

# DISEÑO DE UN SISTEMA CON BASE EN CONFIABILIDAD, PARA EL MODELAMIENTO DE CONTINGENCIAS Y DE OPERACIÓN DEL SISTEMA COLOMBIANO DE GAS NATURAL

---

Mauricio Holguín Londoño, Álvaro Ángel Orozco Gutiérrez

Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia  
Doctorado en Ingeniería, Área de Automática  
Grupos de Investigación en Automática y en Gestión de Activos  
Eléctricos, Electrónicos y Automáticos

# Universidad Tecnológica de Pereira

---



# Introducción

---

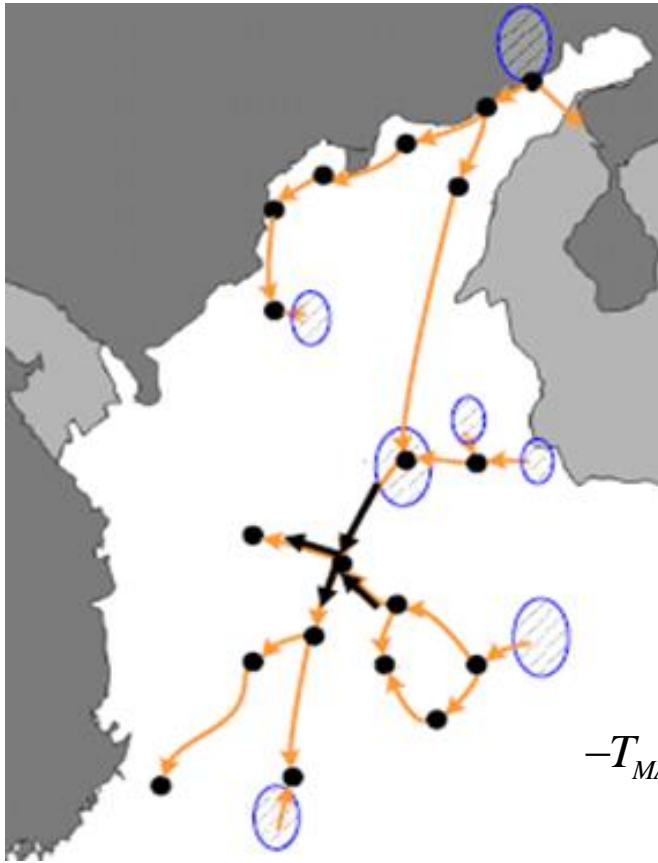
- Se requiere disponer de un modelo de optimización de la operación, basado en confiabilidad, que integre los datos de oferta, demanda y transporte del sistema de gas natural en Colombia, y que considere las salidas del servicio en el sistema de transporte y producción de gas natural.
- Debe permitir de forma flexible considerar imprevistos del sistema, (como el fenómeno de la niña y el fenómeno del niño) y contingencias especiales de oferta e infraestructura en periodos de tiempo.
- Se debe tener presentes los principales ramales, nodos, puntos de inyección y gasoductos del sistema de gas natural Colombiano.

# Objetivos

---

- Evaluar las condiciones del sistema en cuanto a la demanda y desde la perspectiva de los diferentes usuarios.
- Evaluar las condiciones del sistema en cuanto a la oferta y teniendo presente las diversas restricciones y contingencias como capacidades de producción y mantenimientos.
- Evaluar las condiciones del sistema en cuanto al transporte y tener presente las diversas restricciones y contingencias como capacidades de transporte y mantenimientos.
- Realizar la simulación conjunta de todos los agentes, de tal forma que se optimicen los costos totales de operación frente a las condiciones topológicas, fenomenológicas y de restricción del sistema.

# Materiales y métodos



*Matriz de datos* (estructura del sistema) con información de demandas, ofertas, capacidades y datos de fallos.

*Ecuaciones de restricción:*

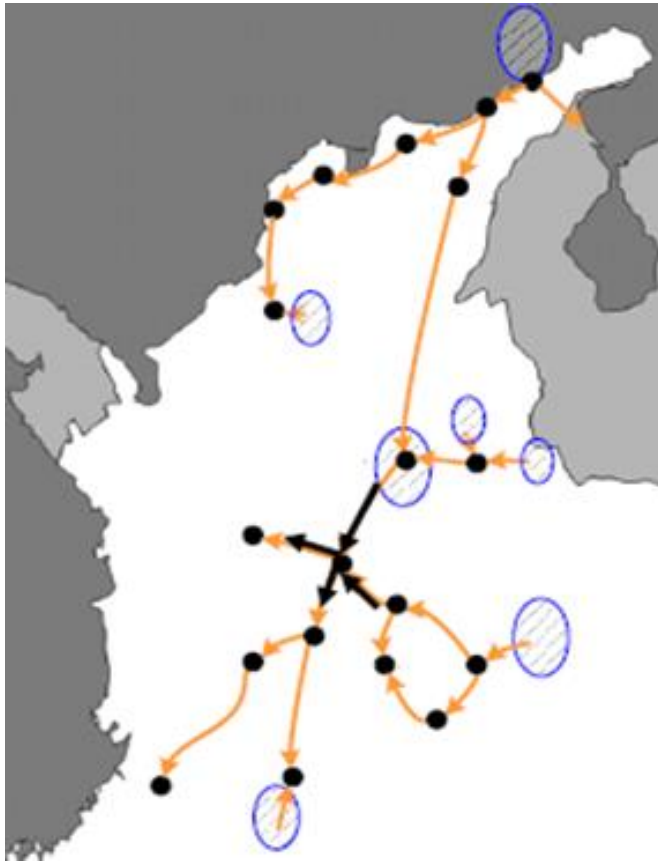
De igualdad, o equilibrio del flujo:

$$\phi_{demandado} = \phi_{entrante} - \phi_{saliente} + \phi_{restringido}$$

De desigualdad, o límites de decisión:

$$-T_{MAX k} \leq T_k \leq T_{MAX k} \quad I_j \leq I_{MAX j} \quad R_n|_{CU} \leq D_n|_{CU}$$

# Materiales y métodos



## La función de costo

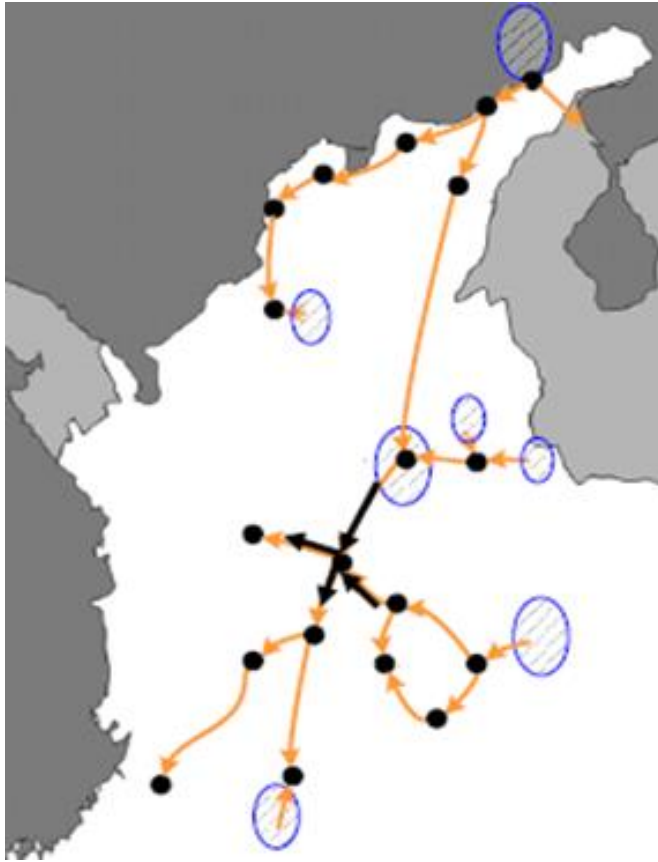
$$\sum_i^N CI_i * G_i + \sum_j^N CTT_j * Q_j + \sum_k^N CD_k * GD_k$$

Sujeto a

$$A_{eq} = B_{eq}$$
$$LI \geq x \geq LS$$

$CI$	Costo de inyección en el nodo $i$ .
$CTT$	Costo de transporte por la tubería $j$ .
$CD$	Costo de abastecimiento, por uso alternativos, nodo $k$ .
$G$	Gas Inyectado en nodo $i$ .
$Q$	Volumen de gas en tubería $j$ .
$GD$	Volumen desabastecido, por uso alternativos, nodo $k$ .
$A_{eq}, B_{eq}$	Ecuaciones de igualdad en cada nodo del modelo.
$LS, LI$	Límites de variables de decisión.
$x$	Variables de decisión ( $G_i, Q_i, GD_k$ ).

# Materiales y métodos



## *Optimización:*

De la *función de costo* y *ecuaciones de restricción* se crea el sistema a optimizar:

$$C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n$$

Matricialmente:

$$C'X$$

$$AX = b$$

$$X \geq 0$$

$$g_i(\bar{x}) + \bar{t} = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, m$$

$\bar{t}$  = variables de holgura

Optimización por  
Programación Lineal  
(PL): Método Simplex

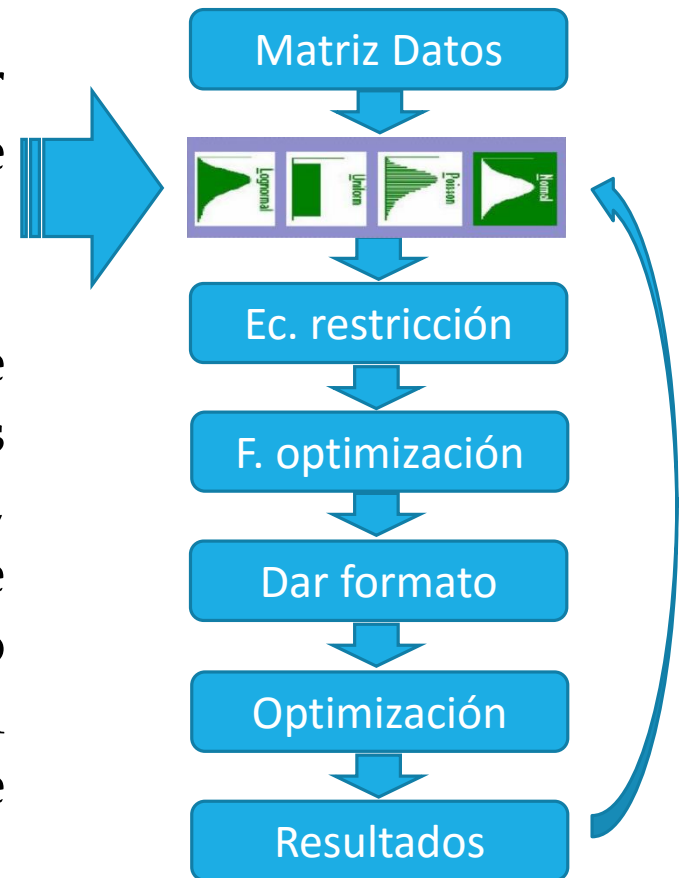
PL adiciona variables  
de holgura, para tratar  
desigualdades como  
igualdades

# Materiales y métodos

## *Simulación Montecarlo:*

Las demandas se simulan por muestreo desde una función de distribución de probabilidad normal.

Las inyecciones y el transporte se simulan por muestreo desde sus máximos potenciales y sus fallos, según funciones de distribución de probabilidad, así: Poisson (número de eventos de fallo), log-normal (duración de eventos) y uniforme (profundidad de evento).

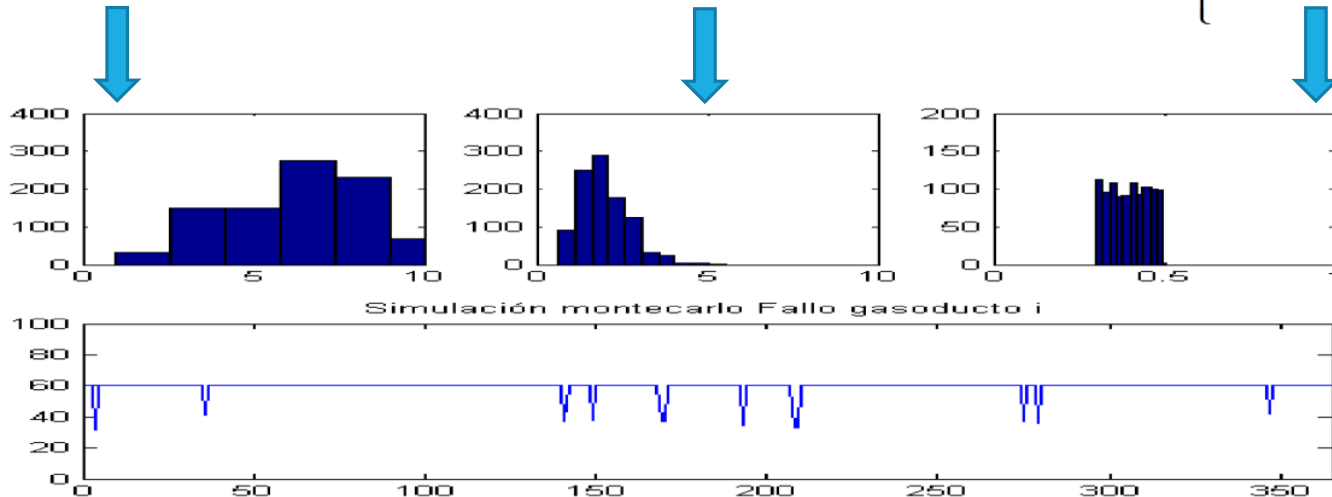




# Simulación transporte e inyección

Se simula un perfil anual de operación, por cada tramo y campo, desde las estadísticas de fallos: Poisson (eventos), lognormal (duración) y uniforme (profundidades).

$$f(k, x) = \frac{e^{-x} x^k}{k!} \quad f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2} \quad f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x < a, x > b \end{cases}$$



# Simulación transporte e inyección

Base de Datos



Serie datos fallo



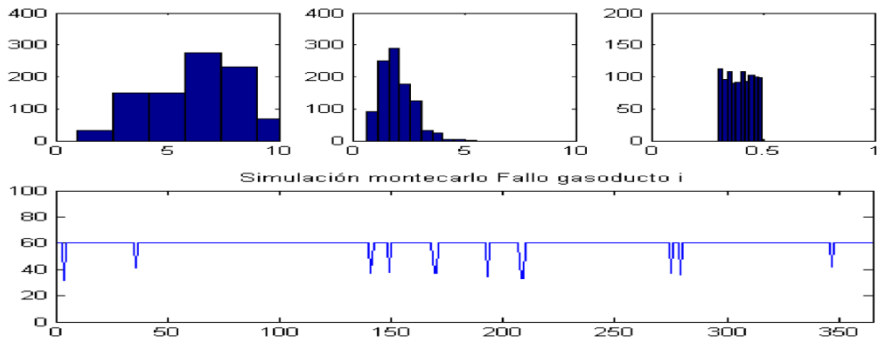
Máx. verosimilit.



Perfil anual

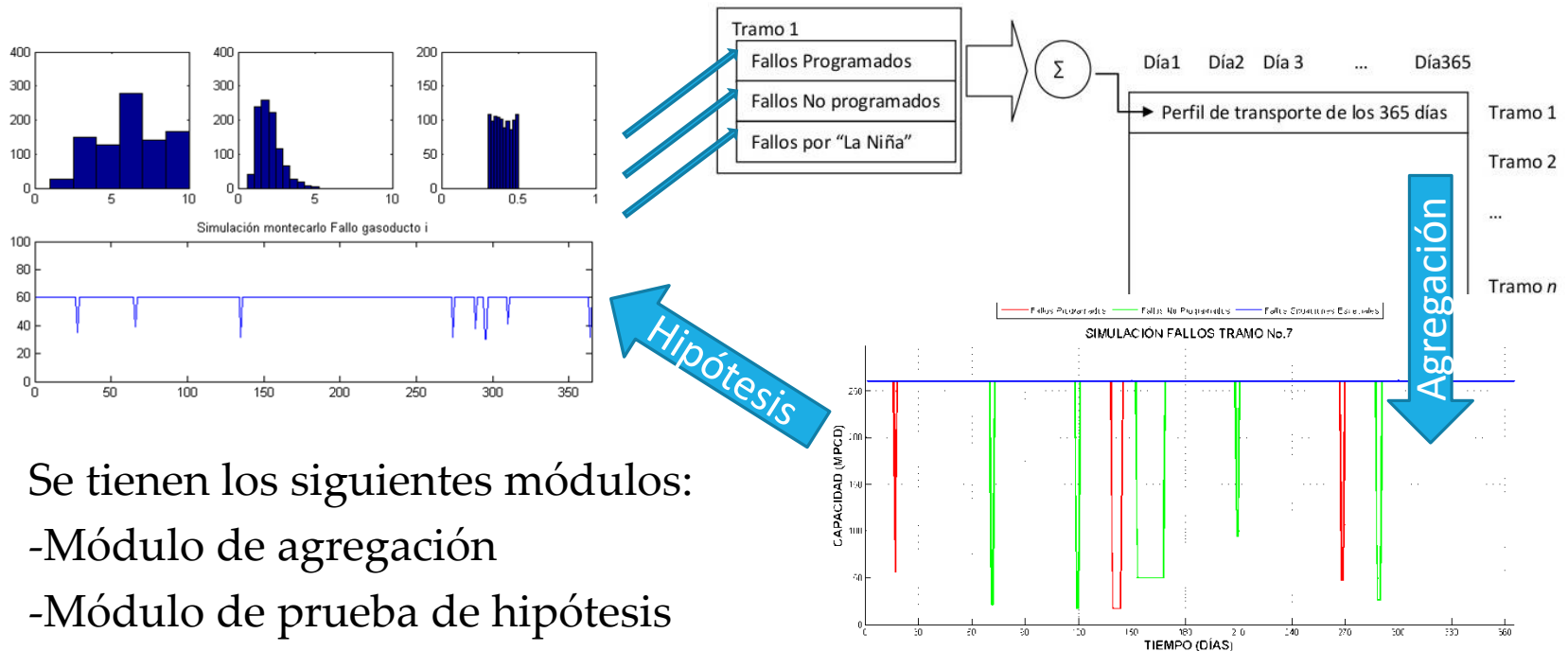


Función de distribución conjunta
$f(x_1, x_2, \dots, x_n   \theta) = f(x_1   \theta) \cdot f(x_2   \theta) \cdots f(x_n   \theta)$
Función de verosimilitud
$\mathcal{L}(\theta   x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f(x_i   \theta)$
Función de verosimilitud logarítmica
$\hat{\ell}(\theta   x_1, \dots, x_n) = \ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i   \theta)$
Criterio de maximización
$\hat{\theta}_{mle} = \arg \max_{\theta \in \Theta} \hat{\ell}(\theta   x_1, \dots, x_n)$



# Simulación transporte e inyección

Cada tramo y campo simula 3 tipos de fallo: Programados (preventivo), NO programados (correctivo) y otros (situaciones especiales o fenomenológicas):



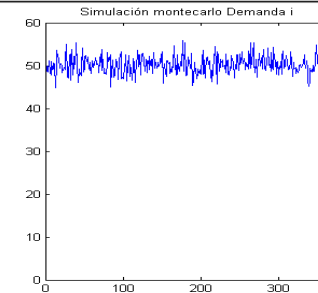
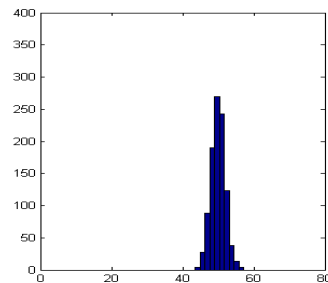
Se tienen los siguientes módulos:

- Módulo de agregación
- Módulo de prueba de hipótesis

# Simulación demanda

Se simula perfil anual de demanda, por nodo y usuarios: Residencial, Industrial, Comercial, Vehicular, Refinación, Petroquímica y Termoeléctricas.

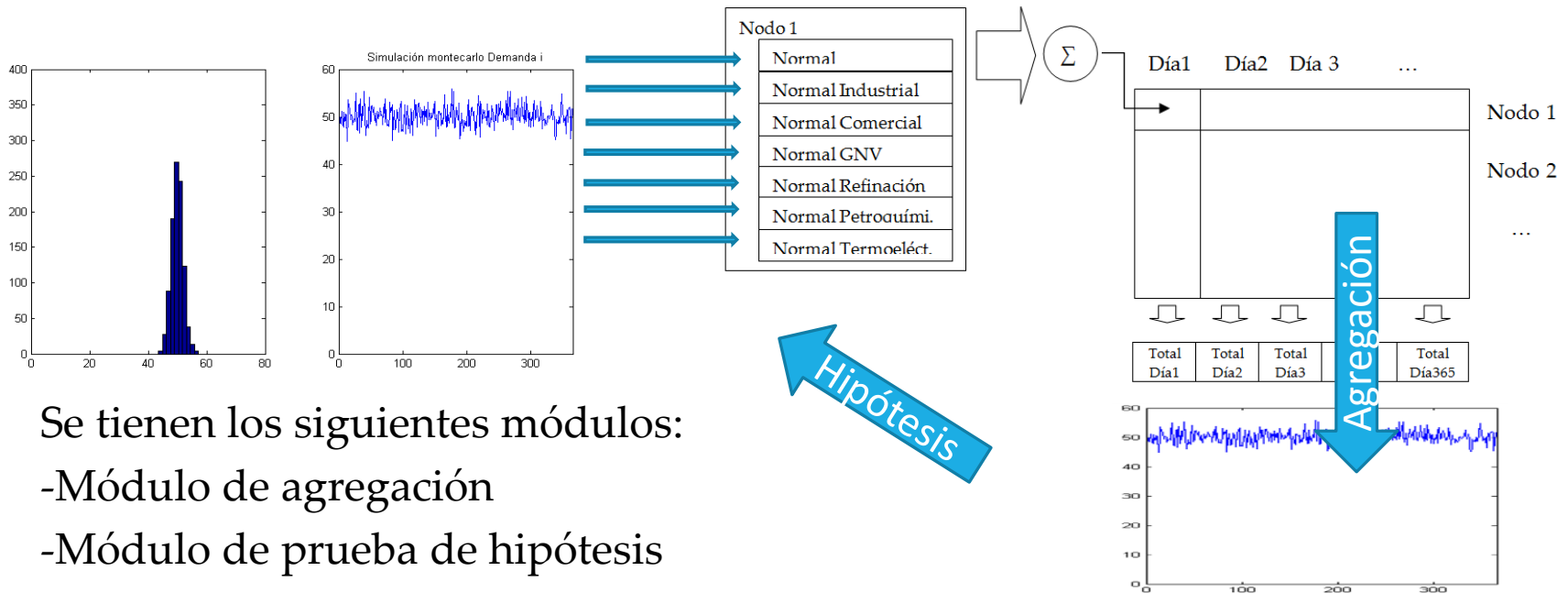
Función de distribución conjunta
$f(x_1, x_2, \dots, x_n   \theta) = f(x_1   \theta) \cdot f(x_2   \theta) \cdots f(x_n   \theta)$
Función de verosimilitud
$\mathcal{L}(\theta   x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n f(x_i   \theta)$
Función de verosimilitud logarítmica
$\hat{\ell}(\theta   x_1, \dots, x_n) = \ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i   \theta)$
Criterio de maximización
$\hat{\theta}_{mle} = \arg \max_{\theta \in \Theta} \hat{\ell}(\theta   x_1, \dots, x_n)$



$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2}$$

# Simulación demanda

En cada nodo se simulan sus 7 usuarios. La división por usuarios permite incluir análisis fenomenológico.

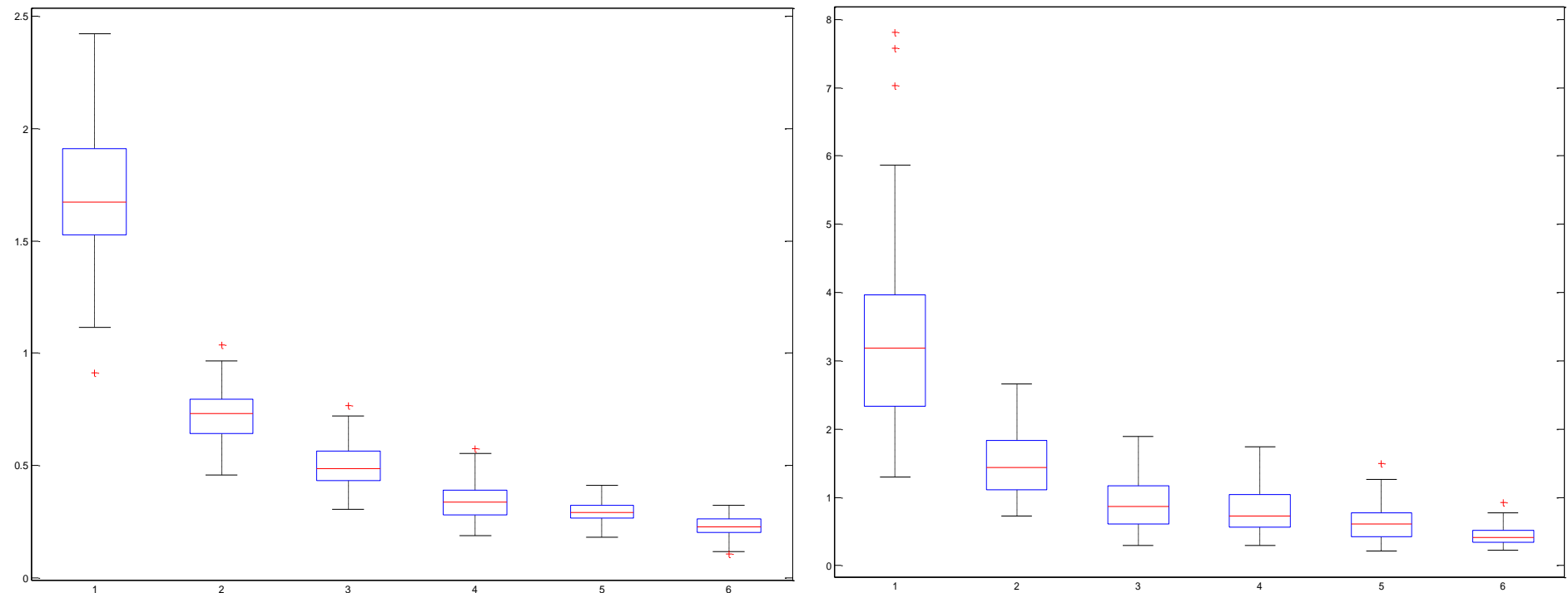


Se tienen los siguientes módulos:

- Módulo de agregación
- Módulo de prueba de hipótesis

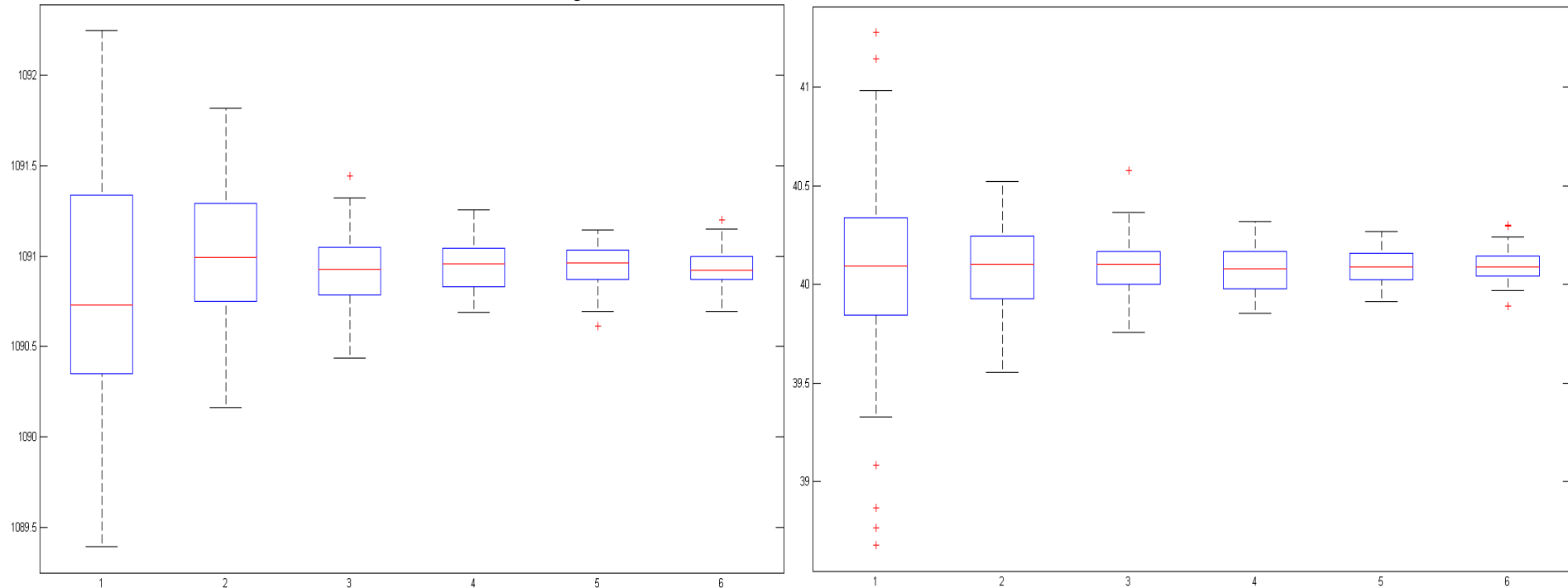
# Simulación Montecarlo del transporte y la inyección

Error medio cuadrático entre número de iteraciones de Montecarlo: 10(1), 50(2), 100(3), 200(4), 300(5) y 500(6).  
Parámetros: número de fallos en transporte e inyección.

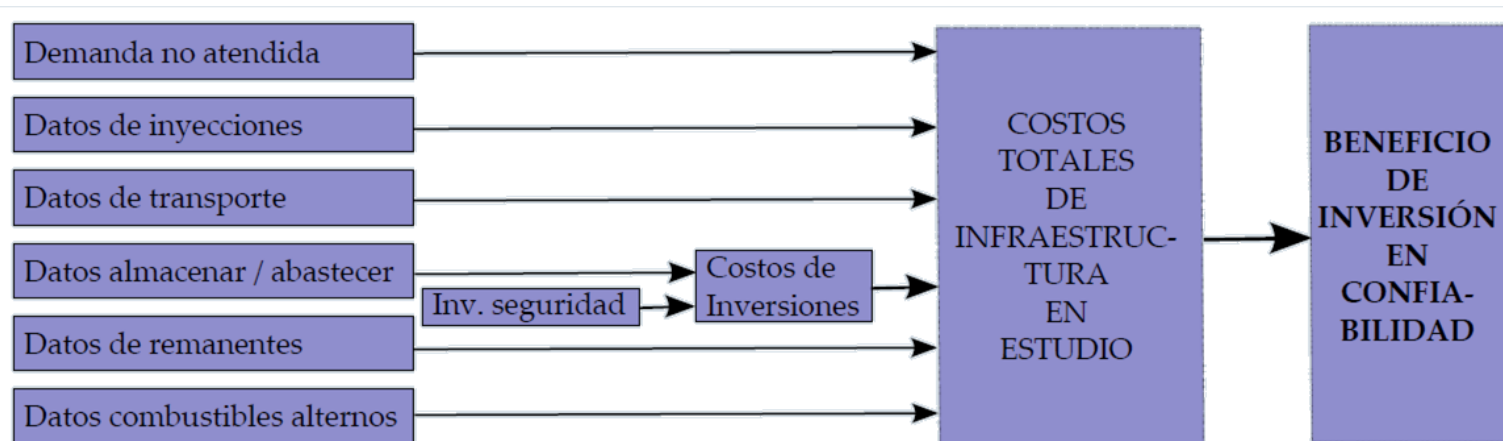
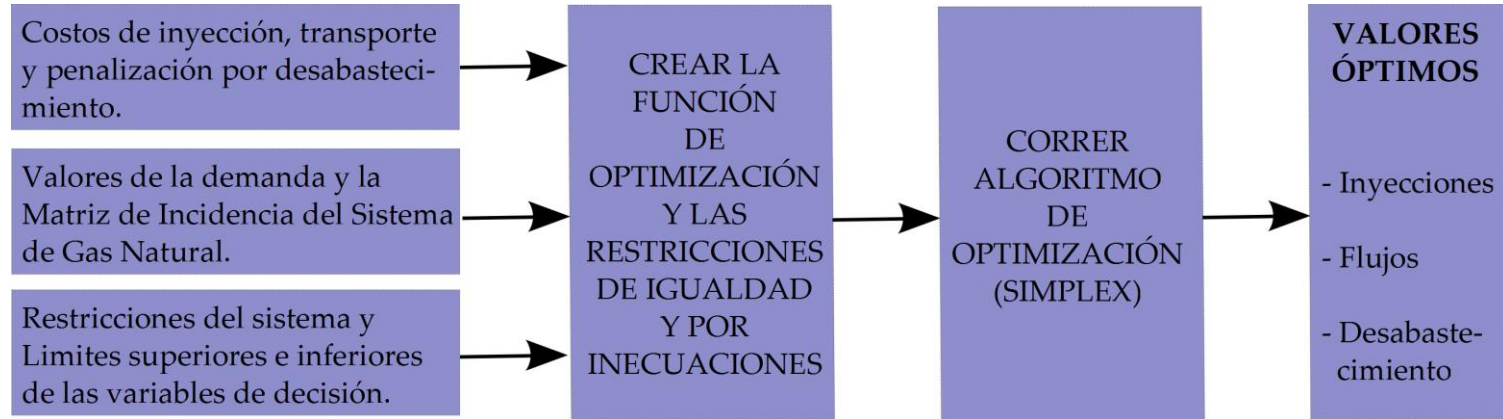


# Simulación Montecarlo de la demanda

Error medio cuadrático entre número de iteraciones de Montecarlo: 10(1), 50(2), 100(3), 200(4), 300(5) y 500(6).  
Parámetros: media y desviación estándar.

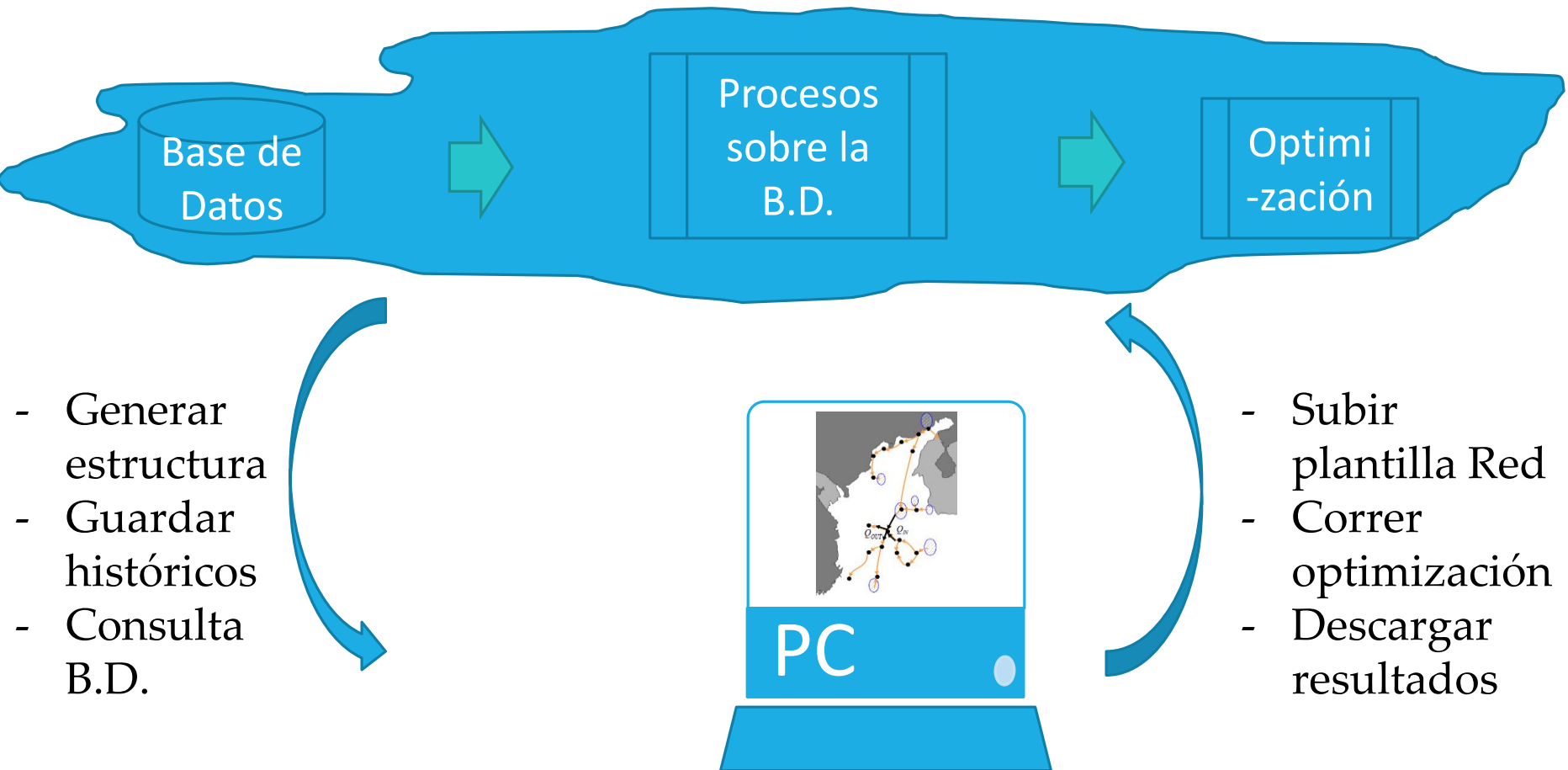


# Módulos de optimización y evaluación de alternativas de inversión





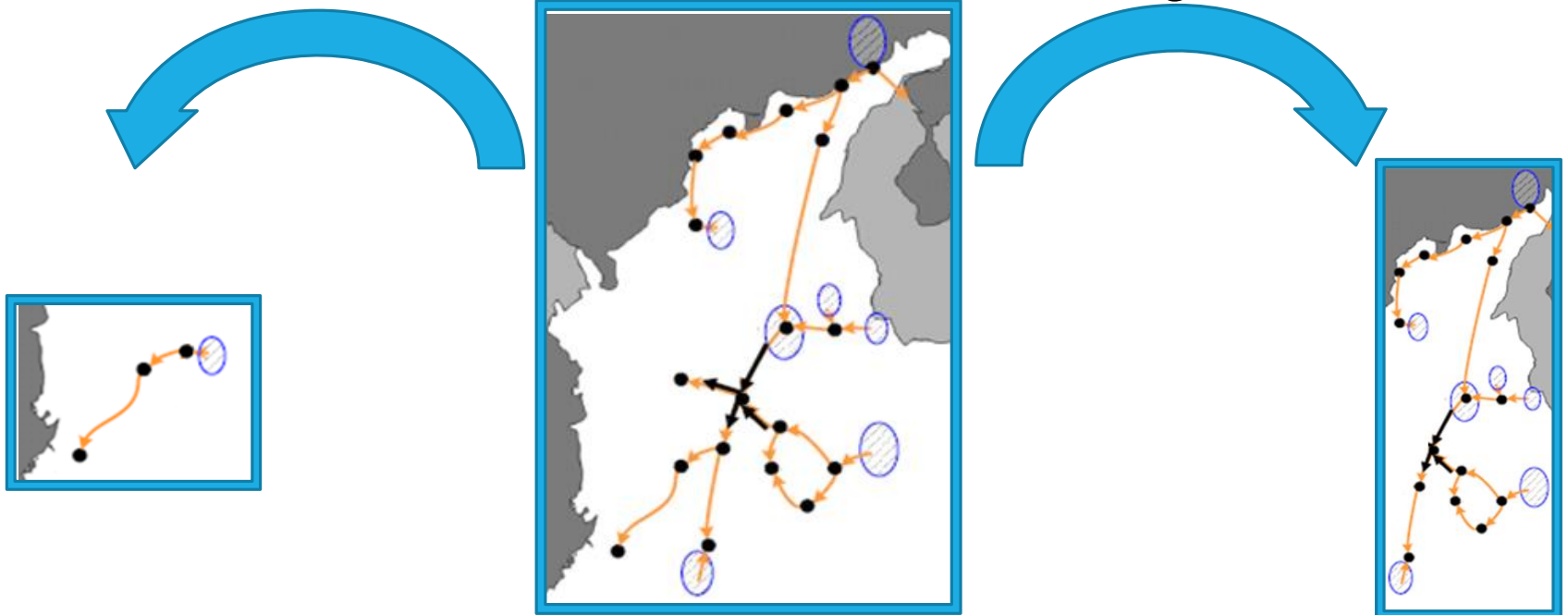
# Plataforma de optimización y evaluación de alternativas de inversión



# Módulos para aislar y concentrar

Módulo para aislar ramales:  
Evaluación de alternativas de inversión y confiabilidad sectorizadas.

Módulo para concentrar red regulada:  
Evaluación de alternativas de inversión y confiabilidad globalizadas.



# Módulo para aislar

La red inicial cumple nodo a nodo:

$$T_{bj} + T_{dj} - T_{ja} - T_{jc} + \vec{r}_j = D_j$$

Donde

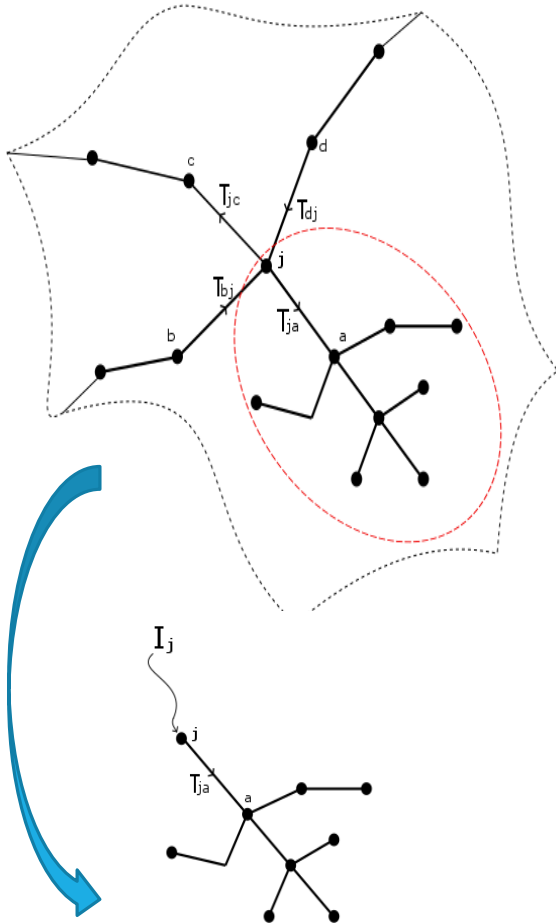
$$\vec{r}_j = [r_{Comercial} \quad r_{Industrial} \quad \dots \quad r_{Termoeléctrica}]$$

Al independizar:

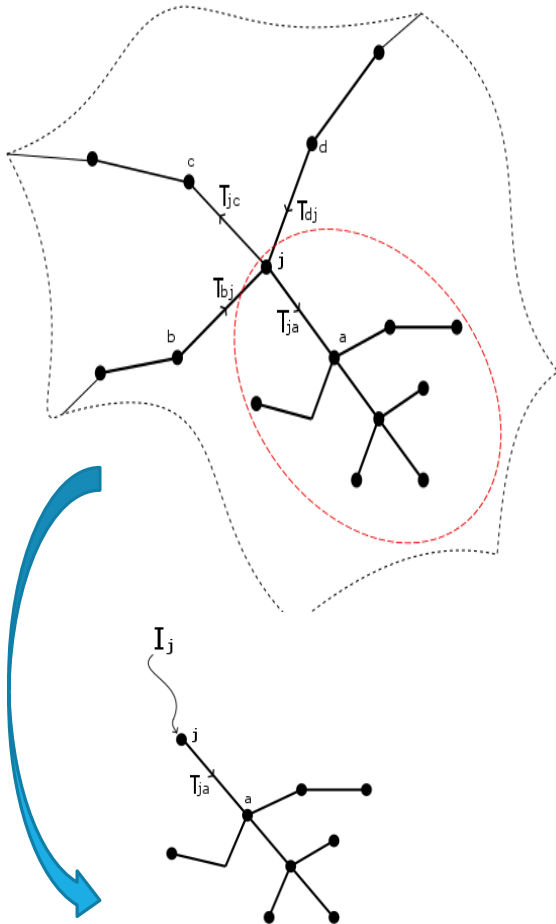
- La demanda permanece
- Los flujos IN-OUT se desconectan

**FLUJO PROMEDIO:** se adiciona un campo para conservar el equilibrio:

$$I_j = T_{bj} + T_{dj} - T_{jc}$$



# Módulo para aislar



Flujo promedio real (gas desabastecido):

$$I_{prom} = \frac{I_{Bajo\ fallo} \cdot df + I_{normal} \cdot (365 - df)}{365}$$

Con  $df$ : días equivalentes de fallo.

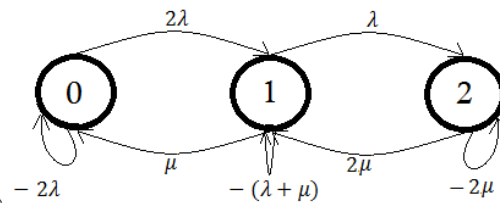
Si  $x = \frac{365}{365 - df \cdot p}$  se define como factor de incremento, y teniendo presente la profundidad ( $p$ ) de un fallo:

$$I_{prom} = I_j = \frac{\overbrace{x[(1-p) \cdot I_j \cdot df]}^{\text{Estado de fallo}} + \overbrace{x[I_j(365 - df)]}^{\text{Estado normal}}}{365}$$

Se obtiene el costo equivalente a este flujo

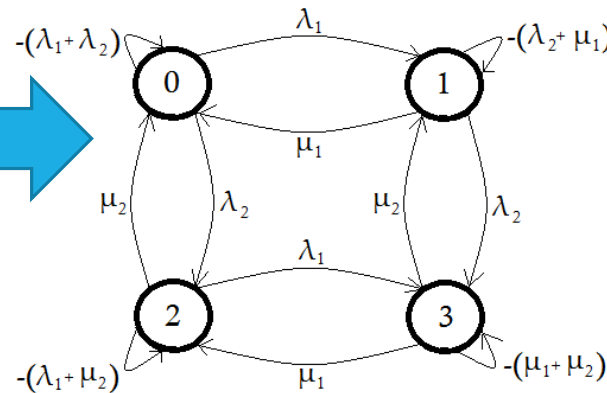
# Módulo para aislar

Fallos equivalentes: mediante un modelo de Markov se describe el modelo existente:



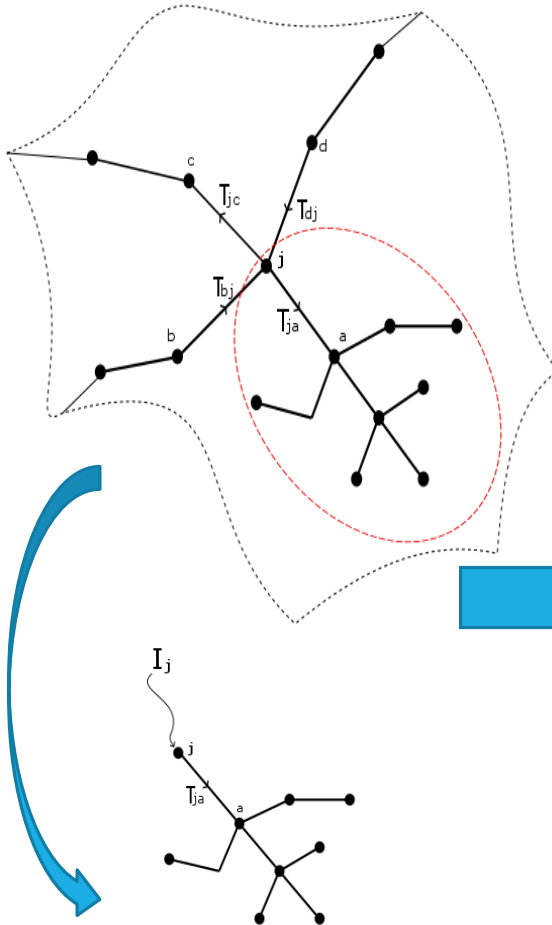
$$\begin{bmatrix} \dot{P}_0 \\ \dot{P}_1 \\ \dot{P}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\lambda & \mu & 0 \\ 2\lambda & -(\lambda + \mu) & 2\mu \\ 0 & \lambda & -2\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}$$

$$[\dot{P}] = [M][P] = 0$$



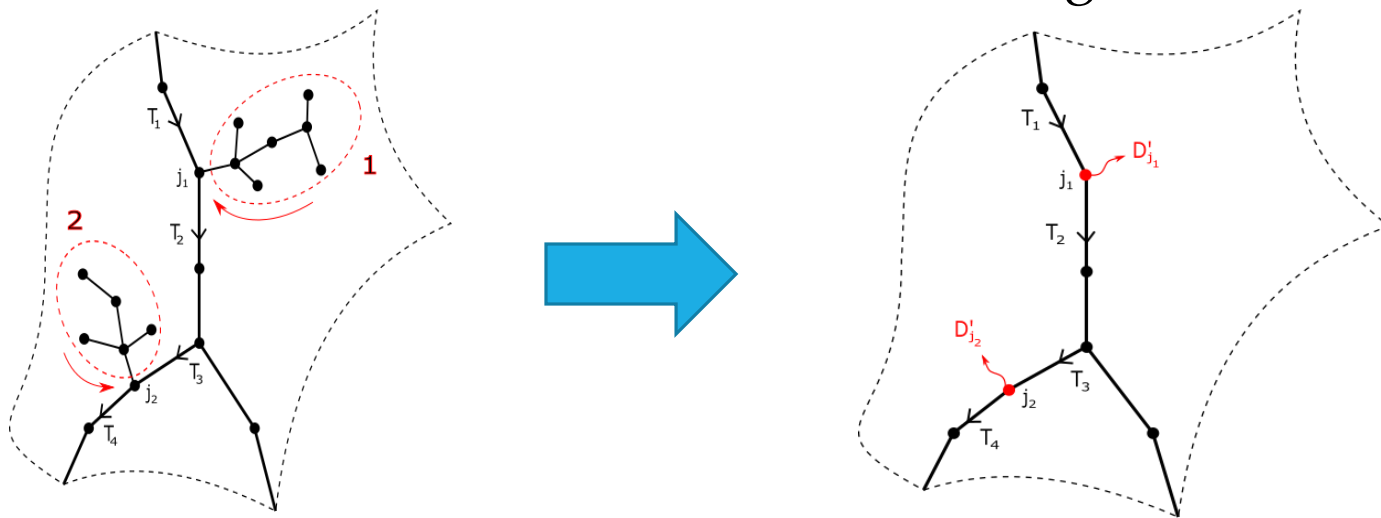
$P(S)$ : probabilidad de residencia en  $S$ ,  $m(S)$  tiempo de residencia media en  $S$ ,  $T(S)$  tiempo medio de ciclo.

$$P(S) = \frac{m(S)}{T(S)} \quad \text{o} \quad m(S) = P(S) * T(S)$$



# Módulo para concentrar

El sistema concentra los ramales en una “Red Regulada”:



Se debe conservar equilibrio en flujos y costos. Se adiciona demanda equivalente  $D'$  al ramal concentrado:

$$T_1 - T_2 - T_3 + \frac{1}{r_{j_1}} = D_{j_1}$$

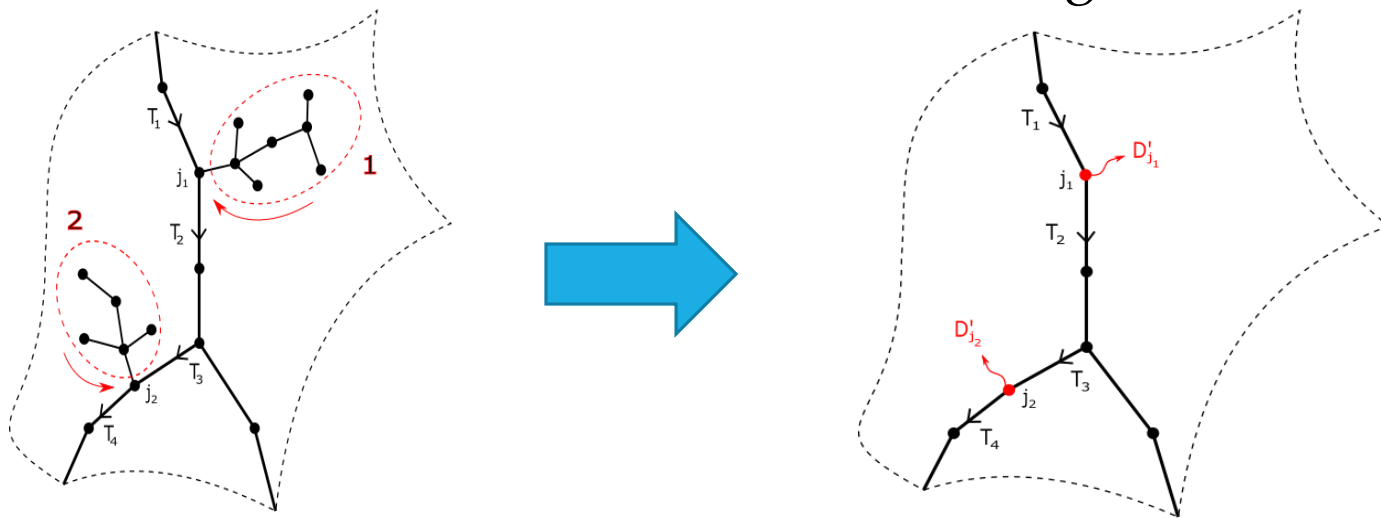
$$T_1 - T_2 + \frac{1}{r_{j_1}} = D_{j_1} + D'_{j_1}$$

$$T_1 - T_2 + \frac{1}{r_{j_1}} = D_{j_1} + T_3$$

$$D'_{j_1} = T_3$$

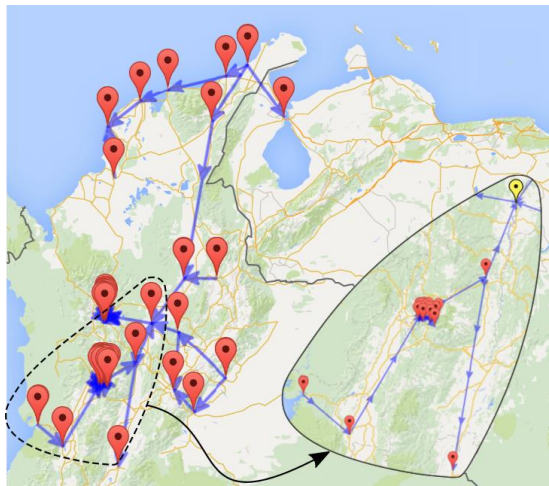
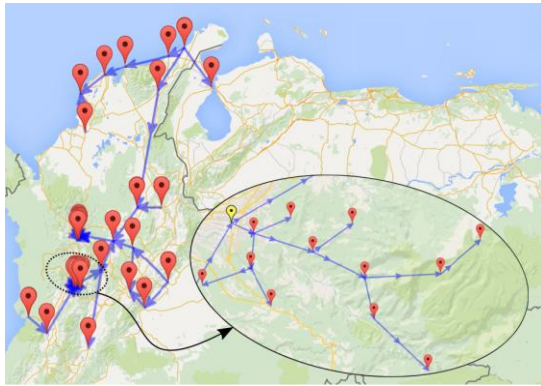
# Módulo para concentrar

El sistema concentra los ramales en una “Red Regulada”:



Al concentrar, la variabilidad no se ve afectada, ya que los flujos por la Red Regulada siguen siendo sometidos a la aleatoriedad de los fallos presentes en los campos existentes y en los tramos Regulados. Las demandas restringidas se siguen cumpliendo.

# Algunas zonas de la red



Tramo	Todo el país		Ramal aislado	
	Transporte (MPCD)	Confiabilidad	Transporte (MPCD)	Confiabilidad
<b>CQR-Nodo1</b>	24.9634941	1	24.04043699	1
<b>Nodo1-Nodo2</b>	5.05733834	0.99014784	5.078259059	0.99013419
<b>Nodo1-Nodo5</b>	0.03699955	0.989051555	0.03772427	0.990157535
<b>Nodo1-Nodo6</b>	16.5606963	0.976590193	15.55469636	0.976380122
<b>Nodo2-Nodo3</b>	0.75922285	1	0.763296626	1
<b>Nodo2-Nodo4</b>	2.23613102	1	2.245484206	1
<b>Nodo6-Nodo7</b>	2.98430435	1	3.023824567	1
<b>Nodo6-Nodo8</b>	10.3749778	0.990035928	9.264309417	0.989211651
<b>Nodo8-Nodo9</b>	3.2970694	1	2.803626696	1
<b>Nodo8-Nodo11</b>	3.90984733	1	3.358063669	1
<b>Nodo9-Nodo10</b>	2.41538673	0.989383979	1.979567974	0.989885086
<b>Nodo11-Nodo12</b>	1.28818076	1	1.046207181	1



# Validación del modelo

---

- El modelo se validó en el año 2014 contra estudios previos de confiabilidad realizados por organismos nacionales de regulación, tendiendo presente diversas topologías de la red a lo largo del tiempo.
- En el año 2015 se validó contra estudios obtenidos por otros organismos de planeación mediante metodologías diferentes.
- En todos los casos los resultados no han superado diferencias focalizadas superiores al 2% y nacionales superiores al 0.5%

# Aplicabilidad en otras áreas

---

Gracias a los exitosos resultados obtenidos, actualmente todo el sistema de bases de datos, análisis de pérdidas técnicas, optimización y análisis focalizados han sido desarrollados, ejecutados y montados en los servidores de los organismos pertinentes.

En la ciudad de Pereira, se desarrolló y opera otra plataforma de optimización de flujo, pero a nivel de Transporte Urbano de Pasajeros. Esta plataforma permite prever aspectos técnicos de operación y ajustar en caliente con el fin de mantener los parámetros de referencia.

# Conclusiones

---

La plataforma desarrollada permite:

- Realizar estudios de evaluación del costo de operación del sistema nacional de gas, en diferentes escenarios.
- Ejecutar estudios de evaluación de alternativas e inversiones en confiabilidad para el sistema nacional de gas.
- Evaluar inversiones en confiabilidad particularizadas sobre: red secundaria y red regulada.
- Evaluar alternativas de inversiones en confiabilidad por agente y prestador.
- Diseñar y evaluar alternativas de inversión a nivel de confiabilidad por situaciones atípicas y/o fenomenológicas.

---

GRACIAS



---

PREGUNTAS?