricción de capacidad, que consiste en ajustar los tiempos de viaje y de espera en función de las relaciones entre el volumen asignado y la capacidad de la oferta. En Tranus este es un proceso complejo que representa diversos fenómenos. Cuando el número de vehículos asignados a un enlace se acerca a la capacidad del mismo, la velocidad de circulación se reduce, incrementando los tiempos de viaje. Además, puede llegar un punto en que comiencen a aparecer vehículos en cola, que generan retrasos no sólo en el enlace congestionado, sino además en los enlaces 'hacia atrás' o 'aguas arriba'. Una característica importante en la estimación de los retardos en la vía es que todos los vehículos que la comparten se ven afectados, no sólo los automóviles sino autobuses, camiones, etc.

La restricción de capacidad se aplica también a los pasajeros de los servicios de transporte público. Si el número de pasajeros se acerca a la capacidad de una ruta específica, el modelo incrementa los tiempos de espera, lo cual hace que dicha ruta sea menos atractiva en una iteración siguiente. El modelo calcula también el tiempo de detención de los vehículos de transporte público, en función del número de pasajeros que abordan o bajan de las unidades.

Los retardos por congestión y los incrementos en los tiempos de espera implican que cambian los costos y desutilidades de transporte. Por esta razón la secuencia de cálculo regresa a la etapa de cálculo de costos, repitiendo la generación, separación modal, asignación y restricción de capacidad. Este ciclo iterativo continúa hasta que el sistema converge al equilibrio. Como se mencionó, en un período de tiempo siguiente, las desutilidades de transporte resultantes afectan la localización de actividades.

En los párrafos a continuación se describen estos procesos en mayor detalle.

**Figura 4: Estructura general del sistema TRANUS**


### Localización de actividades

El modelo de localización de actividades es, básicamente, un modelo de insumo-producto espacial con sus relaciones de producción y consumo, dentro de una estructura muy general y flexible. Dentro de esta estructura, se puede definir un modelo complejo para representar al sistema económico y social, o un modelo simplificado en el cual sólo estén presentes los elementos fundamentales. La complejidad del modelo depende de los objetivos y alcances de la aplicación, los recursos disponibles y la información existente.

La estructura clásica de un modelo de insumo-producto, con sus elementos de demanda final, demanda intermedia e insumos primarios, se toma como punto de partida. El vector de demanda final representa a los destinatarios últimos de la producción. Usualmente en los modelos de insumo-producto la demanda final incluye al consumo privado, al consumo de gobierno, las exportaciones y las inversiones. El sistema económico debe producir las cantidades demandadas de cada sector, y para ello requiere insumos o demandas intermedias, lo que genera una cadena de producción y consumo. Además de los insumos intermedios, están los insumos primarios, formados normalmente por salarios, importaciones, ganancias e impuestos. La suma de la demanda final y las demandas intermedias es igual a la producción total del sistema, y de manera similar, la suma de las producciones intermedias y los insumos primarios debe ser igual a la producción total.

En Tranus los conceptos básicos del modelo de insumo-producto se han generalizado y espacializado. El término *sectores* es más amplio que en la versión tradicional, ya que puede representar a los clásicos sectores en que se divide la economía (agricultura, industria, minería, gobierno, etc.), factores de producción (capital, tierra y trabajo), como también grupos de población, empleo, construcciones, suelo, etc., que forman parte del sistema espacial. El número y tipo de sectores se define de acuerdo a los requerimientos de cada aplicación específica del modelo, así como las unidades más convenientes para medirlos, lo que permite adaptarlo a situaciones urbanas o regionales.

Una primera distinción entre sectores es la característica de ser *transportables* y *no-transportables*. La principal diferencia es que los sectores transportables pueden ser consumidos en lugares diferentes a donde se producen. Una demanda de carbón para una industria siderúrgica, por ejemplo, puede ser satisfecha por industrias mineras ubicadas en otras regiones. La demanda de mano de obra en un sector de una ciudad puede ser satisfecha por población residente en otras áreas de la ciudad. En cambio, el ejemplo más típico de un sector no-transportable es el suelo o las edificaciones, ya que éstos deben ser consumidos en el mismo lugar en donde son producidos. En consecuencia, los sectores transportables generan flujos o desplazamientos, ya sea de mercancías o personas, y estos flujos se pueden transformar luego en demanda de transporte. A su vez, para que se puedan dar estos desplazamientos, se requiere de facilidades de transporte, el cual impone costos al sistema productivo. Los sectores no-transportables, en cambio, no requieren transporte ni generan flujos.

Por otra parte, el modelo de localización distingue entre *zonas internas* y *zonas externas*, las cuales reciben un tratamiento diferente. Las zonas internas conforman lo que se denomina 'el área en estudio', entre las cuales se dan todas las relaciones socioeconómicas y de transporte. Las zonas externas, en cambio, están restringidas a representar algunas relaciones del área en estudio con otras áreas, como son las importaciones y exportaciones. Estas pueden ser de bienes o de personas, como es el caso de la demanda laboral del área de estudio que se satisface con residentes de fuera. También se pueden definir zonas externas sólo para ser utilizadas en el modelo de transporte en la representación de viajes externos y de paso.

Cada sector localizado en zonas específicas tiene asociadas diversas variables que lo caracterizan, las cuales se describen a continuación.

### ***Producción Exógena***

Es la producción no generada por las demandas internas de otros sectores, y es equivalente a la demanda final en los modelos de insumo-producto. Su localización no depende de los mecanismos que simula el modelo, sino de decisiones de política o de elementos no modelados externos al sistema de análisis. Dicha producción, sin embargo, demanda insumos del sistema. El crecimiento entre períodos se realiza por un modelo incremental, bien sea asignado directamente a sectores y zonas o mediante la distribución espacial de un incremento global dado.

### ***Producción Inducida***

Es la producción de un sector generada dentro del área de estudio, destinada a cubrir la demanda interna o externa de otros sectores. Su distribución espacial-sectorial la realiza el modelo y el crecimiento depende del crecimiento de los sectores que la demandan.

### ***Demanda Exógena***

Es posible incluir demanda adicional a la que generan las actividades del sistema. Si esta demanda proviene del exterior, el modelo la trata como *exportación*, de tal manera que el término *demanda exógena*, en el modelo, aplica exclusivamente a la que ocurre dentro del área de estudio. La demanda exógena se distribuye conjuntamente con la demanda inducida. El crecimiento entre un período y otro lo realiza el modelo incremental.

### ***Demanda Inducida***

Corresponde a las necesidades de consumo final o intermedio de las actividades internas al sistema de análisis.

### ***Exportaciones***

Las exportaciones se definen como producción interna del área de estudio dirigida al consumo en las zonas externas (demanda exógena en zonas externas).

### ***Importaciones***

Las importaciones se definen como demanda de las zonas internas que se satisface con producción proveniente de zonas externas. Las importaciones compiten con la producción interna, aunque pueden estar limitadas a un dato exógeno que se modifica entre períodos con el modelo incremental.

### ***Capacidad de Producción***

La producción total (exógena + inducida) en un sector y zona determinada puede estar limitada a cierta capacidad de producción. Puede haber capacidad máxima, mínima o ambas a la vez. También se denomina *restricción* a la producción.

### ***Costo de Consumo***

Es el costo unitario de un sector en la zona de consumo (CIF). Depende de su precio en la zona de producción y del costo de transporte a la zona de consumo.

### ***Costo de Producción***

Es el costo unitario de un sector en la zona de producción (FOB); es función del costo de consumo de los insumos más el valor agregado.

### ***Precio de Equilibrio***

Es el valor que puede alcanzar un sector en una zona donde su capacidad de producción está restringida. Si no hay restricciones, el precio es igual al costo de producción. Cuando la demanda es mayor que la capacidad de producción, el precio se incrementa, generando una ganancia al productor o renta de escasez. En el caso contrario, cuando la demanda es menor que la capacidad mínima de producción, el precio del sector baja, pudiendo significar pérdida a los productores.

### ***Valor Agregado***

Es el valor del capital y trabajo adicional a los insumos necesarios para obtener una unidad de producción. Típicamente se incluyen las remuneraciones al capital y al trabajo, impuestos o subsidios, consumo de capital fijo, amortización de equipos, etc.

### ***Costo de Transporte***

Es el gasto monetario de transporte de una unidad de producción de un sector desde la zona de producción a la de consumo, proveniente del modelo de transporte. Para el caso de las mercancías, el costo de transporte es un costo unitario, pero para otros sectores, por ejemplo, residentes, representa el gasto total (mensual o anual).

### ***Desutilidad de Transporte***

Proviene del modelo de transporte. Además del costo monetario de viaje, incluye el valor del tiempo y factores subjetivos. La desutilidad siempre ingresa al modelo de actividades como un valor unitario, es decir, por viaje. Incide en la distribución sectorial-espacial de la producción.

## **Demanda y distribución de la producción**

En principio, todo sector requiere insumos de otros sectores. Por lo tanto, la producción se destina en parte al consumo intermedio, y otra parte va directamente al consumo final, bien sea interno o externo (exportaciones). Dada cierta demanda final localizada de uno o más sectores el modelo determina la producción inducida a través de *funciones de demanda*, y la localiza espacialmente mediante funciones de distribución. A la vez, los sectores inducidos demandan insumos, generándose una cadena de producción y de localización de actividades.

De las relaciones antes descritas, se derivan transacciones económicas, que dan origen a *flujos funcionales*, cuando la producción y el consumo ocurren en distintas zonas. Se trata de flujos de personas y de bienes o servicios *transportables*, de los cuales se deriva la demanda de transporte. En algunas transacciones intervienen bienes *no transportables*, como el consumo de suelo o de edificaciones, lo cual implica un intercambio económico pero no flujos espaciales. Cada sector puede efectuar distintas transacciones y dar origen a diversos tipos

de flujos. Una industria, por ejemplo, requiere consumir suelo y edificaciones (no transportables), lo cual genera sólo un intercambio económico; pero requiere también materias primas y mano de obra (transportables), cuyo traslado genera demanda de transporte.

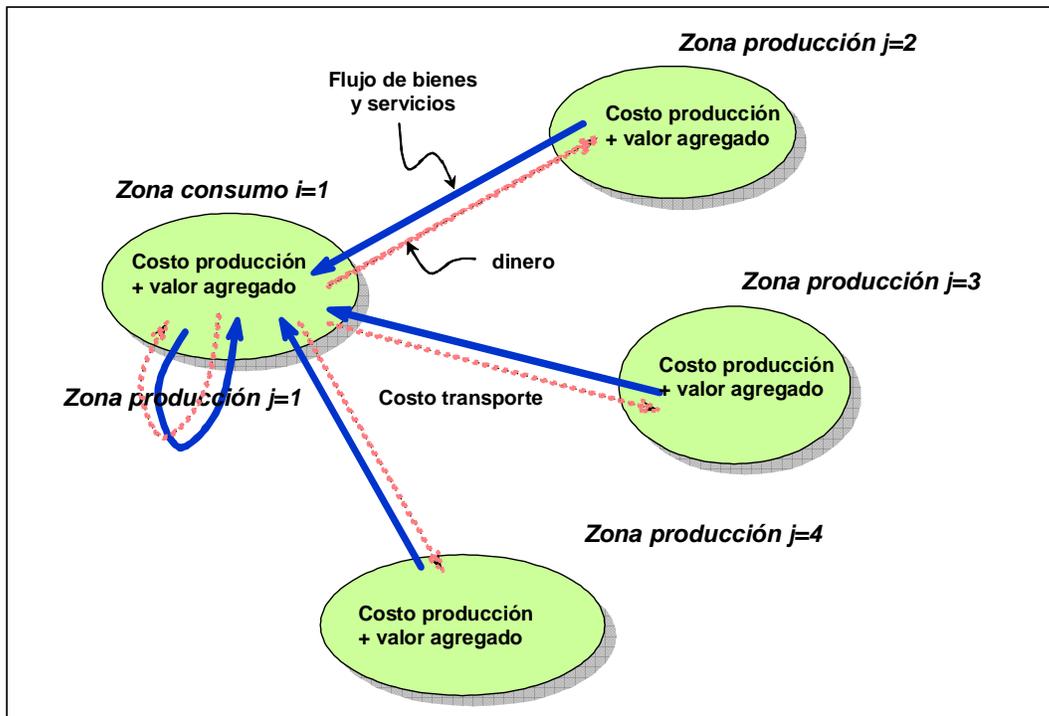
Como puede verse en el gráfico de la Figura 5, en una transacción hay una zona de consumo y una o varias zonas de producción, pudiendo ocurrir que la misma zona de consumo sea a la vez zona de producción. El modelo distribuye las compras de manera probabilística (con un modelo de decisiones discreto) entre las zonas que producen el sector demandado. En el diagrama, las flechas indican el sentido en que se mueve la producción, pero el dinero fluye en sentido contrario.

Los resultados de las transacciones entre sectores transportables son matrices de *flujos*, que dan origen a la demanda de viajes. Por ejemplo, la generación de población por el empleo da lugar a demanda de viajes al trabajo, y las transacciones entre sectores productivos dan origen a movimientos de carga. El analista escoge libremente las unidades en que se miden los flujos: monetarias, físicas, personas, toneladas o cualquier otra.

El modelo lleva un registro de los costos de las transacciones. El costo de una unidad de producción de un sector es el costo de los insumos más el valor agregado a la producción. Si hay restricciones a la producción en alguna zona, el modelo calcula un *precio de equilibrio* en función a la oferta y la demanda, el cual puede resultar mayor o menor que el costo de producción. Típicamente el suelo y la superficie construida están restringidos por las regulaciones existentes, además de las restricciones físico-espaciales.

El modelo permite una representación explícita de importaciones y exportaciones, las cuales sólo pueden ocurrir desde o hacia zonas externas. La exportación representa una demanda localizada fuera del área de estudio que induce producción dentro de ella. La importación, por contraste, representa una demanda dentro del área de estudio que se satisface con productos de zonas externas; esta transacción, por lo tanto, no induce producción interna.

**Figura 5: Relaciones de producción y consumo**



La distribución espacial de la demanda desde una zona de consumo a las zonas de producción se realiza mediante un modelo logit o powit, en el cual la función de utilidad incluye el precio del sector demandado y la desutilidad de transporte entre ambas zonas. Es posible añadir *funciones de atracción* a la distribución, las cuales pueden incluir cualquier variable definida en el modelo y parámetros exógenos para representar elementos no modelados que afectan la distribución (por ejemplo, factores ambientales).

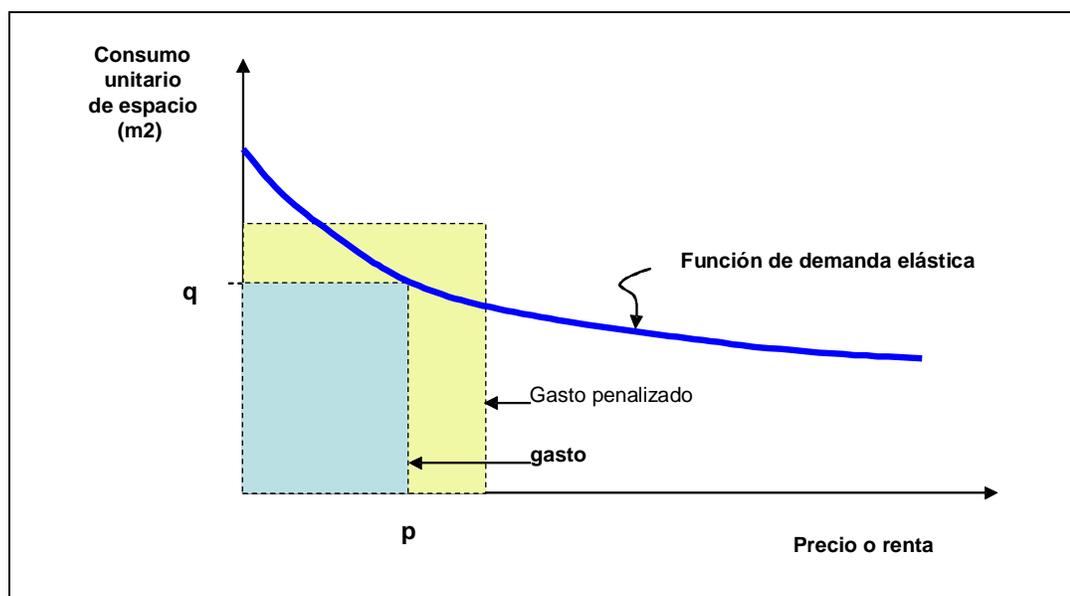
El modelo de insumo-producto espacial se complementa con un modelo incremental, el cual estima los crecimientos de las variables exógenas básicas entre un período de simulación y el siguiente. El crecimiento (positivo o negativo) se puede ingresar en zonas específicas o como un monto global para el área de estudio. En este caso, el modelo aplica una función de distribución para asignar la cuota de crecimiento a cada zona.

El modelo toma como punto de partida las actividades localizadas y las desutilidades de transporte de un período anterior. Inicia la ejecución con el modelo incremental, para distribuir el crecimiento de las variables básicas o exógenas respecto a un período anterior. Luego calcula las funciones de atracción e inicia un proceso iterativo de dos fases: estimación de la demanda por sector y zona de consumo y distribución de esa demanda a las zonas de producción. Seguidamente, se lleva a cabo la verificación de las restricciones a la producción en cada zona y el ajuste correspondiente en los precios. Por último, se calcula la convergencia del modelo por la diferencia entre una iteración y la anterior en las actividades localizadas y en los precios. El proceso iterativo se repite hasta que la convergencia cumpla con un criterio establecido.

Para el consumo de suelo y edificaciones se utilizan funciones elásticas, como la que se presenta en la Figura 6. La función relaciona la cantidad de suelo consumida por una actividad y su precio. Si el precio del suelo aumenta, cada actividad consume menos cantidades de suelo, es decir, aumenta la densidad de ocupación del mismo. Así, si el precio es  $p_i$ , la cantidad de suelo a consumir es  $q_i$ . Si a su vez se multiplica la cantidad consumida por el precio se obtiene el *gasto*, indicado en la figura como el área sombreada.

Si en una zona determinada hay varios tipos de suelo, el modelo supone que las actividades las consideran como opciones. Para cada opción se aplican las funciones elásticas descritas y se deduce el gasto correspondiente. El gasto, ponderado por factores de preferencias, forma parte de la función de utilidad del modelo logit o powit que se aplica para determinar la probabilidad de que cada actividad se distribuya entre los distintos tipos de suelo disponibles.

**Figura 6: Ejemplo de función elástica de consumo de suelo**



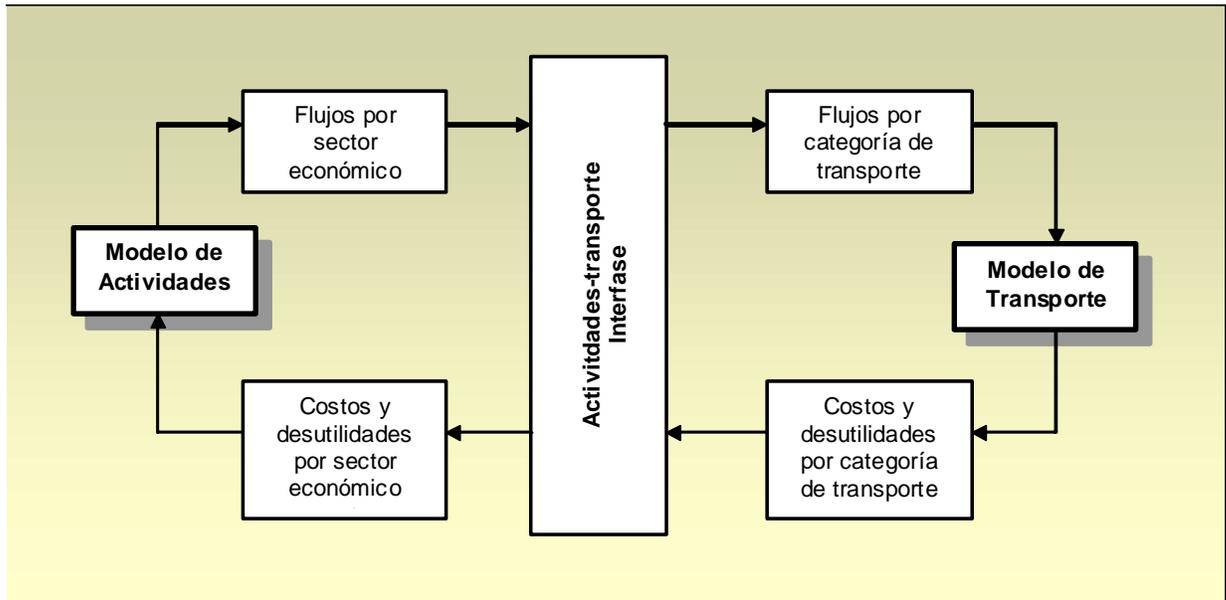
Para aplicaciones simples, la descripción del modelo contenida en los párrafos anteriores podría parecer excesivamente compleja, porque abarca el potencial que se ofrece. Pero buena parte de los elementos descritos son opcionales, constituyen posibilidades que pueden ser ignoradas si no se les requiere o si no se dispone de la información necesaria. El diseño del sistema permite estructurar aplicaciones extremadamente sencillas, pero también pone a disposición los elementos necesarios para realizar aplicaciones de gran complejidad.

## Interfaz actividades/transporte

Como resultado del proceso de localización de actividades se obtiene un conjunto de matrices de flujos entre sectores transportables. En la interfase actividades/transporte se deriva la demanda de transporte a partir de los flujos socioeconómicos. El proceso general de la interfaz es el que se describe en la Figura 7. Hay varios tipos de conversión que dependen de la aplicación. Entre ellas están las siguientes:

- Formación de categorías de transporte a partir de los flujos económicos. Para ello se define la proporción de volumen transportable de cada categoría que una unidad de flujo genera. Por ejemplo, los flujos entre un sector industrial y uno comercial pueden generar cierta proporción de carga pesada, otra de carga liviana, e incluso cierta proporción de pasajeros (viajes de negocios).
- Conversión de las unidades de medida utilizadas en el modelo de localización a las que se utilizan en el modelo de transporte, si hubiese diferencias. Por ejemplo, si se han simulado flujos monetarios entre sectores productivos, habrá que aplicar factores valor-volumen para obtener toneladas de producto transportable por categoría.
- Conversión de las unidades de tiempo utilizadas en el modelo de localización a las que apliquen en el modelo de transporte, si hubiese diferencias. Por ejemplo, en un modelo típico de insumo-producto se suele simular la demanda y la producción anual; en cambio el modelo de transporte simula los viajes diarios o en hora pico.
- Determinación del sentido (origen-destino) del volumen movilizado en relación con el sentido de las transacciones. Los flujos socioeconómicos siempre se originan en la zona de consumo y se dirigen a la zona de producción (flujos de compra). El sentido de la movilización que generan algunos sectores puede tener ese mismo sentido, en cuyo caso no se requiere conversión, mientras otros sectores generan movilización en sentido contrario, como es el caso de la carga que se dirige desde el lugar de producción al de consumo. Algunos sectores pueden generar movimientos en ambos sentidos en distintas proporciones (viajes diarios de personas).
- Inclusión de viajes exógenos, no simulados por el modelo, por ejemplo, viajes de paso. Estos se ingresan por categoría de transporte o por categoría y modo, con indicación del origen y destino de los viajes.

Los puntos anteriores describen las transformaciones necesarias para simular el sistema de transporte en un determinado período a partir de los resultados de la localización de actividades. Los resultados del modelo de transporte determinan la accesibilidad, que es necesaria para simular la localización de actividades en un período siguiente. Por tanto, es preciso realizar las transformaciones inversas a las descritas para asignar los costos y desutilidades de viaje de cada categoría de transporte a los sectores económicos que las generaron. La interfase actividades/transporte interpreta los parámetros de transformación en el sentido requerido para cada caso.

**Figura 7: Interfaz Actividades - Transporte**


### El sistema de transporte

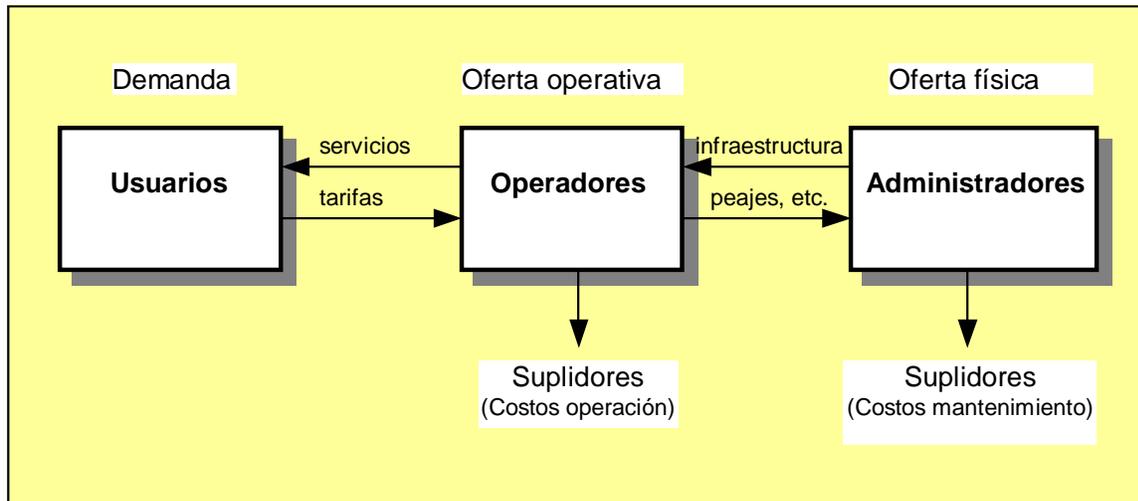
La interfaz actividades-transporte produce un conjunto de matrices con la *demanda potencial* de transporte y posibles viajes exógenos. Sobre esta base, el modelo de transporte deriva los viajes, estima su distribución en modos y los asigna a la oferta.

En el sistema de transporte se distinguen dos componentes principales: demanda y oferta. La demanda está formada por los usuarios, que son las personas, familias o empresas que demandan el servicio de transporte de carga o de pasajeros. En cuanto a la oferta, se puede distinguir en primer lugar la **oferta física** (vías, estacionamientos, estaciones, puertos) la cual tiene una administración encargada de su mantenimiento y que puede cobrar por su uso. Por otra parte, está la **oferta operativa**, representada por los transportistas privados o públicos, que disponen de distintos tipos de vehículo, pueden cobrar tarifas a los usuarios y pagan a los administradores por el uso de la infraestructura.

En la Figura 8 se muestra el esquema general de las relaciones económicas que se dan entre los distintos agentes descritos. Los usuarios demandan servicios de transporte a los operadores, por lo cual les pagan tarifas. Los operadores le cobran a los usuarios y, a su vez, tienen costos de operación y pueden pagar por el uso de la infraestructura. Los administradores de la infraestructura pueden cobrar a los operadores y pagan a suplidores por su mantenimiento.

El esquema general planteado puede adoptar formas específicas según los casos. El transporte particular, por ejemplo, es un caso especial en que el usuario de automóvil es su propio operador. El transporte ferroviario es otro caso en que, generalmente, un mismo agente funge de operador y administrador del sistema. Sin embargo, en ambos casos el modelo los considera en la contabilidad como entes separados. Los pagos pueden ser directos o indirectos; los peajes, por ejemplo son pagos directos de los operadores a los administradores de las vías, aunque en algunos casos este cobro puede darse indirectamente como impuesto al combustible.

Figura 8: Elementos del sistema de transporte



La primera tarea del modelo de transporte es la búsqueda de los *pasos* que conectan cada par origen-destino por cada *modo de transporte*. Los modos, a su vez, pueden estar constituidos por varios *operadores de transporte*; entre los cuales los usuarios pueden transferirse. En una aplicación típica se definen tres modos: carga, transporte público y transporte privado. A su vez, la carga puede estar compuesta de los operadores camiones livianos, camiones pesados y ferrocarril; el transporte público puede estar formado de autobuses, metro y trenes de pasajeros. Las mercancías pueden transferirse desde camiones livianos a trenes y terminar su viaje en camiones pesados, pudiendo haber costos y tiempos de trasbordo. Los pasajeros pueden transferirse de autobús a metro, o cualquier otra combinación factible. A los operadores de transporte público se le pueden asignar *rutas*, con sus recorridos específicos, frecuencias y paradas.

El modelo construye los pasos a partir de la *red de transporte*, definida por un grafo direccional en el cual cada enlace tiene asignado un conjunto de características: tipo de vía, distancia, capacidad, rutas de transporte público y giros prohibidos o retardos en los giros. A su vez cada tipo de vía tiene un *administrador* que se encarga de su mantenimiento, y una serie de atributos comunes para cada operador que puede utilizarlo: velocidad, cargos (peajes, estacionamientos) costo de operación y vehículos equivalentes.

Los pasos no son simplemente rutas físicas entre pares origen-destino, sino secuencias enlace-operador o enlace-ruta que conforman itinerarios de viaje, de tal manera que puede haber dos pasos distintos que sigan una secuencia de enlaces idéntica pero rutas diferentes. A lo largo de un paso puede haber transbordos entre operadores y rutas, lo cual agrega al costo el tiempo de espera y tarifas adicionales. Un procedimiento denominado *búsqueda multidimensional*, exclusivo del sistema Tranus, evita la codificación separada de las redes de transporte público, y produce como resultado las múltiples opciones de viajar entre cada par O-D ordenadas por el costo generalizado al usuario, el cual incluye: tarifas, valorización de los tiempos de viaje y de espera y penalizaciones subjetivas. El algoritmo permite la inclusión de prohibiciones de giro y/o demoras en las intersecciones, y de tarifas especiales entre sistemas integrados de transporte, tales como las de un metro con sus autobuses alimentadores. También es posible incluir tarifas diferenciales por categoría de demanda, como sería el caso de estudiantes o tercera edad.

La representación interna de la red corresponde a un *grafo dual*, que el modelo construye automáticamente a partir del grafo codificado por el analista, según una técnica desarrollada exclusivamente para Tranus. En el grafo dual, los vértices o nodos representan los tramos viales y los enlaces representan las conexiones factibles. Ello facilita la codificación de giros prohibidos sin necesidad de expandir nodos y agregar enlaces ficticios a la red. La representación dual es completamente transparente para el usuario, pues terminado el proceso, el modelo

traduce los resultados a la codificación original, libre de enlaces ficticios. Estos resultados se presentan tanto en forma numérica como en gráficos a todo color, con múltiples opciones de revisión e impresión.

Otra característica del algoritmo de búsqueda de pasos se denomina *control de solapes (overlapping control)*; que resuelve el conocido problema de los modelos logit multinomiales relacionado con la *correlación de atributos entre opciones*. El método lleva cuenta de las coincidencias en la secuencia de cada paso para descartar los que no representan una verdadera opción alternativa, sino una pequeña variante. Como resultado, los  $n$  pasos resultantes serán opciones claramente diferenciadas, tal como las perciben los usuarios en la realidad. Esta información la utiliza también el algoritmo de asignación en la estimación de las probabilidades de selección de pasos. La búsqueda de pasos y el modelo de asignación probabilística son totalmente consistentes con la teoría de utilidad aleatoria, aspecto que otros modelos no pueden garantizar. Adicionalmente, Tranus garantiza que en redes perfectamente simétricas, los pasos resultantes serán igualmente simétricos.

En la Figura 9 se ilustra un ejemplo de paso multimodal. La opción incluye 11 enlaces físicos y tres operadores (peatón, autobús y metro). Los viajeros que seleccionan este paso caminan a la parada para tomar el autobús; luego bajan de éste y caminan a la estación para abordar el metro; finalmente caminan hasta el destino del viaje. Naturalmente esta es una opción entre un conjunto de opciones disponibles, tal como se muestra en la Figura 10.

**Figura 9: Ejemplo de un paso multimodal**

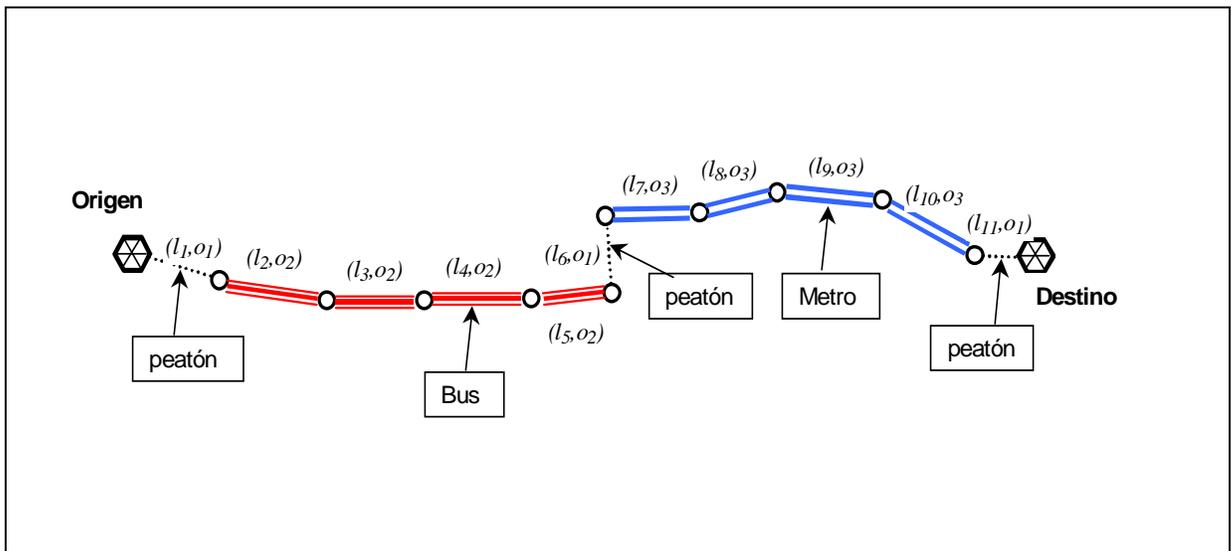
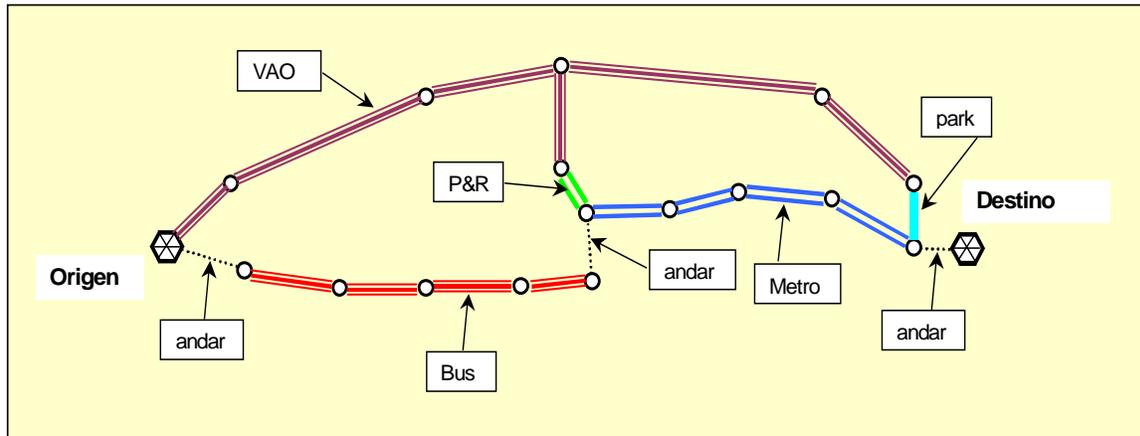


Figura 10: Ejemplo de un conjunto de pasos multimodales



Terminada la búsqueda de pasos, el modelo de transporte empieza un proceso iterativo, que se inicia con el cálculo de los costos y desutilidades. En primer lugar, al nivel de pasos, luego al nivel de modos y, finalmente al nivel de zonas. El modelo calcula el costo compuesto de un modo entre determinado por O-D, a partir de las desutilidades de los pasos disponibles para dicho modo. En la misma forma se calcula la *accesibilidad* global entre un par de zonas con el costo compuesto de los modos disponibles.

Una vez se cuenta con toda la serie de costos, el modelo estima la demanda de transporte en tres fases: generación de viajes, separación modal y asignación a la red. Un submodelo de generación elástica, estima los viajes (diarios u horarios) que se derivan de la demanda potencial proveniente de la localización de actividades. Cada categoría de transporte tiene distinta elasticidad respecto a la desutilidad de viajar entre un par de zonas; por ejemplo, los viajes al trabajo, que deben realizarse diariamente, son menos elásticos que los viajes de compras. Con estas elasticidades y desutilidades, la función de generación estima la demanda de viajes entre cada par origen-destino por categoría de transporte, para el período de análisis.

La elasticidad en la generación implica que algunos viajes dejan de realizarse por efecto de la congestión. Estos viajes constituyen una *demanda reprimida*, la cual Tranus reporta y es un elemento importante en la evaluación. Por otra parte, la introducción de una mejora o un nuevo sistema de transporte, induce nuevos viajes que antes no se realizaban, lo que se denomina *demanda inducida*.

El siguiente proceso en la secuencia de cálculo es la distribución de los viajes generados entre los distintos modos de transporte. Como se ha mencionado, este proceso es opcional, ya que el reparto modal puede realizarse simultáneamente con la asignación. La separación modal se realiza con un modelo multinomial logit/powit, utilizando la desutilidad de los modos. Cada categoría de transporte tiene acceso a determinados modos. Los viajes de mercancías, por ejemplo, sólo pueden escoger modos de carga, mientras que las personas escogen entre modos de pasajeros. Las categorías de personas pueden tener cierta *disponibilidad vehicular*, que es la proporción de viajeros que puede disponer de un vehículo particular, caso en el cual pueden escoger entre utilizarlo o realizar sus viajes en transporte público. La proporción de viajeros que no dispone de vehículo es *cautiva del transporte público*, y sólo puede optar por las modalidades que este ofrezca. También es posible declarar que todas las categorías de personas tienen acceso al automóvil 100%, pero cada categoría tiene determinadas preferencias.

La demanda por modos también se asigna a la red de transporte con un modelo logit/powit multinomial. El modelo calcula la probabilidad de cada paso disponible entre un par O-D. Como los pasos son secuencias de enlaces y operadores o rutas, los viajeros se asignan a combinaciones enlace/operador o enlace/ruta en función de los costos generalizados de las opciones, compensados por su grado de independencia o solape. La combinación entre la separación modal y la asignación equivale a un modelo jerarquizado en dos niveles, anidados por

los costos compuestos. La diferencia es que el segundo nivel se realiza en la red, lo que permite manejar múltiples combinaciones de submodos, operadores y rutas, lo cual no es posible con la separación modal jerárquica tradicional. Más aún, dado el carácter multimodal de la asignación, es posible realizar el procedimiento de reparto modal enteramente en la red, con lo cual la etapa anterior de distribución de la demanda por modos puede obviarse completamente.

La asignación puede incluir además una estimación de los vehículos que retornan vacíos. Estos se calculan mediante un parámetro de *consolidación* que controla la proporción de vehículos que puede atraer carga en su viaje de retorno, dependiendo de la demanda en sentido inverso al viaje original.

De acuerdo a las *tasas de ocupación vehicular*, los viajes asignados a los pasos implican un determinado número de vehículos de cada operador en la red. En el caso de transporte público con rutas, el número de vehículos es función de la frecuencia de las rutas, independiente del número de pasajeros que lleven. Con el fin de evaluar el nivel de congestión en los distintos enlaces, se utilizan factores de equivalencia por operador y tipo de vía para calcular el volumen total de tráfico en *vehículos equivalentes* que es la unidad en que se mide la capacidad vial.

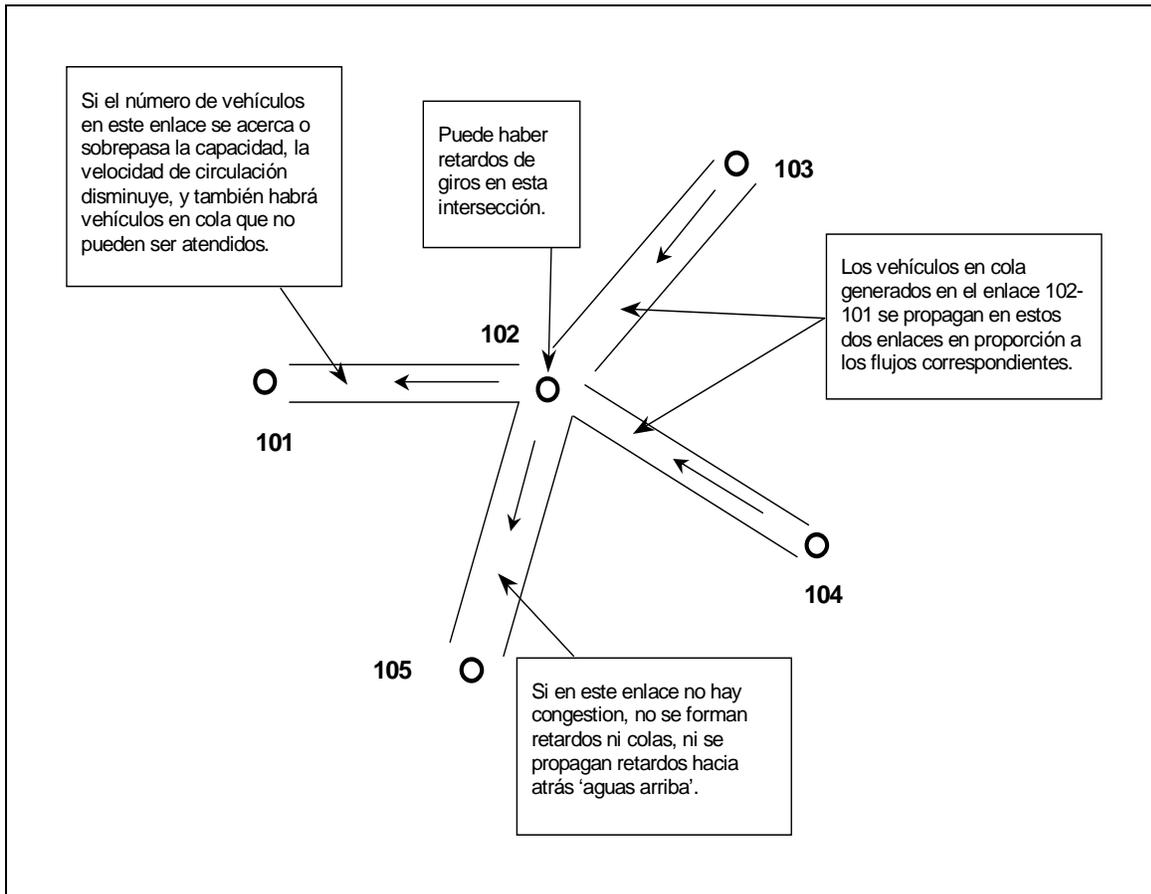
La última etapa del proceso iterativo es la restricción de capacidad, en el cual se mide el efecto de la congestión y se afectan, en consecuencia, las velocidades de circulación y los tiempos de espera por cada operador. En este proceso, el modelo incorpora la formulación de la *teoría de colas* en términos de tráfico, lo cual hace que la congestión de un enlace se transmita 'aguas arriba' a los que lo preceden, afectando la velocidad de los mismos. En cuanto al transporte público, la cola incide en el tiempo de espera.

La Figura 11 ilustra los principales componentes de la restricción de capacidad de los vehículos en las vías, con un ejemplo simplificado. Allí se muestran dos enlaces que convergen en la intersección 102 del cual parten otros dos enlaces, todos unidireccionales. Cuando el volumen asignado al enlace 102-101 se aproxima a la capacidad, se producen los siguientes fenómenos:

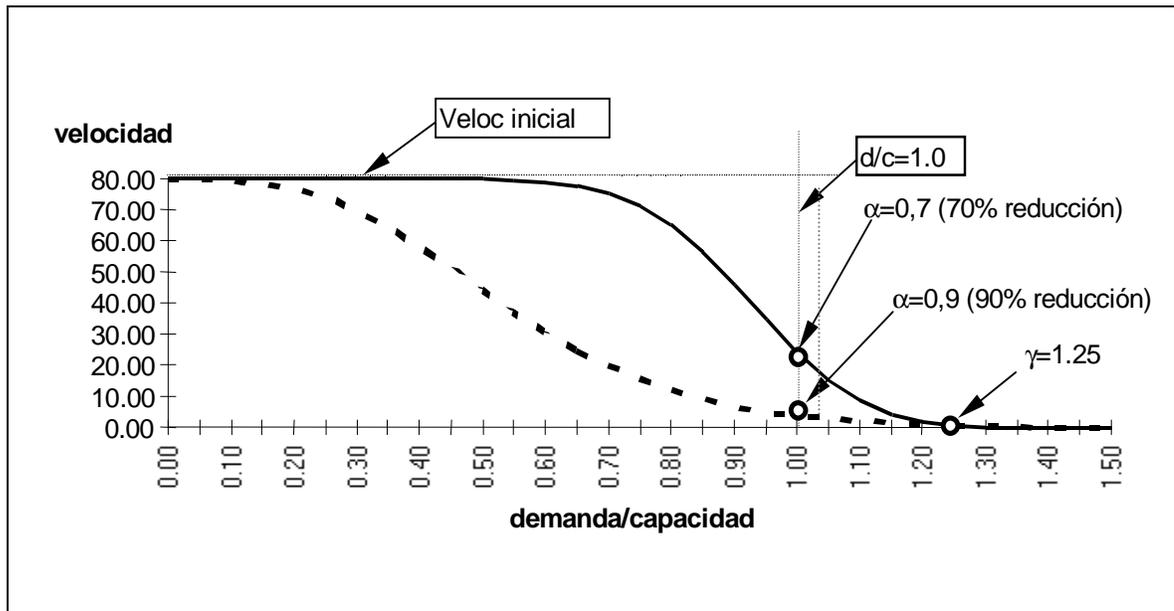
- La velocidad de circulación en el enlace 102-101 disminuye
- Habrá cierto número de vehículos en el enlace 102-101 que están en cola
- La cola en el enlace 102-101 se 'propaga' hacia los enlaces que lo preceden, es decir, en los enlaces 103-102 y 104-102, en proporción a los tráficos correspondientes.

En este último caso, si el flujo de vehículos que transita por el enlace congestionado 102-101 proviene mayoritariamente del enlace 103-102, el retardo propagado será mayor que en el enlace 104-102.

Figura 11: Restricción de capacidad en la vía



Por su parte, en la Figura 12 se muestra la forma general que adoptan las curvas de restricción de velocidad en cada tramo de la red, también conocidas como *curvas flujo-demora*. En la gráfica se muestran dos curvas correspondientes a tipos de vía diferentes. En ambos casos la velocidad a flujo-libre comienza en 80 Km/h. A medida que el flujo de vehículos en el enlace se incrementa, comienza a aumentar también la relación demanda/capacidad, y como consecuencia la velocidad de circulación comienza a disminuir. Si se trata de una vía de alta capacidad con carriles múltiples, se utilizan curvas como la representada en línea llena, según la cual a medida que aumenta la relación V/C la velocidad disminuye pero lentamente. La línea punteada ilustra el caso de vías de menor capacidad y con un solo carril por sentido, caso en el cual la reducción en la velocidad es más rápida. Cuando la demanda alcanza la capacidad, es decir, cuando la relación  $V/C = 1$ , el modelo especifica un porcentaje de reducción, 70% en un caso y 90% en el otro. De allí en adelante la velocidad se reduce rápidamente.

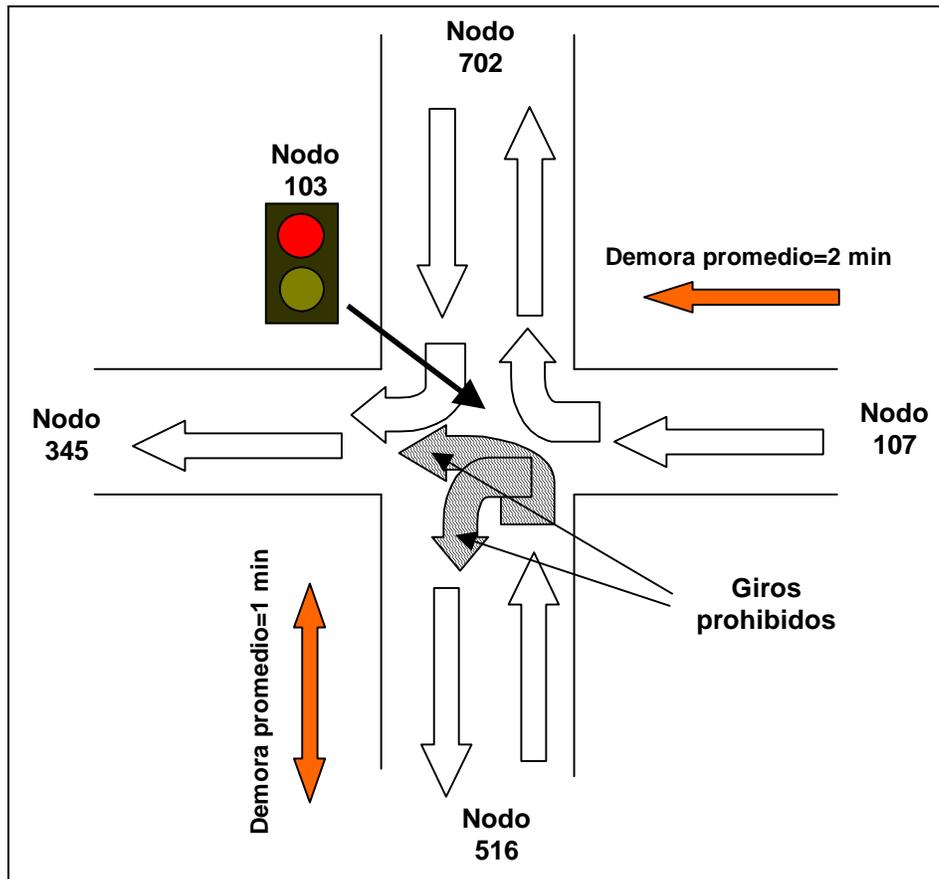
**Figura 12: Función de reducción de velocidad por congestión**


Opcionalmente, es posible especificar demoras en determinados giros. Esto es particularmente útil para representar intersecciones con semáforos y otro tipo de demoras como las que se producen en la entrada de los puertos, estaciones de peaje o tiempo de carga y descarga.

En la base de datos de Tranus se ingresa la demora promedio que impone a cada giro la programación de las fases del ciclo del semáforo. En el diagrama de la Figura 13 se muestra una intersección señalizada codificada como nodo 103. La demora promedio es de dos minutos (0,033Hr.) para la vía unidireccional este-oeste, y un minuto (0,017 Hr.) para la vía bidireccional norte-sur. Los giros hacia la izquierda están prohibidos.

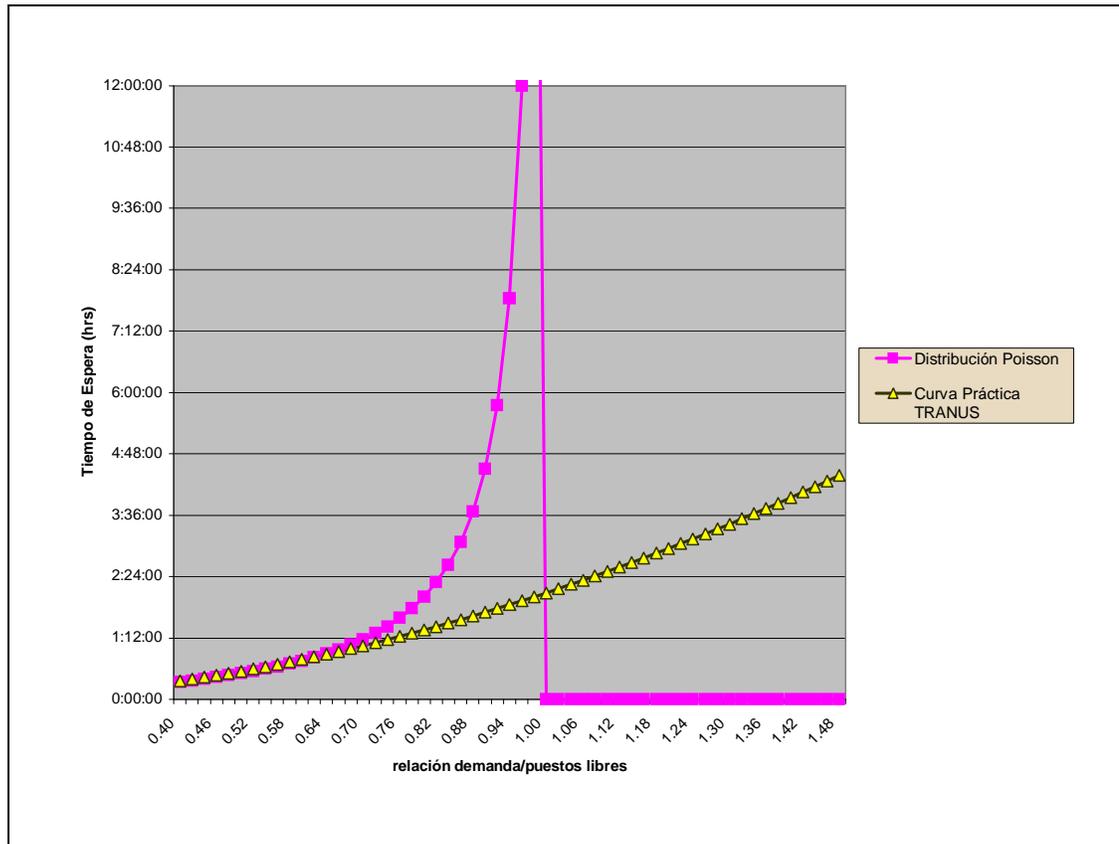
La parte inferior del diagrama muestra los giros posibles en la intersección y sus correspondientes demoras. Por ejemplo, desde el enlace 107-103 no se puede girar hacia el nodo 516 (demora infinita); sí se puede girar al nodo 702 con una espera promedio de 2 minutos. La demora se agrega al tiempo de viaje, y afecta a todos los vehículos (autos, autobuses, camiones) asignados a la red multimodal de Tranus.

Figura 13: Demora en intersecciones



Nodo origen	Nodo Destino	Giro al nodo	Demora (horas)
107	103	702	0.033
107	103	345	0.033
107	103	516	Infinita
516	103	702	0.016
516	103	345	Infinita
702	103	516	0.016
702	103	345	0.016

Como se mencionó, la restricción de capacidad incluye también el ajuste de los tiempos de espera en las unidades de transporte público, el cual se incrementa en la medida que el número de pasajeros se acerca a la capacidad del servicio. Este cálculo se basa en teoría de colas, pero en el modelo se adoptan curvas prácticas, tal como se ilustra en la Figura 14. Cuando la relación demanda/puestos libres en las unidades es muy baja, sólo aplica un tiempo de espera base, que en la mayoría de los casos es función de la frecuencia de los servicios. A medida que el número de pasajeros que intenta abordar un servicio se incrementa, el tiempo de espera comienza a aumentar. Según las curvas Poisson que se derivan de teoría de colas, cuando la demanda se hace igual a la capacidad el tiempo de espera se hace infinito. Para evitar esto en el modelo se adoptan las curvas prácticas, que si bien incrementan los tiempos de espera significativamente, permiten que el proceso de ajuste se realice dentro de los ciclos iterativos.

**Figura 14: Distribución de los tiempos de espera**


### ***Oferta de Transporte Público***

Al final de cada iteración el modelo incluye un modelo de oferta de transporte público, en el cual se ajustan las frecuencias de cada ruta en función de los perfiles de demanda. Si la demanda supera la capacidad de una ruta, el tiempo de espera se incrementa, tal como ha sido descrito. Pero también puede ocurrir que el operador de la ruta decida incrementar la capacidad incrementando la frecuencia, si es que esto le resulta conveniente.

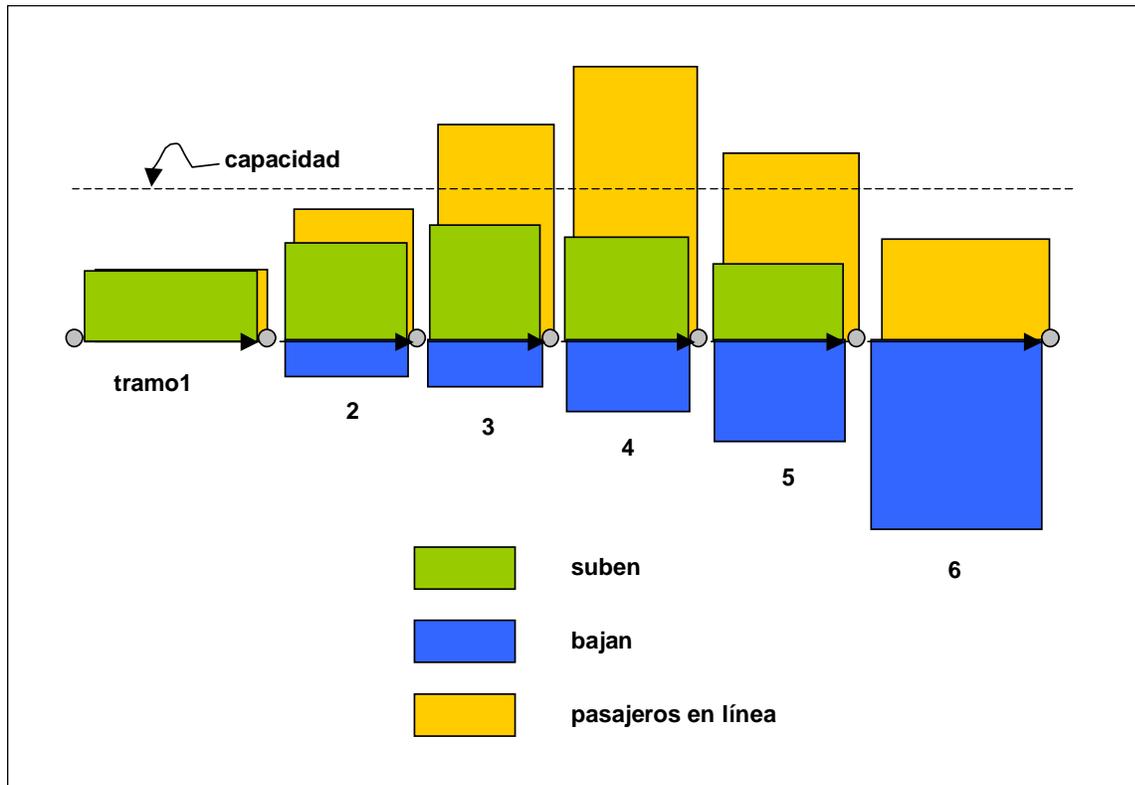
En Tranus, la frecuencia de los servicios de transporte público se define con un rango mínimo-máximo. Cuando ambos valores son iguales, indica una frecuencia fija que el modelo no puede variar, independiente del nivel de saturación de las unidades. De lo contrario, cuando se especifica un rango, el modelo de transporte ajusta la oferta a la demanda al final de cada ciclo iterativo. Para ello, la frecuencia de servicio se modifica dentro del rango dado para la siguiente iteración. Las demás características de la ruta permanecen inalteradas, tales como el recorrido, tipo de unidad, tarifa, etc.

La frecuencia se expresa en número de unidades por hora. La capacidad de servicio de una ruta se calcula como el producto de la frecuencia por la capacidad máxima de cada unidad vehicular. Por ejemplo, si una ruta tiene una frecuencia mínima de 10 unidades por hora y cada unidad puede llevar 60 pasajeros, entonces su capacidad de servicio es de 600 pasajeros/hora.

En la primera iteración, el modelo de transporte supone que todas las rutas operan con la frecuencia mínima. Luego del proceso de asignación, el modelo estimará la demanda de pasajeros en cada tramo de la red para cada ruta, lo cual se denomina *perfil de demanda* de cada ruta. Puede ocurrir que en una ruta específica la demanda

asignada sea inferior a la capacidad de servicio en todos los tramos de la red. El caso contrario es que la demanda asignada a una ruta supere su capacidad en uno o más tramos, tal como lo indica el ejemplo de la Figura 15. Allí puede verse que la ruta consta de 6 tramos. La figura indica los pasajeros que suben en cada tramo, los que bajan y el saldo que corresponde al número de pasajeros que se encuentran en línea. También se indica la capacidad de la línea, que es constante para todos los tramos. Puede verse que en los tramos 3, 4 y 5, la demanda en línea supera a la capacidad.

**Figura 15: Ejemplo del perfil de demanda de una ruta de transporte público**



Si la demanda supera la oferta, el modelo estima un incremento en los tiempos de espera de los pasajeros que intentan abordar la ruta en los tramos saturados, tal como se ha explicado en la sección anterior. Además, si existe una diferencia entre la frecuencia mínima y máxima, el modelo estima la posibilidad de que los operadores incrementen la oferta, si es que ello les conviene.

Para estimar la conveniencia para los operadores de incrementar la oferta, el modelo realiza el análisis que se describe a continuación.

- a) Cálculo el ingreso que percibe el operador de la ruta en cada tramo de la misma. Para ello se multiplica el número de pasajeros que suben por la tarifa de abordaje. Luego se suma el número de pasajeros en línea por la longitud de cada tramo y por la tarifa por distancia de la ruta. Esto da un ingreso total por tramo. El ingreso total de la ruta será la sumatoria del ingreso con respecto a todos los tramos.
- b) Cálculo de la *frecuencia requerida* en cada tramo, es decir, el número de unidades que deberían pasar por hora para atender completamente la demanda del tramo. Esto se calcula dividiendo la demanda en línea en el tramo por el número de horas que opera el servicio y por la capacidad

máxima de las unidades. Por ejemplo, si la demanda en línea es 14500 pasajeros diarios y la ruta opera con unidades de 60 pasajeros durante 12 horas diarias, la frecuencia del servicio en ese tramo deberá ser  $14500/(60 \times 12) = 20.14$  unidades por hora.

- c) Cálculo de la *frecuencia ponderada* en cada tramo. Resulta de multiplicar el ingreso de cada tramo por la frecuencia requerida.
- d) Cálculo de la *frecuencia promedio ponderada*. Para esto se divide la suma de las frecuencias ponderadas por la suma de los ingresos.
- e) La nueva frecuencia de la ruta se calcula dividiendo el resultado anterior por el nivel de ocupación de las unidades que un operador aspiraría lograr para incrementar la capacidad de servicio de la ruta. La frecuencia resultante se pondera finalmente por un parámetro que regula la facilidad de las empresas para ajustar las frecuencias.

Es importante destacar que en el modelo se presume que todos los servicios de transporte público operan con ganancia (o están cubiertos por subsidios), de allí que los costos de operación de la ruta no entran en el cálculo. El método descrito se basa en el criterio de que los operadores sólo incrementarán su oferta si el perfil de la demanda es conveniente. Por tanto, si la demanda supera a la capacidad en pocos tramos en relación al total, puede ser no conveniente para el operador incrementar la oferta del servicio. Sin embargo, si hay una tarifa significativa por distancia, puede que incrementar la oferta resulte conveniente. En otras palabras, la estructura tarifaria influye sobre la oferta, no sólo sobre la demanda.

### **Convergencia**

La convergencia del modelo se mide por las diferencias en las velocidades y volúmenes asignados en cada enlace entre una iteración y la anterior. Cuando la convergencia cumple con un criterio establecido, la ejecución termina; de lo contrario, se reporta el peor enlace y se reinicia el proceso iterativo con el cálculo de costos. En la siguiente iteración toda la serie de costos y desutilidades se modifica por las variaciones en los tiempos de viaje y de espera, lo cual afecta a la generación de viajes, la separación modal y la asignación. Una de las ventajas del procedimiento utilizado por Tranus es que los efectos de la congestión se hacen sentir a lo largo de toda la cadena de decisiones y no sólo en la asignación como ocurre en muchos modelos de transporte.

Debe notarse que las iteraciones del modelo de transporte no cambian el conjunto de pasos previamente determinados a red vacía, pero cambia el tiempo, costo y desutilidad de cada uno de ellos en función a la congestión y, por tanto, cambian las probabilidades de selección. Ello significa que el mejor paso a red vacía (con mayor probabilidad) pudiera ser el peor en situación de congestión.

## **El Sistema de Evaluación**

Con el procedimiento de evaluación de Tranus se estima el efecto de la aplicación de determinadas políticas (planes o proyectos) en el transcurso del tiempo, a partir de indicadores de beneficio socioeconómico. El sistema presenta la distribución de los beneficios entre los diversos agentes sociales que intervienen. Ningún procedimiento de evaluación dirá la última palabra acerca de las ventajas o desventajas de un determinado proyecto, ya que los elementos de juicio son múltiples y de la más diversa índole. Por tanto Tranus reúne los indicadores que la simulación aporta, y los resultados se pueden combinar con otros elementos que se consideren relevantes.

### **Agentes que intervienen en la evaluación**

En su concepción más general, el sistema económico espacial se divide en dos grandes categorías: productores y consumidores. Los agentes sociales pueden ser ambas cosas a la vez. Así, una empresa produce determinados bienes o servicios y consume mano de obra y otros bienes y servicios. Por su parte, la población 'produce' mano de obra y consume bienes y servicios.

En el sistema de transporte, las categorías se encuentran más diferenciadas. Los consumidores son todos los agentes sociales que demandan el servicio de transporte, de carga o pasajeros, y por tanto incluyen a los individuos y a las empresas. Los productores son los prestatarios del servicio: operadores de autobuses, ferrocarriles,

transporte de carga. A esto se agrega la categoría de administradores de la oferta, que son los que se encargan del mantenimiento de la infraestructura física (vías, estacionamientos, depósitos) y pueden cobrar peajes, tarifas y otros cargos.

### ***Beneficios y Costos***

El modelo contabiliza tanto los beneficios monetarios como los no-monetarios, representados en su mayor parte por los ahorros en tiempo, cuya valoración es discutible y ha sido objeto de múltiples investigaciones. Pero en el modelo hay consistencia entre los valores usados para simular las decisiones de los usuarios, y los utilizados en la evaluación. Esta es la virtud de un sistema de evaluación integrado a la simulación: la consistencia entre variables, parámetros e hipótesis utilizadas en todo el proceso.

Los consumidores de transporte se clasifican en las categorías especificadas en el modelo, y los productores son los que operan y administran la oferta de transporte, que también se definen en la aplicación. Para cada uno de los productores el modelo presenta una contabilidad económica de la operación (ingresos y gastos) en cada escenario, y calcula el ahorro o pérdida atribuible a la aplicación de la política evaluada. Para los consumidores, el modelo estima el excedente del consumidor, aplicando las desutilidades de transporte entre cada par de zonas, en lugar del mero costo monetario.

### ***Tablas de evaluación***

Tranus provee los indicadores numéricos necesarios para que el analista realice un proceso de evaluación, ya sea económico o financiero. Los resultados e indicadores del modelo pueden ser introducidos automáticamente en una hoja de cálculo que el usuario puede organizar de la manera que le parezca más conveniente, pudiéndole agregar exógenamente otros elementos no provenientes de la simulación que sea preciso tomar en cuenta, como los factores de escala temporal de algunas de las variables, precios sombra, y, fundamentalmente, los costos de capital de los proyectos que se pretende evaluar. Las tablas de evaluación pueden ser organizadas como series anuales, usualmente cubriendo períodos de evaluación de 20 años, siendo posible presentar las siguientes variables de evaluación:

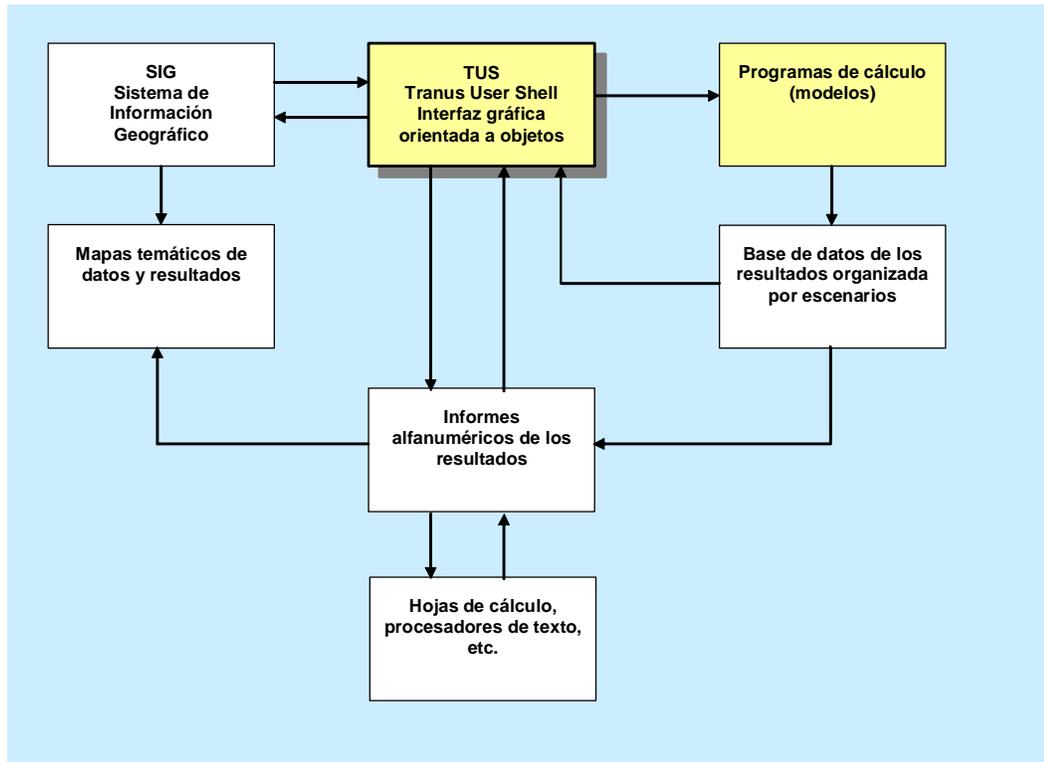
- beneficios a los usuarios (por categoría)
- beneficios a los operadores de transporte
- beneficios a los administradores del transporte
- costos de capital
- ahorros energéticos
- otros costos o beneficios
- beneficios totales
- costos de capital descontados
- beneficios totales descontados
- salvos anuales descontados

Con base en estas series, y utilizando las funciones disponibles en hojas de cálculo, se pueden calcular los indicadores tradicionales de evaluación: relación beneficio/costo, tasa interna de retorno y valor presente neto.

## **Características operativas del sistema**

El sistema TRANUS está programado para ser utilizado en cualquier PC estándar bajo Windows 98 en adelante, preferiblemente XP. Dependiendo del tamaño de la aplicación, equipos rápidos con bastante memoria son recomendados. Todos los programas y la documentación completa están disponibles gratuitamente desde [www.modelistica.com](http://www.modelistica.com) or [www.tranus.com](http://www.tranus.com). La instalación es muy simple y tarda menos de 5 minutos. Los programas están dimensionados para aplicaciones de gran tamaño.

Desde el punto de vista operativo Tranus está compuesto de una serie de módulos y programas que intercambian información, y que a su vez se relacionan con otros programas. En la Figura 16 se representan los componentes típicos de una aplicación, los cuales se describen más abajo.

**Figura 16: Componentes operativos del sistema Tranus**


### TUS (Tranus User Shell)

Este es uno de los componentes más resaltantes del sistema, ya que le provee gran flexibilidad y facilidad de uso. Interfaz gráfica orientada a objetos con manejo de escenarios. Es el componente principal con el que interactúa el usuario a través de menús, avanzadas herramientas de edición y ayuda en línea. Las principales características del sistema son las siguientes:

- **Interfaz Windows** con menús familiares e íconos para realizar la mayor parte de las tareas. Todos los gráficos y mapas que produce son de tipo vectorial fáciles de copiar directamente a procesadores de texto o de presentaciones. Datos numéricos se pueden copiar desde y hacia hojas de cálculo.
- **Base de datos orientada a objetos.** Cada objeto de la base de datos, como enlaces, nodos, zonas, rutas, etc., están relacionadas de manera estricta y de acuerdo a una estructura lógica preestablecida. Esto facilita la construcción de la base de datos y hace que éstos sean consistentes, minimizando las posibilidades de error.
- **Representación de escenarios.** La base de datos está organizada sobre la base de un ‘árbol de escenarios’. De esta manera, cada elemento de la base, como la capacidad de un enlace, la frecuencia de una ruta, la población de una zona, etc., está relacionada a un nodo del árbol de escenarios. Los escenarios están relacionados entre sí de manera lógica. Por ejemplo, si se hace un cambio a algún elemento en el año 2010-B, el cambio es ‘heredado’ automáticamente por todas las ramas del escenario, como 2015-B, 2020-B, etc. Los cambios se pueden copiar de una rama a otra. En todo momento se puede navegar a lo largo de los escenarios, visualizando los cambios de manera inmediata en la pantalla. Esta es una gran ayuda que ahorra mucho tiempo, es muy fácil de utilizar y evita muchos errores.

- **Validación continua de la data.** Apenas se genera una condición de error en los datos se produce una señal en color y un mensaje tipo burbuja. En cualquier momento se puede solicitar una lista de inconsistencias.
- **Deshacer ilimitado.** Además lleva automáticamente copias de seguridad de la base de datos.
- **Extensa ayuda** sensitiva a contexto en inglés o castellano.
- **Completo juego de herramientas de edición de la red.** Creación nodos y enlaces interactivamente, división o integración de enlaces, definición de rutas, simplificación de la red y de las rutas, y muchas otras facilidades.
- **Coordenadas geográficas** (generalmente UTM) para localizar nodos y calcular opcionalmente la longitud de los enlaces.
- **Mapas digitales de fondo** con capas y coordenadas geográficas pueden importarse en formato DXF. La red puede ser codificada enteramente sobre estos mapas utilizando las herramientas de edición de redes.
- **Importar/exportar** los datos de la red desde/hacia otras aplicaciones como SIG u otros modelos de transporte, a través de archivos ASCII delimitados por comas.
- **Menú interactivo para la operación**, para los diversos modelos en los diversos escenarios de manera sencilla.
- **Mapas de los resultados de transporte** son generados automáticamente con una variedad de formatos
- **Menú para generación de reportes** de los resultados basados en consultas que pueden, a su vez, ser guardadas. Es posible seleccionar un área de la red para obtener informes selectivos.
- **Mapas en formato MIF** se pueden producir para ser leídos en muchos SIG.

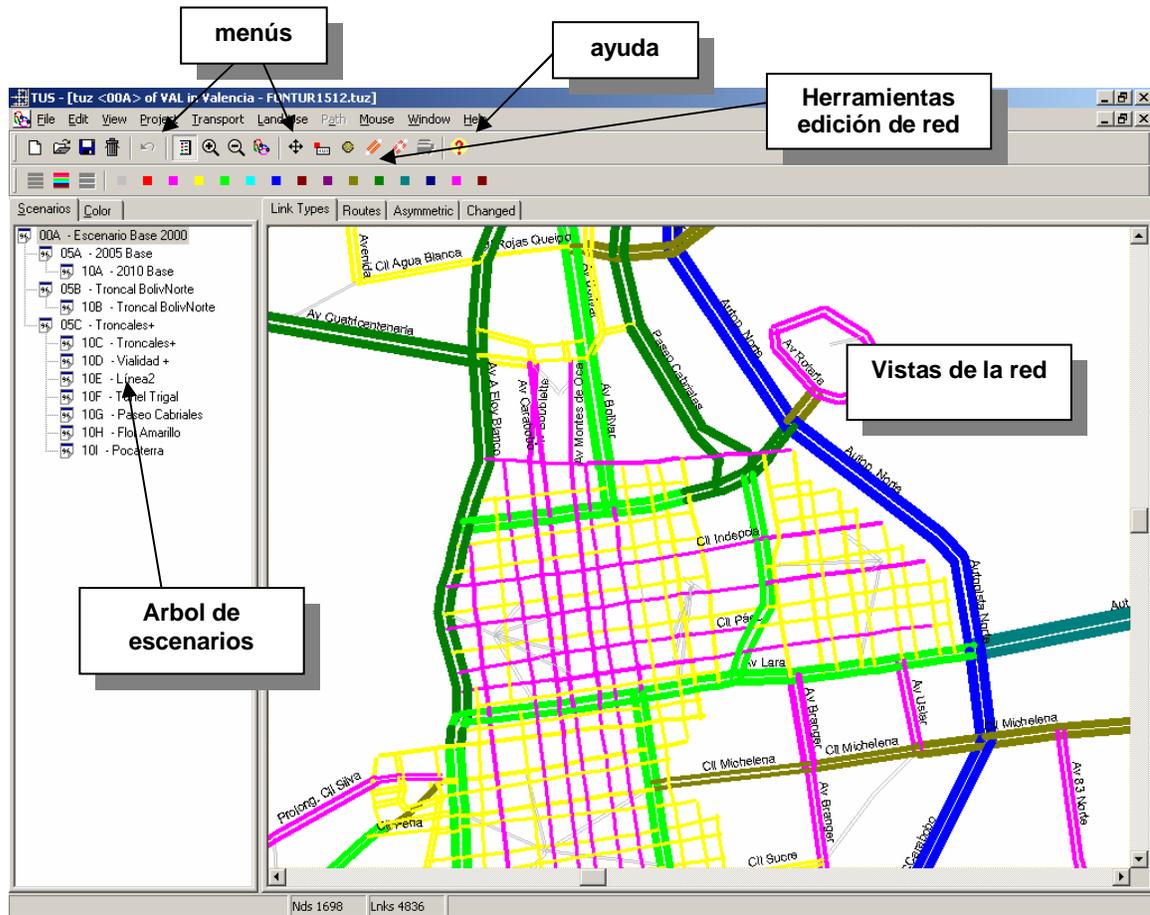
Un ejemplo de la ventana interactiva principal de TUS se presenta en la Figura 17, y en la Figura 18 y siguientes se presentan ejemplos de la forma en que TUS muestra los resultados de una asignación.

## Programas de cálculo

Un conjunto de programas que realizan los cálculos correspondientes a los modelos, tales como el modelo de localización de actividades, búsqueda de pasos, asignación multimodal de transporte, y otros. La ejecución de estos programas es automatizada a través de un menú especial desde la interfaz gráfica. Los resultados se guardan en una base de datos organizada por escenarios.

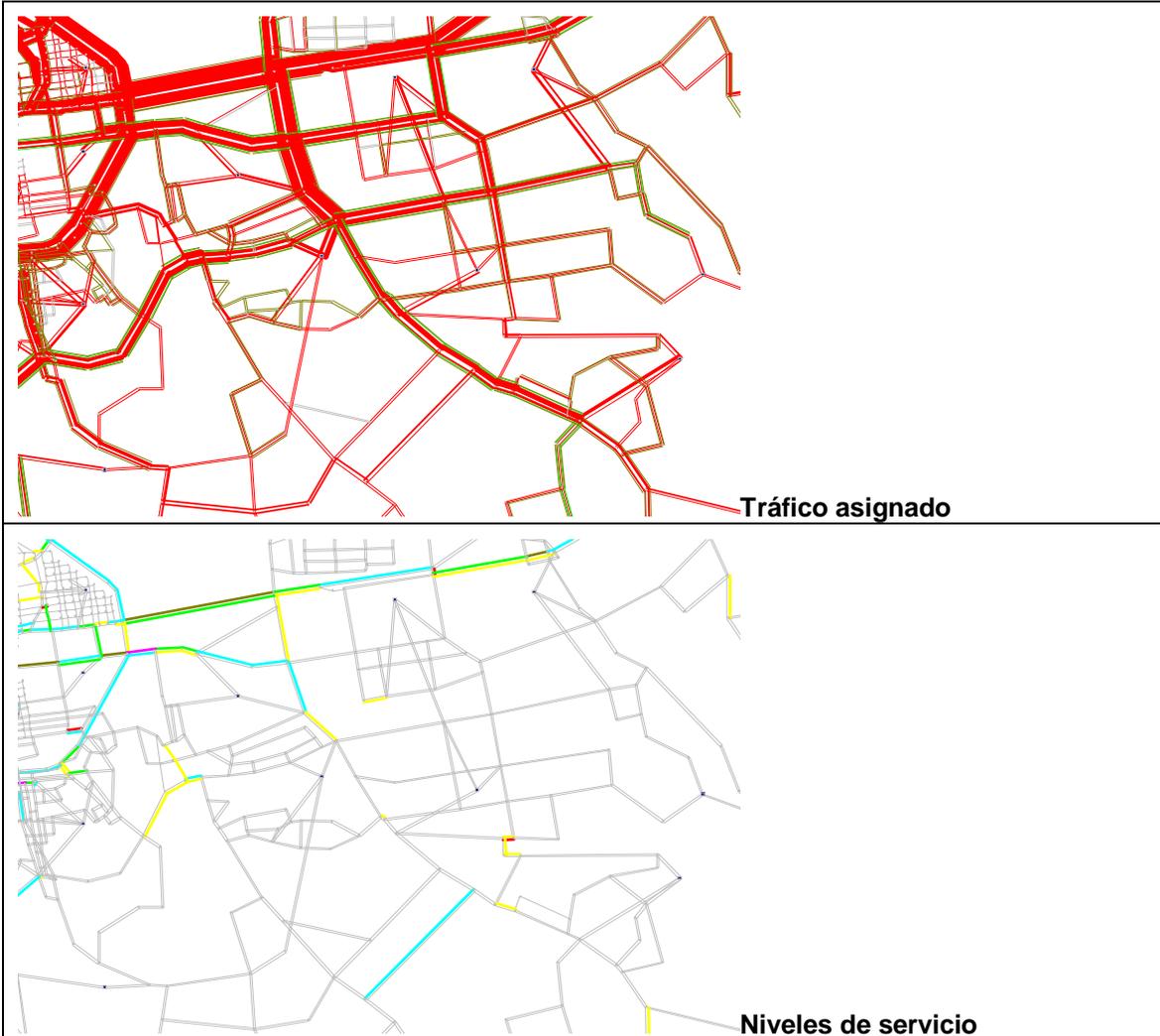
## Programas de consulta y generación de informes

Un conjunto de programas que permiten hacer consultas diversas a la base de datos de resultados con una gran variedad de opciones y formatos, adicionales a los que produce directamente la interfaz TUS. Permiten obtener tablas con los resultados de la localización de actividades y usos del suelo, los resultados de la asignación de viajes en la red, matrices de viajes, costos y desutilidades, matrices de beneficios a los usuarios, y muchas más. Estos resultados pueden ser leídos directamente por hojas de cálculo y los sistemas SIG, y pueden proveer los insumos necesarios para otros programas, como cálculo de emisiones.

**Figura 17: Interfaz gráfica del sistema Tranus**


Ambiente de trabajo de Tranus – TUS, tomando como ejemplo el modelo de Valencia

Figura 18: Ejemplos de presentación de resultados en Tranus



Presentación de resultados de la asignación, tomando como ejemplo el modelo de Valencia

**Figura 19: Ejemplo de una red codificada directamente sobre un mapa digital GIS**

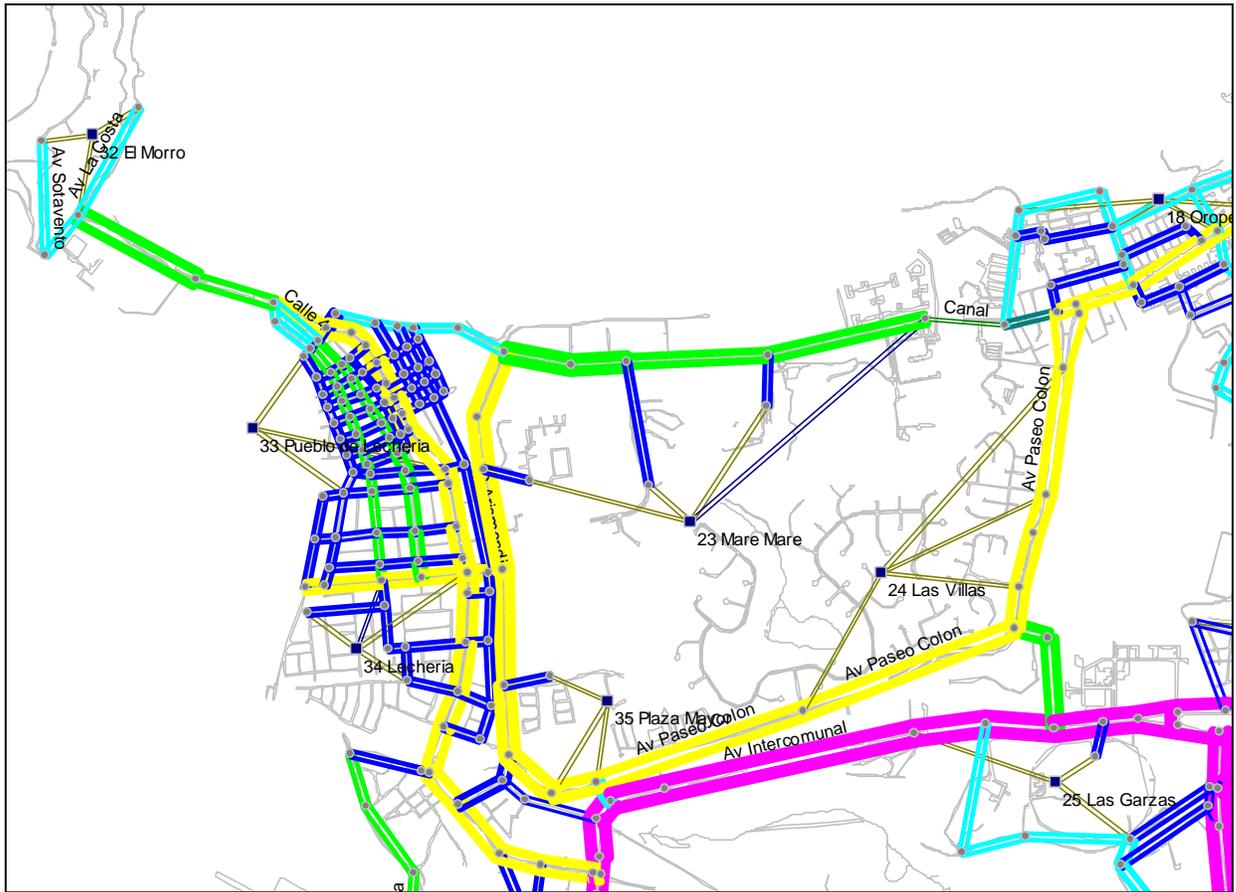
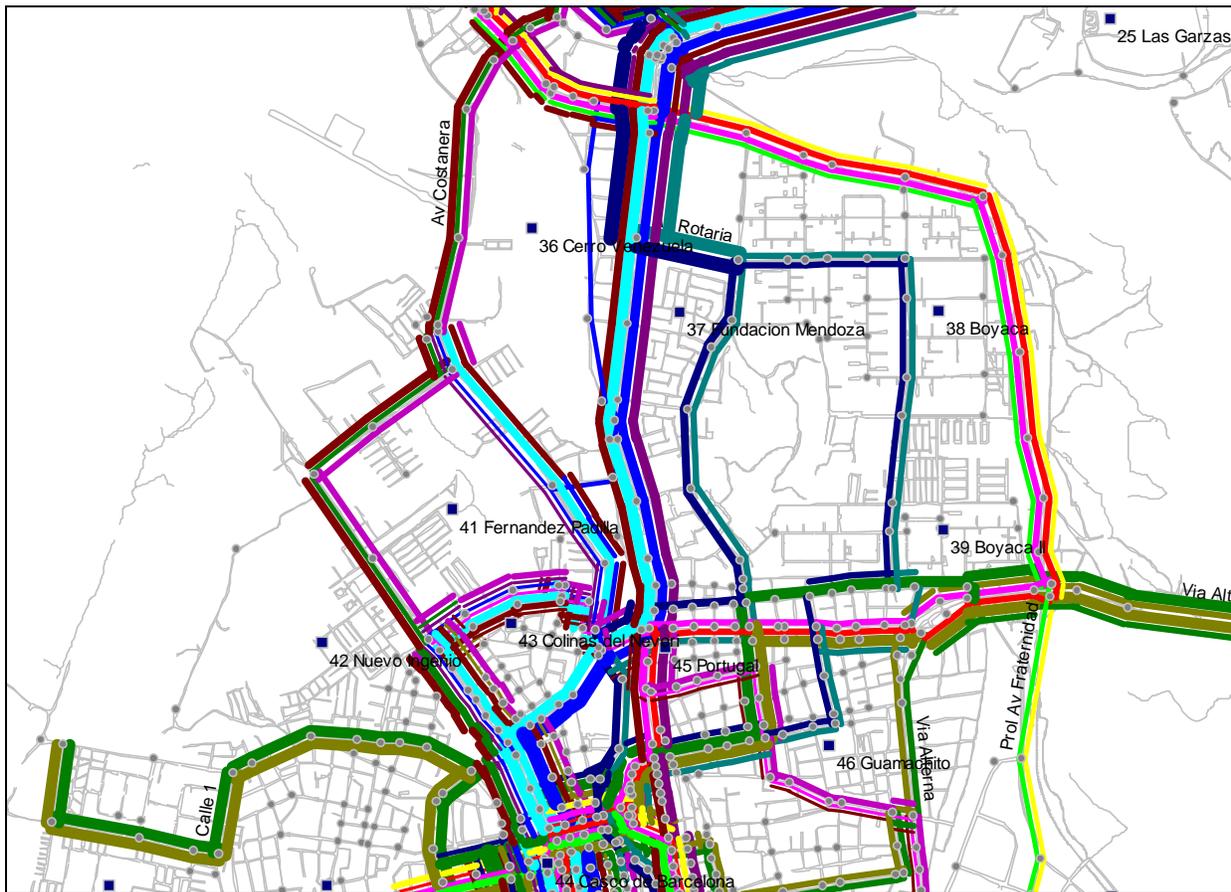


Imagen de la interfaz Tranus, mostrando un fondo con un mapa digital de una ciudad con la red analítica codificada encima de manera directa utilizando las herramientas de edición de TUS. Los colores representan tipos de vía y su espesor es proporcional a la capacidad. El gráfico vectorial resultante fue copiado directamente en este documento MS Word.

Figura 20: Ejemplo de presentación de rutas en un GIS



La figura presenta un mapa de rutas generado por Tranus con el espesor proporcional a la capacidad ofertada por cada ruta. La interfaz de Tranus ‘exportó’ automáticamente las rutas en formato MIF para luego generar el mapa con el GIS MapInfo.

27/07/2007