

Un enfoque de Tomografía en Redes para imputar tráfico OD en una red IP/MPLS

Dr. Ing. Claudio Risso (crisso@fing.edu.uy)
MSc. Ing. Pablo Cuello (jpcuello@antel.com.uy)
MSc. Cand. Carlos Martínez (carlos@lacnic.net)

Instituto de Computación (FING - UdelarR, Uruguay)
Gerencia Internacional (ANTEL - Uruguay)
LACNIC

IMWG, LACNIC46 - LACNOG2026
(Octubre 2026)

...Antes que nada



Figure: Don't shoot the messenger!

La aplicación de fondo

La matriz de tráfico origen-destino (OD) de una red es un insumo clave para la operación y planificación de todo proveedor.

Entre sus aplicaciones están:

- Hacer uso de los datos existentes para:
 - Simular escenarios de falla (análisis What-If).
 - Detectar anomalías, para identificar ataques de denegación de servicio (DDoS) o fallas de enrutamiento.
- Proyectar crecimiento del tráfico para:
 - Planificar expansiones y prevenir congestiones, logrando mejorar la asignación de inversiones.
 - Optimizar el routing al distribuir la carga interna y/o optimizar las conexiones con otros ASes.

Entre otros usos potenciales.

La aplicación de fondo

- Sin embargo, la estimación precisa de la matriz de tráfico OD entre nodos de la red no es trivial.
- En las redes IP/MPLS, la matriz OD representa el tráfico transportado por los distintos túneles o LSPs.
- Al no estar estandarizadas, las estadísticas de los LSPs pueden ser poco fiables en relación a las de las interfaces.
- Esta charla presenta una metodología para estimar el tráfico OD combinando dichas mediciones con estadísticas precisas de las interfaces físicas.
- La propuesta se valida mediante mediciones reales y datos sintéticos calibrados a partir de ellas.

El área de investigación

La Tomografía de Redes infiere características internas de una red mediante mediciones externas e indirectas.

Se enfoca en tres aplicaciones principales:

Rendimiento de enlaces: Identifica qué tramos internos sufren congestión, pérdidas o retrasos basándose en mediciones extremo-a-extremo.

Identificación de topología: Reconstruye la estructura y conexiones lógicas de la red correlacionando los datos obtenidos en varios puntos.

Matrices de tráfico (OD): Estima el volumen de tráfico entre origen y destino utilizando la topología de la red y los flujos medidos en los enlaces.

El área de investigación

La Tomografía de Redes infiere características internas de una red mediante mediciones externas e indirectas.

Se enfoca en tres aplicaciones principales:

Rendimiento de enlaces: Identifica qué tramos internos sufren congestión, pérdidas o retrasos basándose en mediciones extremo-a-extremo.

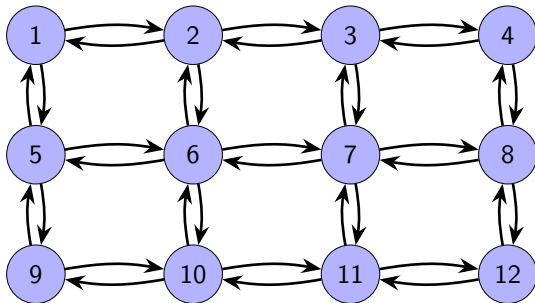
Identificación de topología: Reconstruye la estructura y conexiones lógicas de la red correlacionando los datos obtenidos en varios puntos.

Matrices de tráfico (OD): Estima el volumen de tráfico entre origen y destino utilizando la topología de la red y los flujos medidos en los enlaces.

Este trabajo se ubica en al tercera de las aplicaciones.

Estimación de Matrices OD

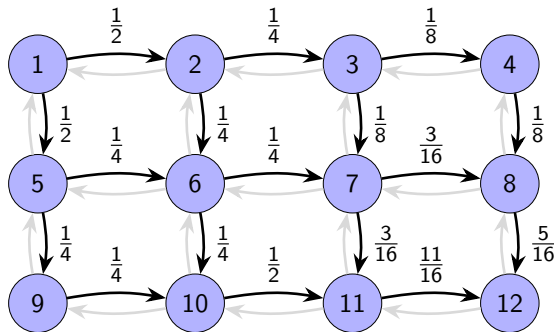
Dada la red de la figura y medidas de tráfico en los enlaces (dirigidos) ¿cómo estimar el tráfico entre los nodos?



Para empezar, tenemos un problema indeterminado: 34 datos (2×17 links) para 132 incógnitas (12×11 nodos).

Estimación de Matrices OD

Dada la red de la figura y medidas de tráfico en los enlaces (dirigidos) ¿cómo estimar el tráfico entre los nodos?

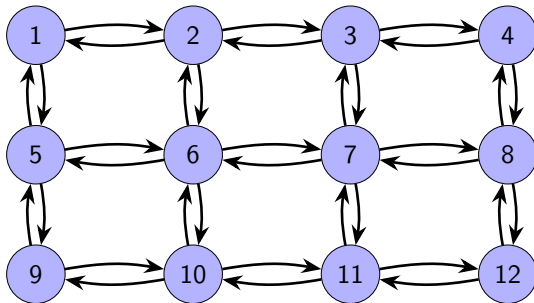


Está además el efecto del routing, que en redes con poca diversidad de métricas, distribuye la carga entre múltiples enlaces.

El efecto del ECMP entre 1 y 12 sería como en el esquema.

Estimación de Matrices OD

Dada la red de la figura y medidas de tráfico en los enlaces (dirigidos) ¿cómo estimar el tráfico entre los nodos?



Se podría considerar el efecto por cambios transitorios en la topología debidos a fallas en enlaces y su posterior restauración. Pero ha quedado afuera de este estudio.

Vínculo entre tráfico OD y carga en enlaces

De conocer los valores de tráfico X en un período y para cada par origen-destino $j = (pq)$, la carga Y_i recibida sobre el enlace i es una transformación lineal: $Y = AX$, donde $Y = ((Y_i))$ y A es:

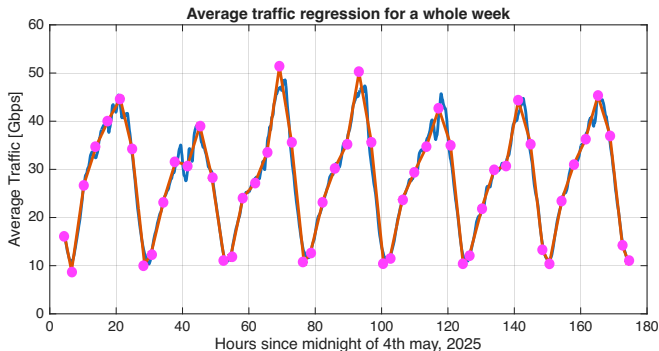
$$((A))_{ij} = \begin{cases} r & \text{fracción del tráfico entre } p \text{ y } q, \\ & (pq) = j \text{ que atraviesa el link } i; \\ 0 & \text{otro caso.} \end{cases}$$

En el ejemplo anterior, si “ j ” fuera el índice del túnel entre los nodos 1 y 12, e “ i ” fuera el índice del enlace que va desde el nodo 7 al 8, sería $A_{ij} = \frac{3}{16}$, porque ése es el ratio en la figura.

Esta idea permite formular matemáticamente el routing, pero seguimos teniendo más incógnitas que datos.

Explotación del Perfil Diario

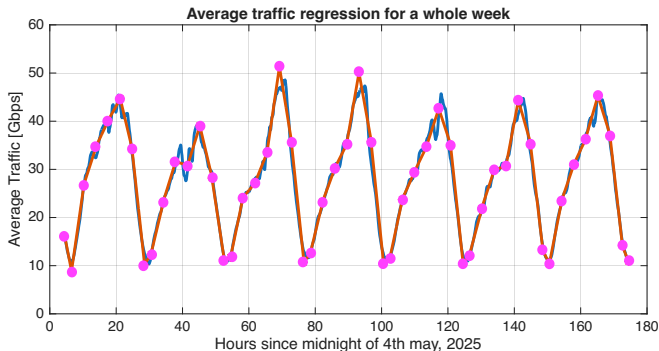
Para mitigar la falta de datos, decidimos explotar el perfil estándar del tráfico a lo largo de un período y su correlación temporal.



Los picos y valles ocurren con regularidad diaria, así que se toma referencia en torno a esas horas y alguna intermedia.

Explotación del Perfil Diario

Para mitigar la falta de datos, decidimos explotar el perfil estándar del tráfico a lo largo de un período y su correlación temporal.



Entre esos puntos, se aproxima con una función lineal a tramos, que constituye otra transformación lineal, de matriz B , desde los discos (violetas) hacia los puntos intermedios (anaranjado).

Regresión para Ajuste de Parámetros

La experimentación se condujo usando la Red Internacional de ANTEL a mayo 2025, que incluye:

- $n = 31$ nodos, resultando en $c = 31 \times 30 = 930$ túneles;
- 64 enlaces bidireccionales, que son $r = 2 \times 64 = 128$ links;
- Su topología y métricas, de la que surgen 22 ratios distintos para la matriz $A \in \mathbb{R}^{128 \times 930}$;
- Estadísticas de tráfico en cada link cada 5 minutos, totalizando 2041 muestras por link en el período;
- Como los instantes de referencia son 51 por link y por túnel, resulta que $B \in \mathbb{R}^{51 \times 2041}$.

Los parámetros del modelo son las alturas de los discos violetas (ver figura anterior) para los túneles, que denominamos $\Theta \in \mathbb{R}^{930 \times 51}$.

El resultado es $930 \times 51 = 47,430$ parámetros a ajustar sobre $128 \times 2041 = 261,248$ datos, una relación de 5.5 a 1.

Regresión para Ajuste de Parámetros

El ajuste se consigue mediante la resolución de instancias para un mismo problema de optimización de referencia.

La formulación es intrincada y el cálculo de A y B requiere una programación aparte.

Sin embargo, el problema a resolver es uno de mínimos cuadrados con restricciones técnicas en los parámetros (el tráfico debe ser positivo).

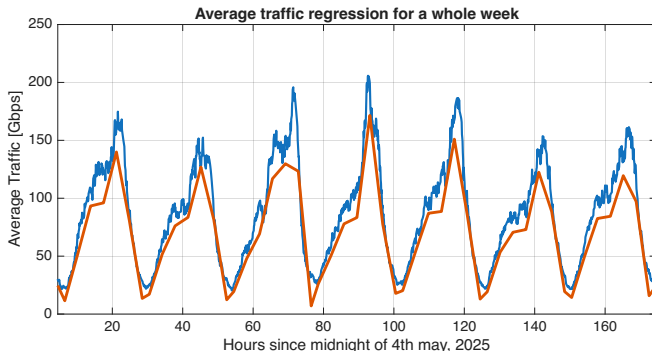
El problema admite múltiples soluciones y la resolución con métodos iterativos queda sesgada por el valor inicial Θ_0 .

Al resolverlo secuencialmente, desde el subproblema que sólo considera los túneles más importantes hasta el que los integra a todos, se logra una aproximación razonable.

Resultados Experimentales

En este experimento, los 25 LSPs más intensos (2.69% de 930) concentraban el 60% del tráfico total.

El ajuste medio entre esos túneles se presenta en la figura.



Se sigue trabajando en mejorar el ajuste global, pero considerando la dificultad del problema, los resultados son promisorios.

Resultados Experimentales

La prueba de concepto anterior emplea un enfoque *blackbox*, donde se busca reconstruir el perfil de tráfico entre todo par de nodos.

Los datos de tráfico disponibles para LSPs de ANTEL, sólo se usaron para identificar cuáles son los más intensos.

Al variar el método para reconstruir solamente el tráfico de los túneles faltantes, los resultados ajustan sensiblemente mejor.

Sin embargo, el enfoque blackbox tiene ventajas evidentes:

- Consigue estimar el tráfico OD con muchos menos datos.
- Y es independiente de la implementación tecnológica: IP nativo, MPLS, Segment Routing.

En esa línea, el principal valor del estudio en ANTEL radica en que su tecnología actual permitió obtener los *insights* necesarios para elaborar modelos precisos, capaces de seguir funcionando incluso ante la ausencia de estos datos.

Resultados Experimentales

La prueba de concepto anterior emplea un enfoque *blackbox*, donde se busca reconstruir el perfil de tráfico entre todo par de nodos.

Los datos de tráfico disponibles para LSPs de ANTEL, sólo se usaron para identificar cuáles son los más intensos.

Al variar el método para reconstruir solamente el tráfico de los túneles faltantes, los resultados ajustan sensiblemente mejor.

Sin embargo, el enfoque blackbox tiene ventajas evidentes:

- Consigue estimar el tráfico OD con muchos menos datos.
- Y es independiente de la implementación tecnológica: IP nativo, MPLS, Segment Routing.

Con el fin de aproximar las estimaciones del enfoque blackbox a los valores reales, se continúa trabajando en la incorporación de inteligencia al modelo.

A woman with blonde hair, wearing a light-colored sweater and rings, is pointing her right index finger upwards. In the background, a red line graph is visible on a screen, showing an upward trend. The text "Gracias por vuestra atención" is overlaid in blue.

Gracias por vuestra
atención