

## SEMINARIO “HERRAMIENTAS DE GESTIÓN Y CONTROL DEL RECURSO HÍDRICO URBANO”

### MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL A LA LUZ DEL DECRETO 3930 - 2010

---

Dic. 4 / 2013

**Luis Alejandro Camacho Botero, M.Sc., Ph.D.**

Profesor Asociado - Departamento de Ingeniería Civil y  
Ambiental

Facultad de Ingeniería – Centro de Investigaciones en  
Ingeniería Ambiental **CIIA**

# CONTENIDO

## MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL A LA LUZ DEL DECRETO 3930 - 2010

1. **Problemática de la Contaminación Hídrica en Colombia - Estrategias de Priorización Soportadas en Modelación**
2. Utilidad de los modelos matemáticos – Algunos Ejemplos
3. **Metodología para la obtención de un modelo predictivo de calidad del agua**



# Contaminación hídrica – Problemática en Colombia

- En Colombia cerca del 90% de las aguas residuales domésticas se vierten a los ríos **sin ningún tipo de tratamiento**



Efluente de curtiembre sin tratamiento  
Cortesía Tania Santos



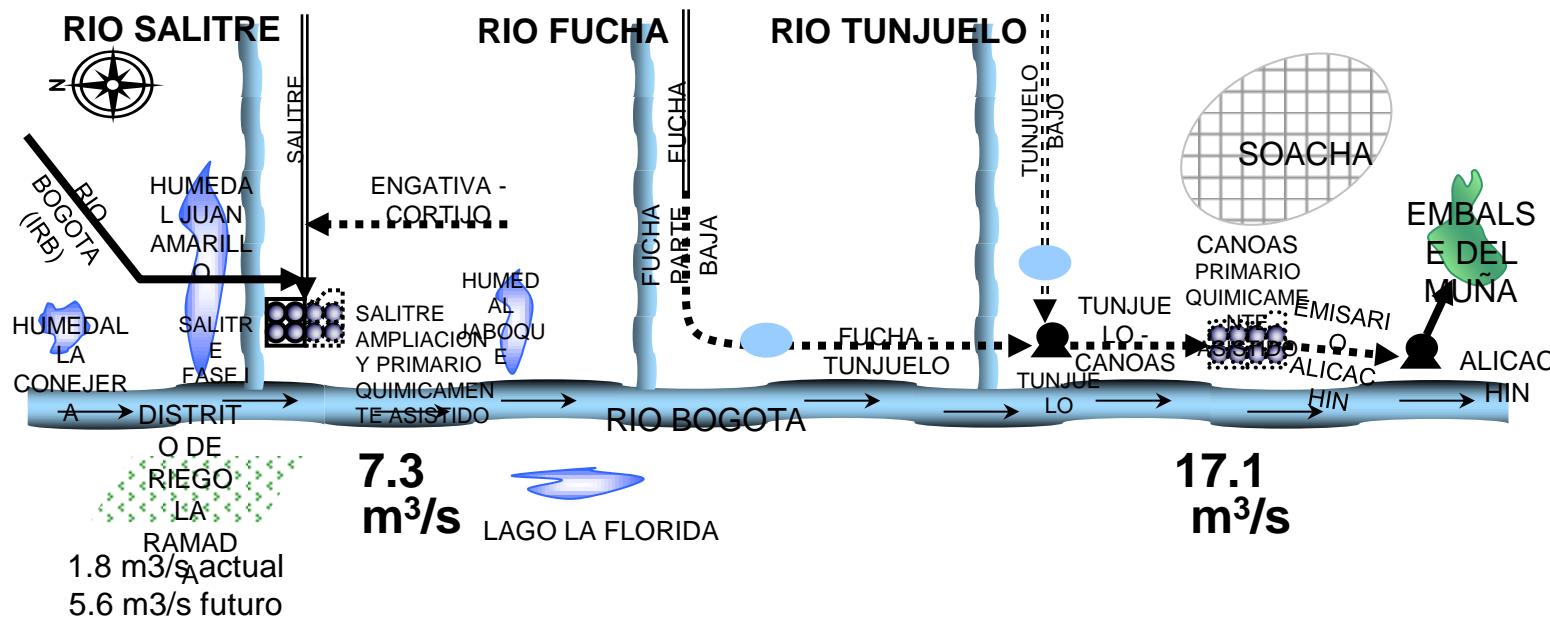
# Contaminación hídrica – Problemática en Colombia

- Gran parte de los sistemas actuales de tratamiento de aguas residuales presentan **deficiencias en cuanto a su capacidad y no cumplen con el proceso completo de tratamiento**



# Contaminación hídrica – Problemática en Colombia

- Los recursos para invertir en tratamiento de aguas residuales son limitados
  - Solo Río Bogotá US\$2500' + US\$110' + US\$450'



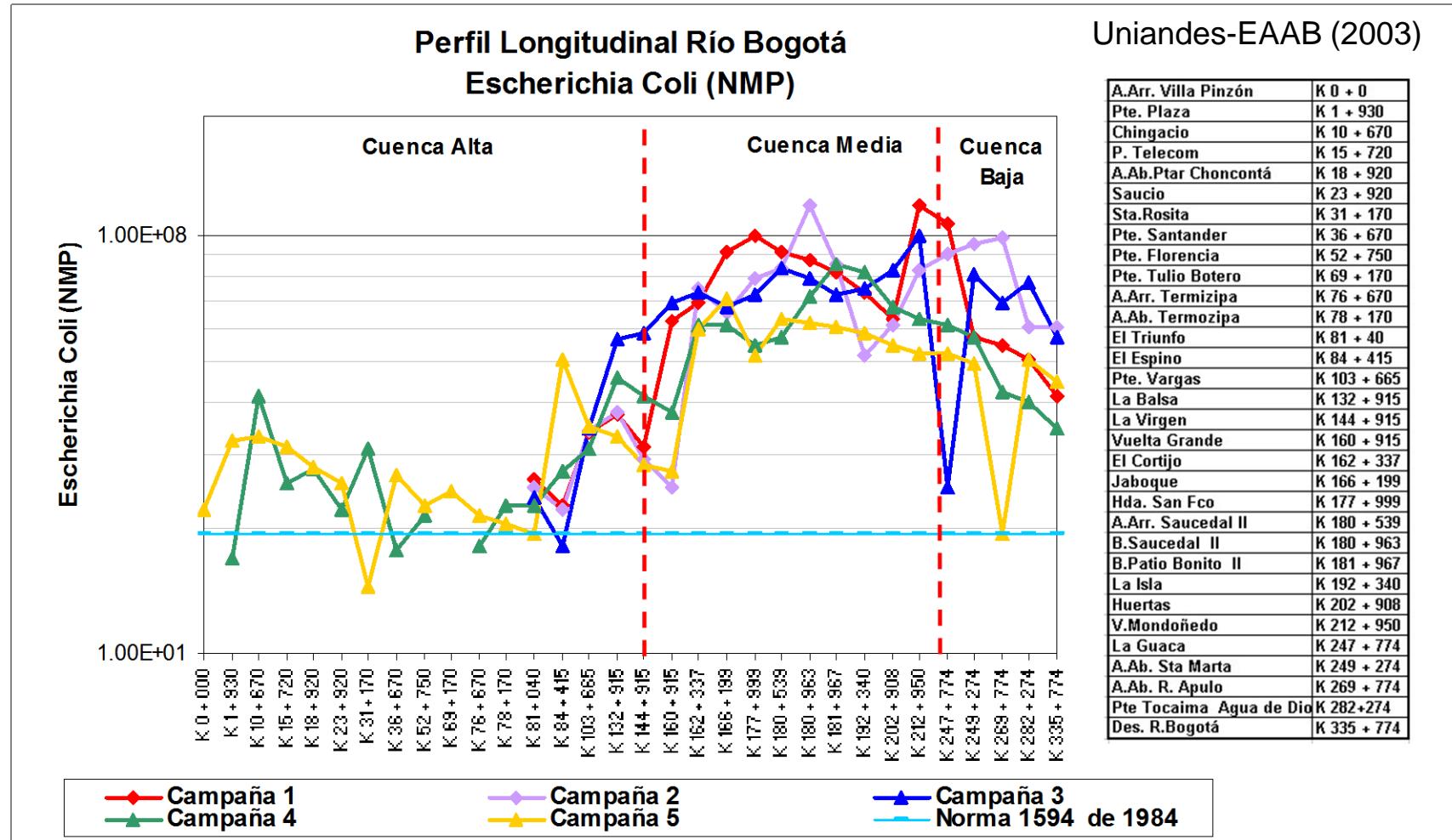
# Contaminación hídrica – Problemática en Colombia

- **Es necesario priorizar las inversiones!**



# Problemática - Patógenos

Contaminación por organismos patógenos generalizada en Colombia. Priorización de la inversión?



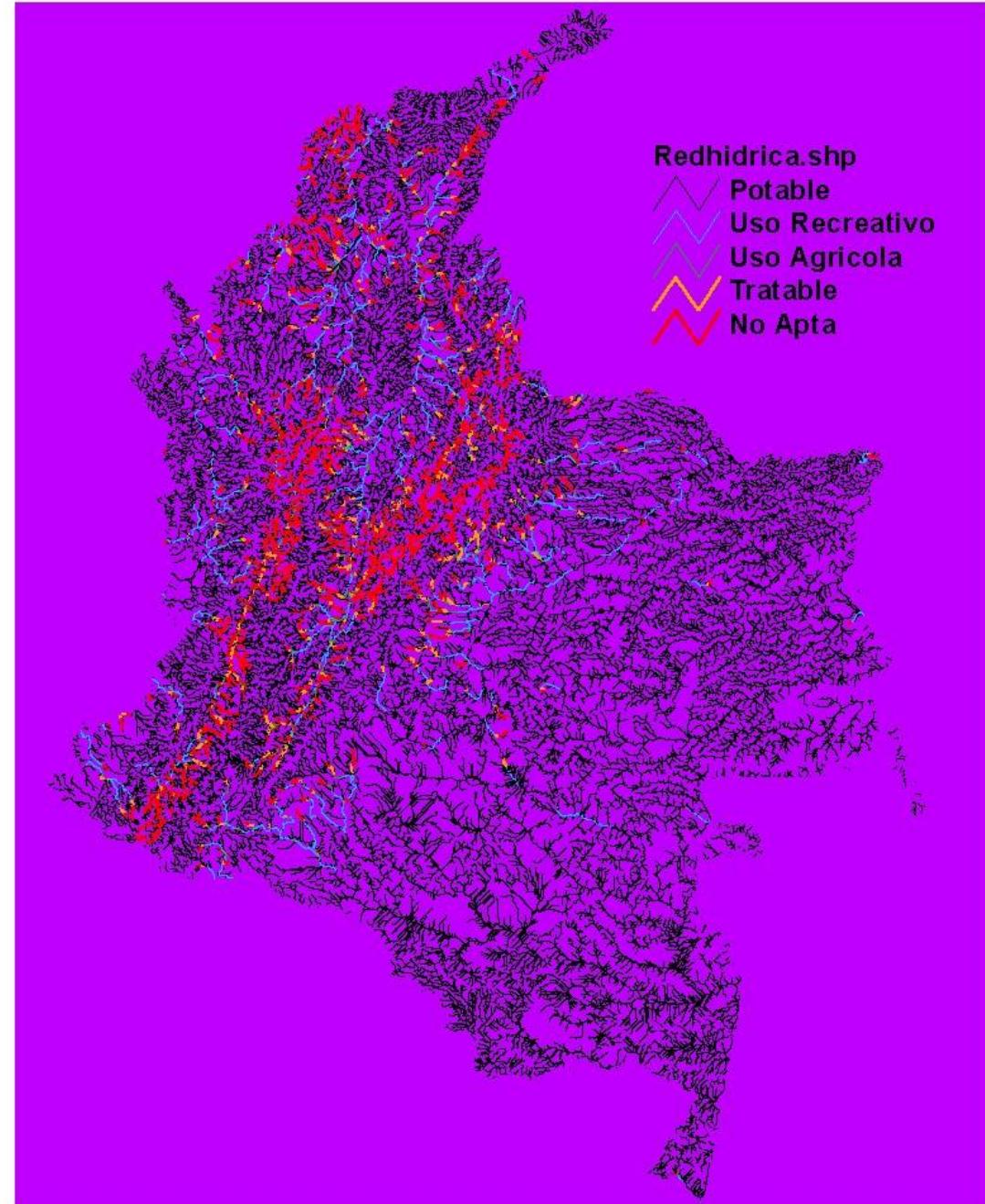
# Org. Patógenos – Colombia

En rojo: Agua No Apta para  
Potabilización

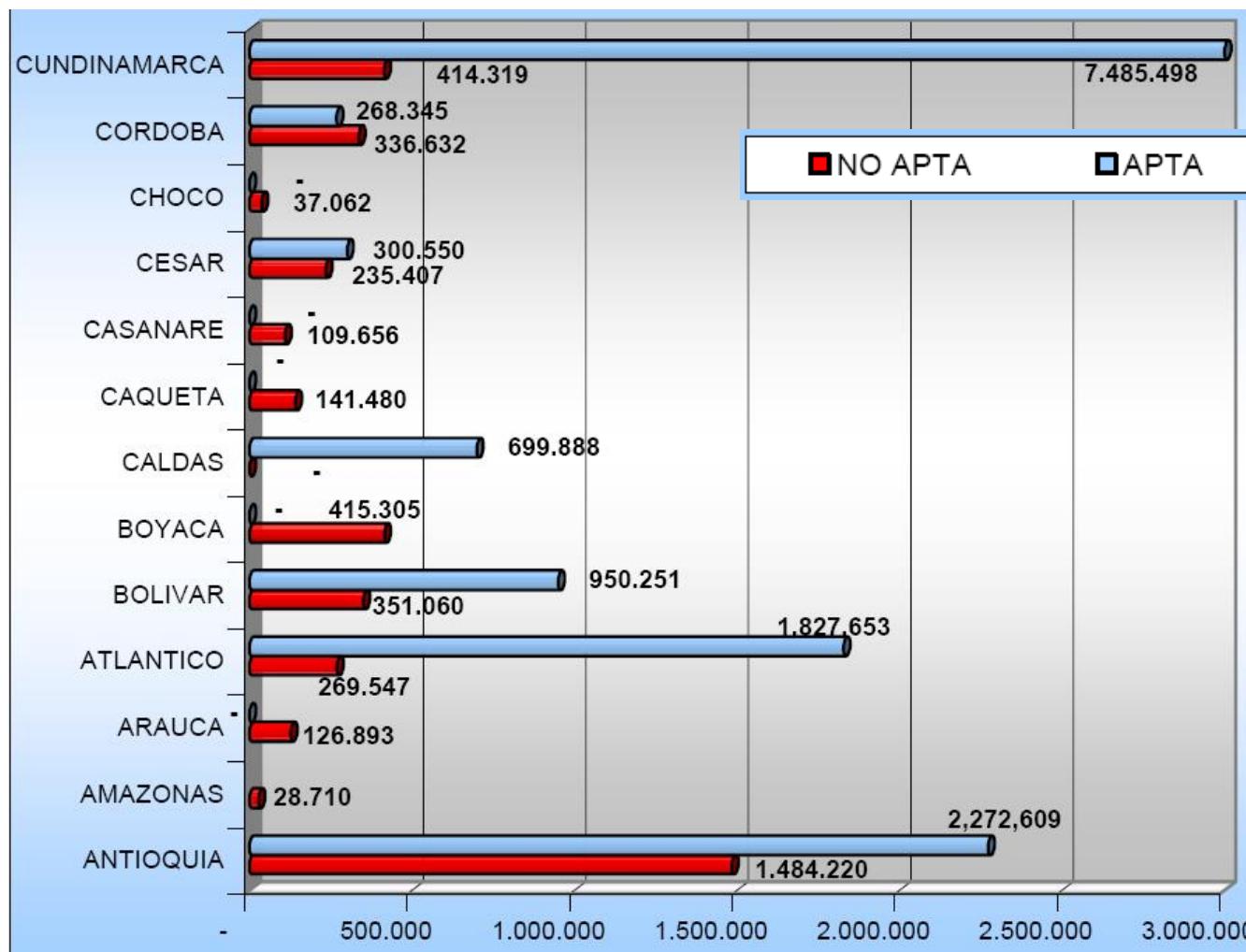
Barrera *et al.*, (2002)

Díaz-Granados *et al.*,  
(2002)

Uniandes-MMA (2001)



# Problemática - Patógenos

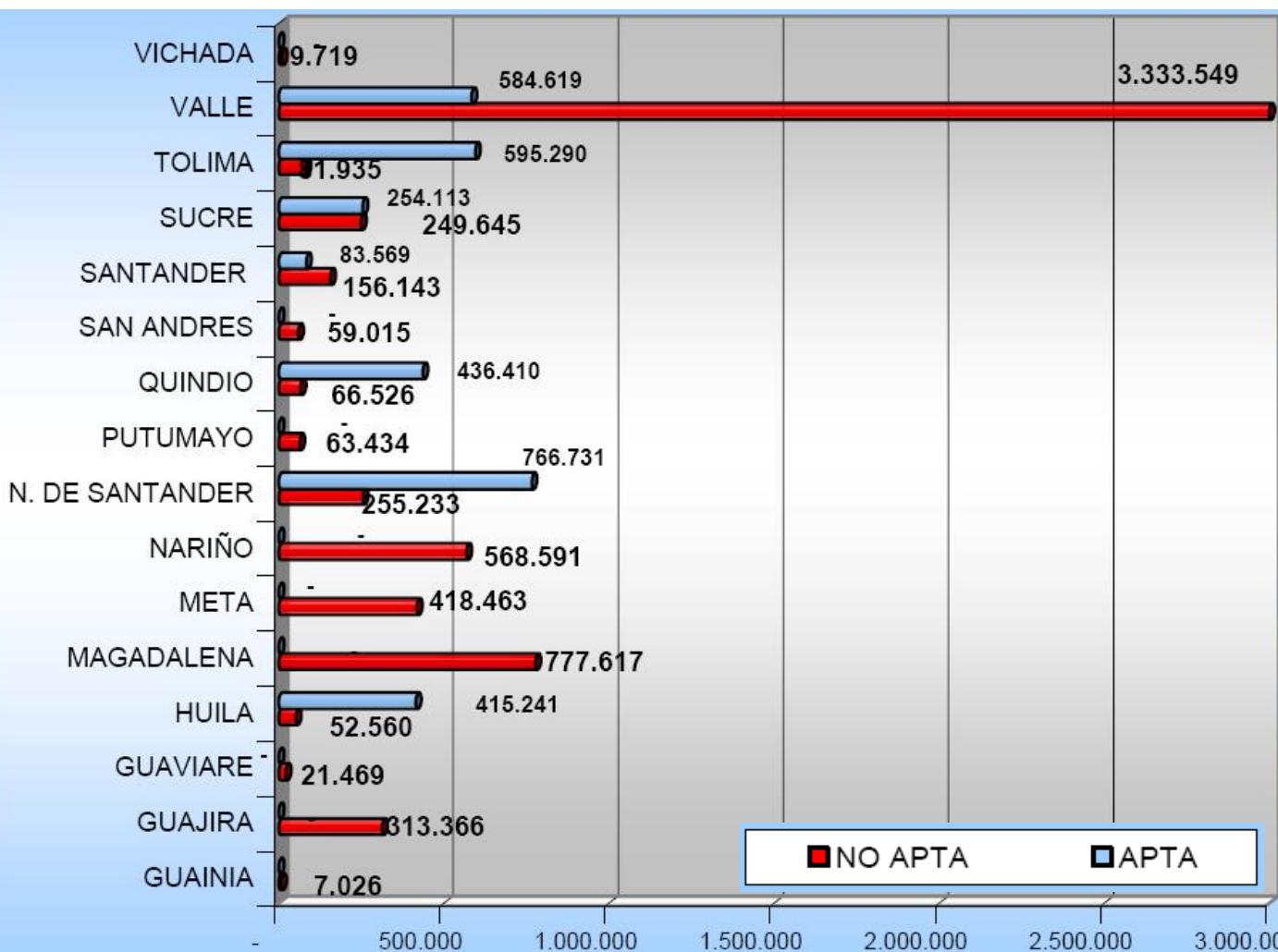


Población  
afectada por  
suministro de  
**agua no apta  
microbiológicamente**  
para el  
consumo humano

(Informe Nacional de la calidad del agua, Superintendencia de  
Servicios Públicos, 2005)



# Problemática - Patógenos



Población afectada por suministro de agua no apta microbiológicamente para el consumo humano

(SPP, 2005)



# Saneamiento Hídrico – Enfoque posible

- Debe establecerse primero *por qué es necesario tratar*, y *a qué nivel*, teniendo en cuenta una *visión integral de cuenca, la cantidad y calidad del agua residual producida, la capacidad de asimilación de la fuente receptora y los usos del agua aguas abajo*.



# Saneamiento Hídrico – Enfoque posible

- Priorización por **afectación de la salud pública**
- Priorización por **limitación de usos del agua aguas abajo** por violación de los estándares de calidad del agua
  - Uso estético (ejemplo basuras, desoxigenación – olores)
  - Uso de agua para **potabilización**
  - Riego **agrícola**
  - Recreación
  - Preservación de la vida acuática y la ecología (muerte de peces y otros organismos superiores, eutrofización de embalses, etc).



# Saneamiento Hídrico – Enfoque posible

El objetivo último en el tratamiento de vertimientos a las fuentes receptoras debe ser *alcanzar estándares de calidad que no presenten conflictos con los usos actuales y prospectivos del agua ni efectos nocivos a la salud pública.*



# Enfoque posible

- Manejo *integral de la contaminación urbana* (sistema de drenaje, alcantarillado, PTAR, fuente receptora)

Definición nivel de  
tratamiento óptimo



Red de alcantarillado o  
•Vertimiento  
•Cúanta agua residual y  
•de qué características?



PTAR

Usos del agua?  
Estándares de  
calidad de agua



Fuente receptora



## 2. Utilidad de los modelos matemáticos

El diseño de un plan de saneamiento o de un esquema de tratamiento de aguas vertidas a una fuente receptora es un problema que puede ser complejo, y con el fin de obtener soluciones técnicas apropiadas que sean **costo-efectivas**, los ingenieros y técnicos estamos en la obligación de proponer la **aplicación de las mejores tecnologías disponibles**.

Los modelos de **transporte** de contaminantes y de **calidad** del agua permiten **dimensionar y diseñar** soluciones estructurales (e.g. plantas de tratamiento) y no estructurales (e.g. tecnologías de producción más limpias) requeridas para alcanzar estándares de calidad de agua bajo diferentes niveles de contaminación y/o tratamiento.



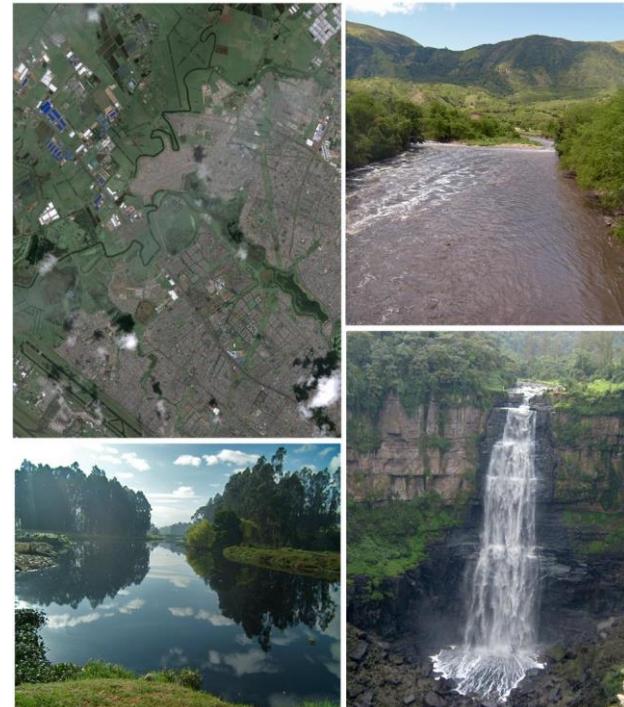
# Utilidad de los modelos – Algunos Ejemplos

- *Río Bogotá*
- *Río Magdalena*
- *Río Grande de Tárcoles*

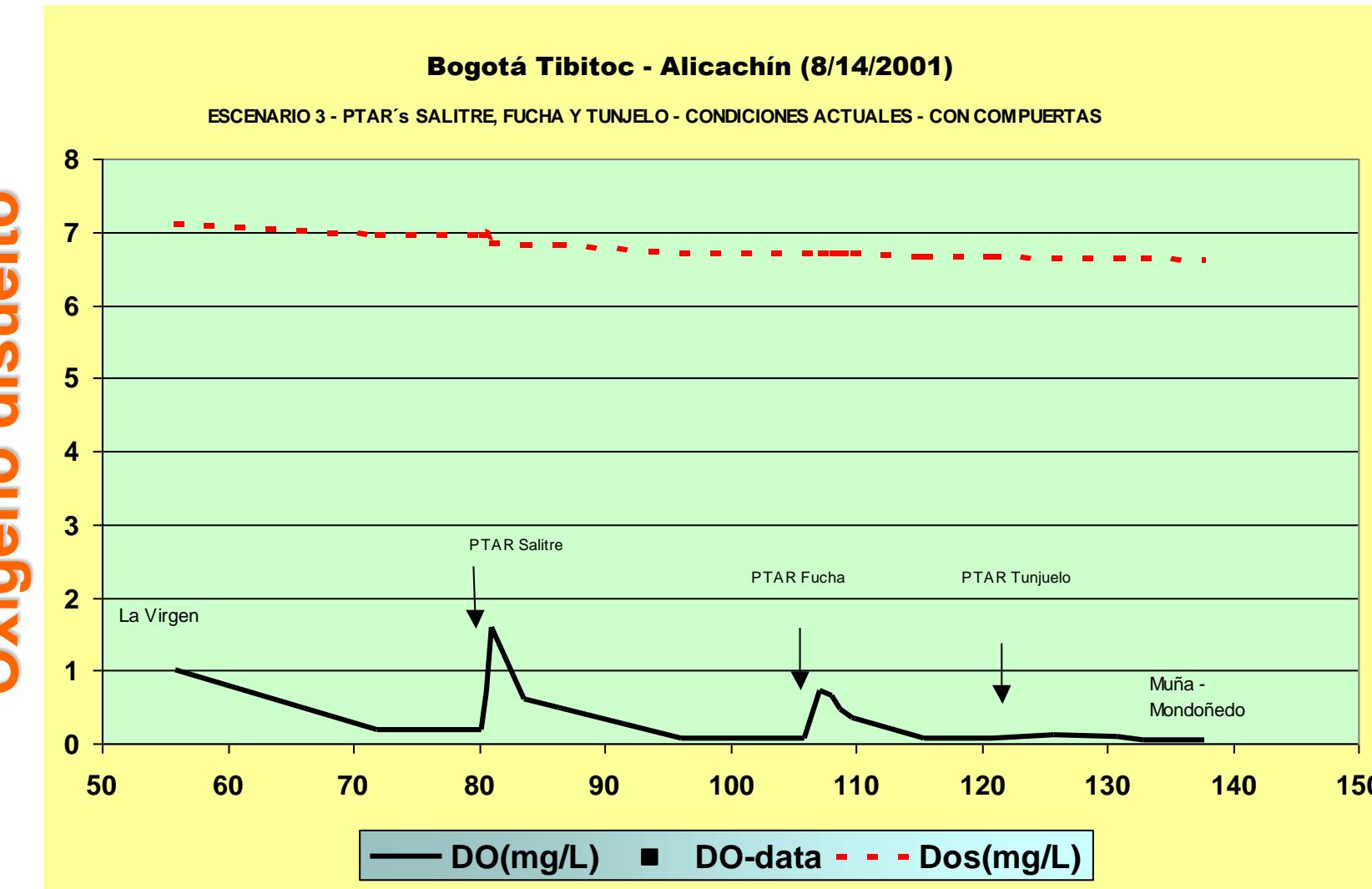


# Río Bogotá

- (Uniandes – EAAB, 2001-2002) Modelación de la calidad del agua del Río Bogotá
- (UNAL- CAR, 2007- 2008) Diseño de la red de calidad hídrica del Río Bogotá
- (UNAL – EAAB, 2010 - 2011) Modelación dinámica de la calidad del agua del Río Bogotá

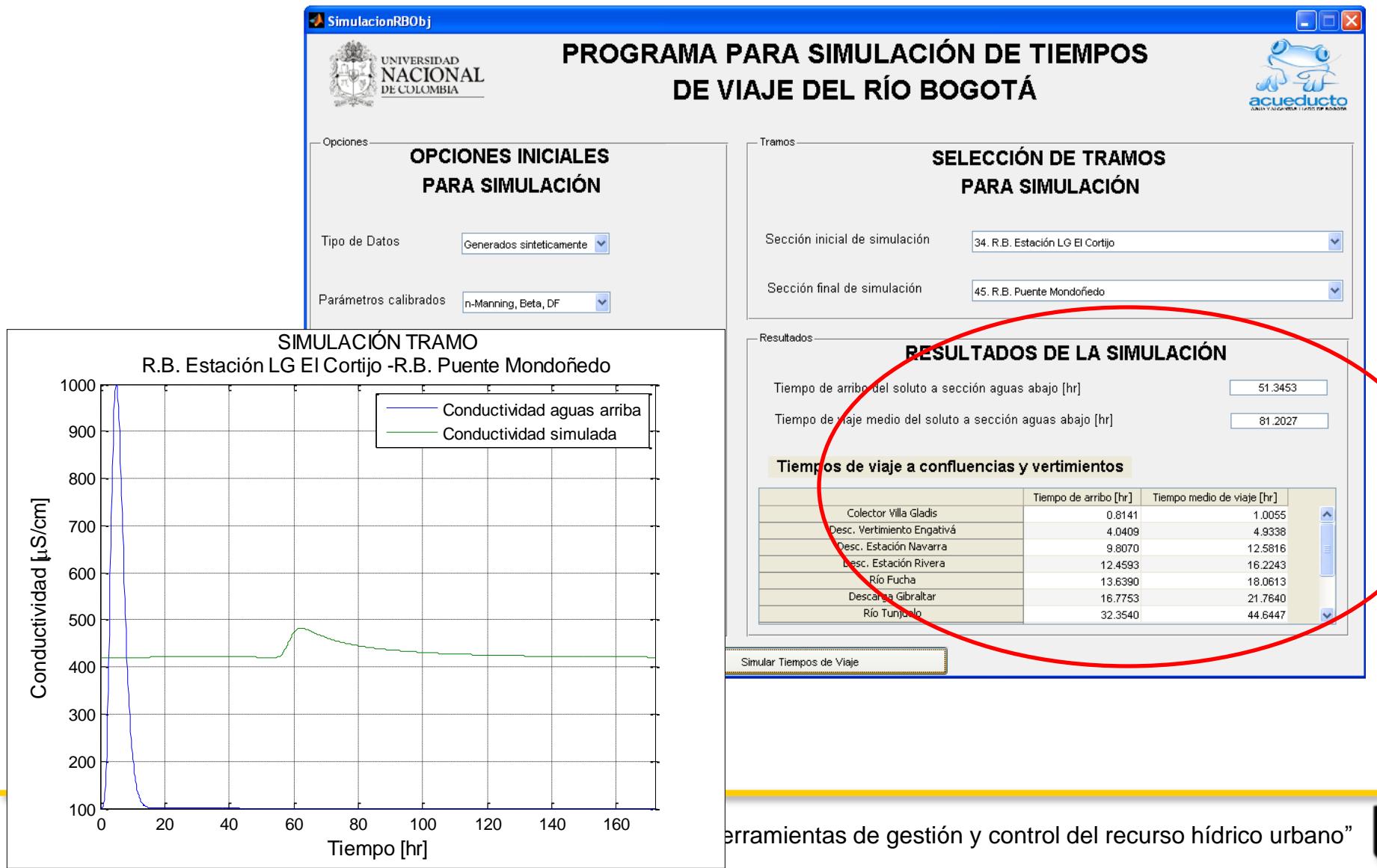


# POT 2002 Bogotá – Uniandes-EAAB 2002



# Río Bogotá - EAAB-UNAL 2010

## Herramienta de simulación de tiempos de viaje calibrada



# Río Bogotá

# Herramienta de Simulación de Escenarios calibrada para condiciones actuales

SITIOS DE MONITOREO SOBRE EL RÍO BOGOTÁ	
SITIO	AB5CISA
R.B. aguas arriba V\pinzón vía principal	K002+241
Confluencia quebrada Chigualá	K004+241
R.B. aguas abajo Quebrada Chigualá	K004+287
R.B. Puente plaza de mercado V\pinzón	K004+586
Confluencia Quebrada Quinchá	K004+591
R.B. aguas arriba descarga alcantarillado V\pinzón	K005+095
R.B. Puente última descarga alcantarillado V\pinzón	K005+226
Confluencia Quebrada San Pedro	K007+916
R.B. Puente acceso Stock 4:40	K011+156
R.B. Pte. de madera - acceso a. abajo Q. Chingacio	K012+966
R.B. Descarga puente de madera curtiembre	K012+966
Descarga curtiembre Puente de madera	K013+026
R.B. Puente Hacienda-Pto. intermedio	K014+466
R.B. Agregados Chocantá	K015+241
Descargas Agregados Chocantá	K015+246
R.B. aguas abajo Agregados Chocantá	K015+796
R.B. Puente de madera Tarabita-Pto. intermedio	K017+291
R.B. Puente aguas arriba Río Tejar	K020+256
Confluencia Río Tejar	K021+456
R.B. Puente vía Chocontá- Cucunubá	K024+051
R.B. Puente aguas arriba PTAR Chocontá	K024+987
Descarga PTAR Chocontá	K024+992
R.B. Puente aguas abajo PTAR Chocontá	K026+156
R.B. Pto. Intermedio arriba Saucío	K028+200
R.B. Estación Telemétrica Saucío	K032+056
R.B. aguas arriba Río Sisga	K034+456
Confluencia Río Sisga	K034+556
R.B. aguas abajo Confluencia Río Sisga	K036+545
R.B. Puente intermedio Coto Park	K039+005



# Río Bogotá

## Herramienta de Visualización de Resultados y Comparación de Escenarios

**PROGRAMA PARA LA COMPARACIÓN DE ESCENARIOS EN EL RÍO BOGOTÁ**

Escenarios

Archivo Ayuda

Tramo de Simulación: Subcuenca

Subcuenca: Río Bogotá completo

Tipo de Análisis: Concentración

ID	Escenario de simulación	Condición hidrológica	Condición s
1	Condiciones actuales...	Seca	Máxima
1	Condiciones actuales...	Promedio	Promedio
1	Condiciones actuales...	Húmeda	Mínima

Cargar Escenarios

VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

Opciones de visualización: Curvas de excedencia

Seleccionar determinante: Oxígeno disuelto

Norma	Graficar
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 1	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 2	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 3	<input checked="" type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 4	<input type="checkbox"/>
Objetivos de calidad del agua CAR Clase 5	<input type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Tratamiento doméstico convencional	<input type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Tratamiento doméstico con desinfe...	<input checked="" type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Uso agrícola	<input type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Uso pecuario	<input type="checkbox"/>
Decreto 1594 de 1984 Recreativo con contacto primario	<input type="checkbox"/>

Graficar Resultados

**acueducto**  
AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ

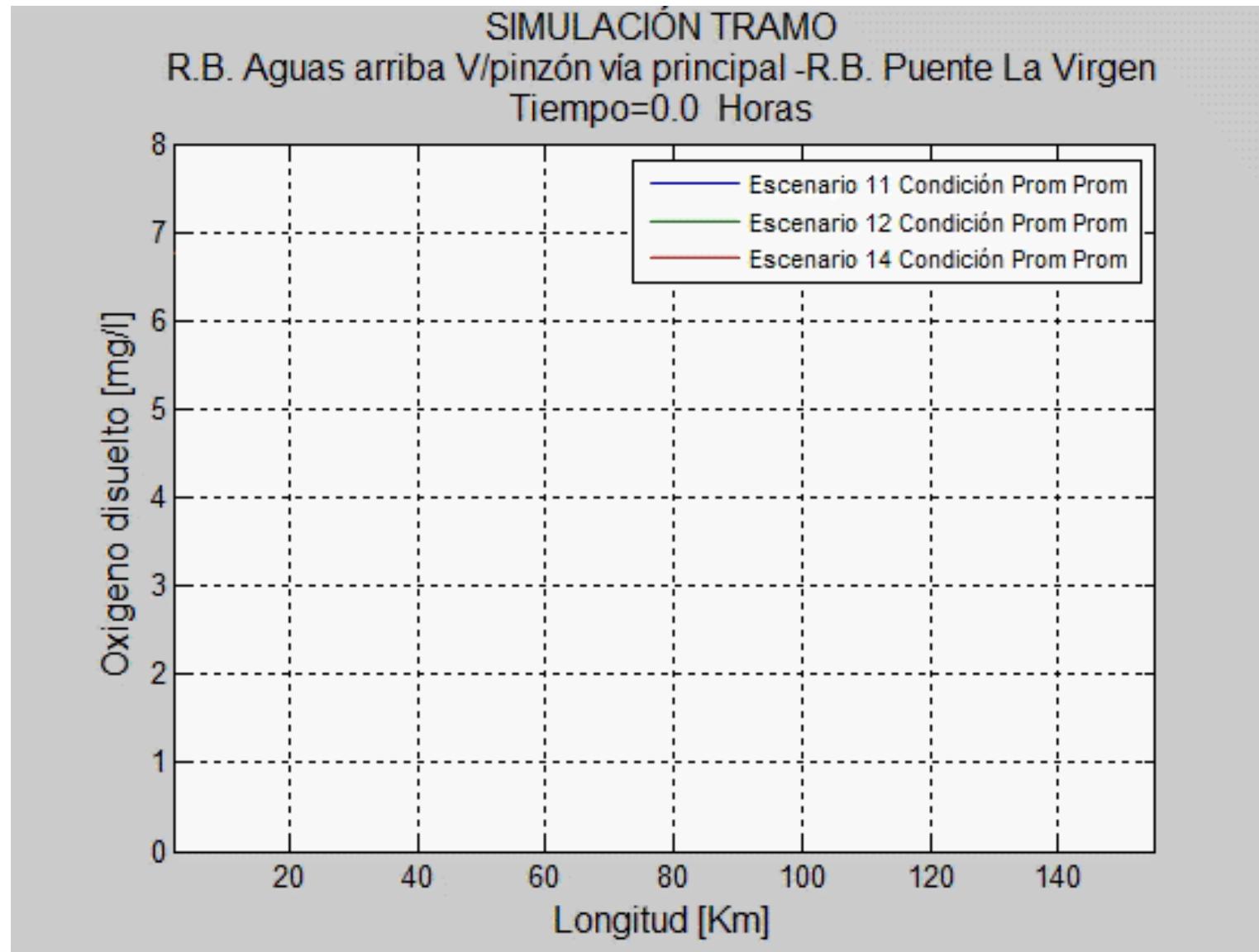




# Utilidad de los modelos – Algunos Ejemplos

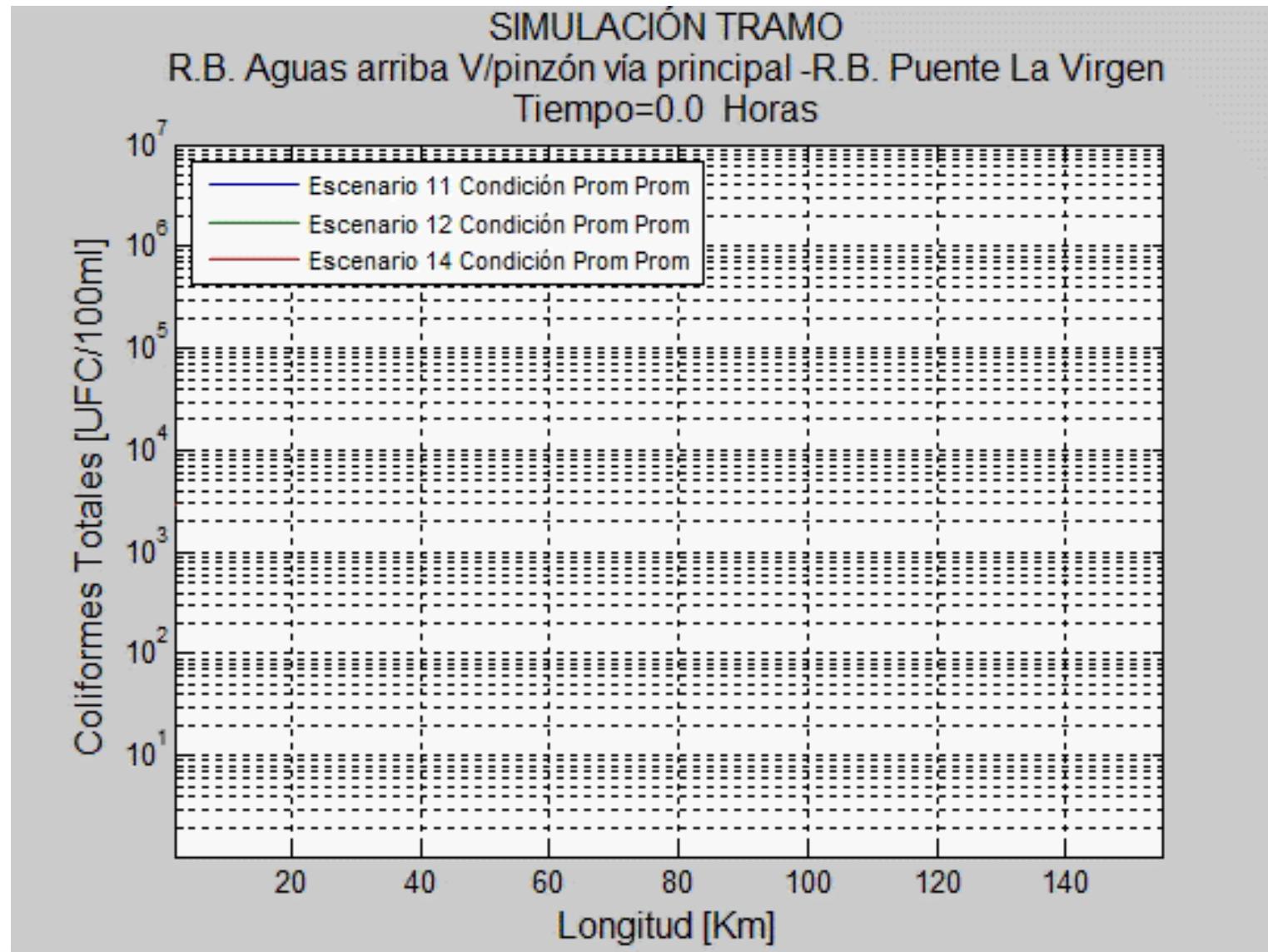
## Simulación de escenarios

Oxígeno disuelto



# Utilidad de los modelos – Algunos Ejemplos

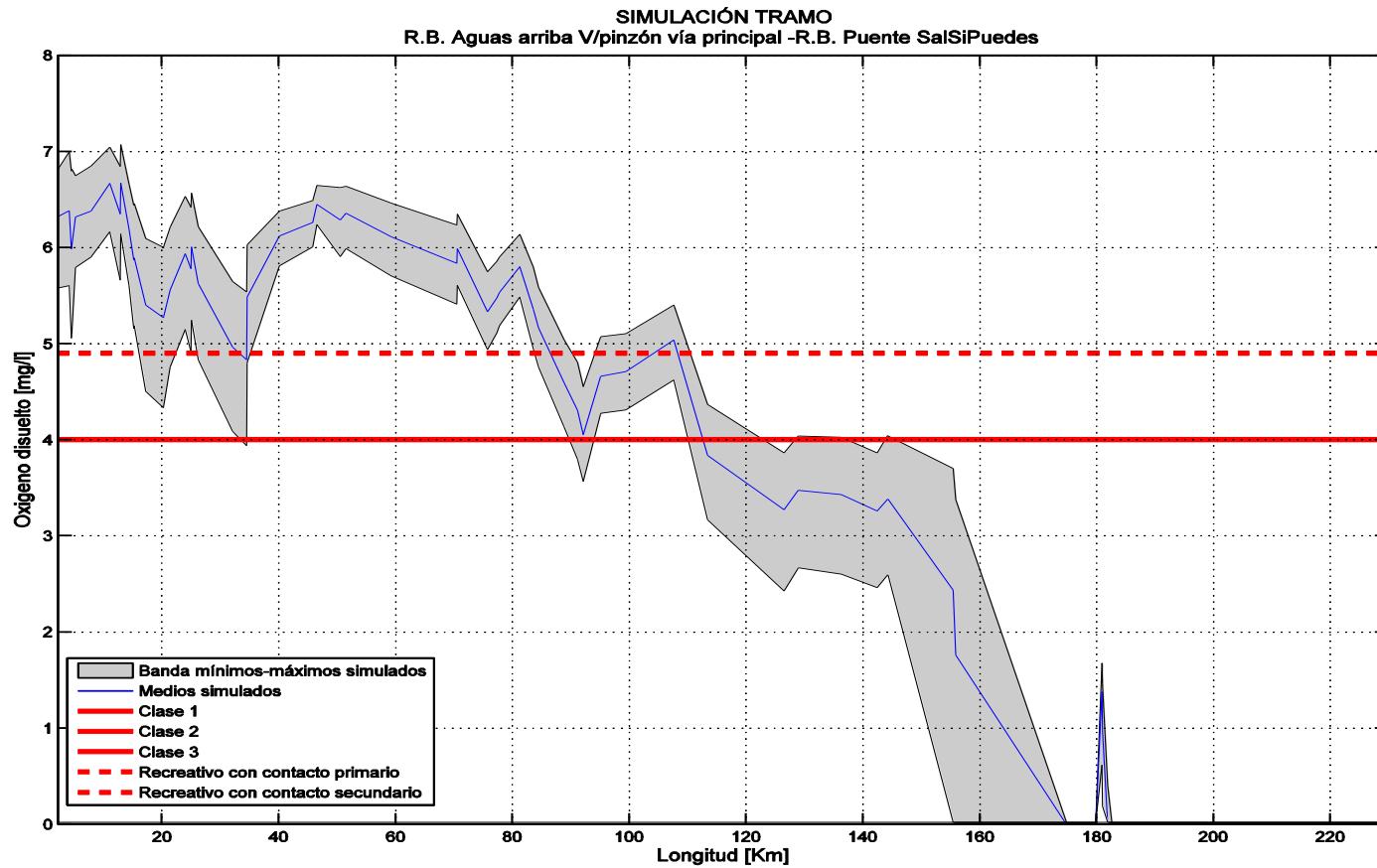
## Coliformes totales



# Ejemplo Resultados

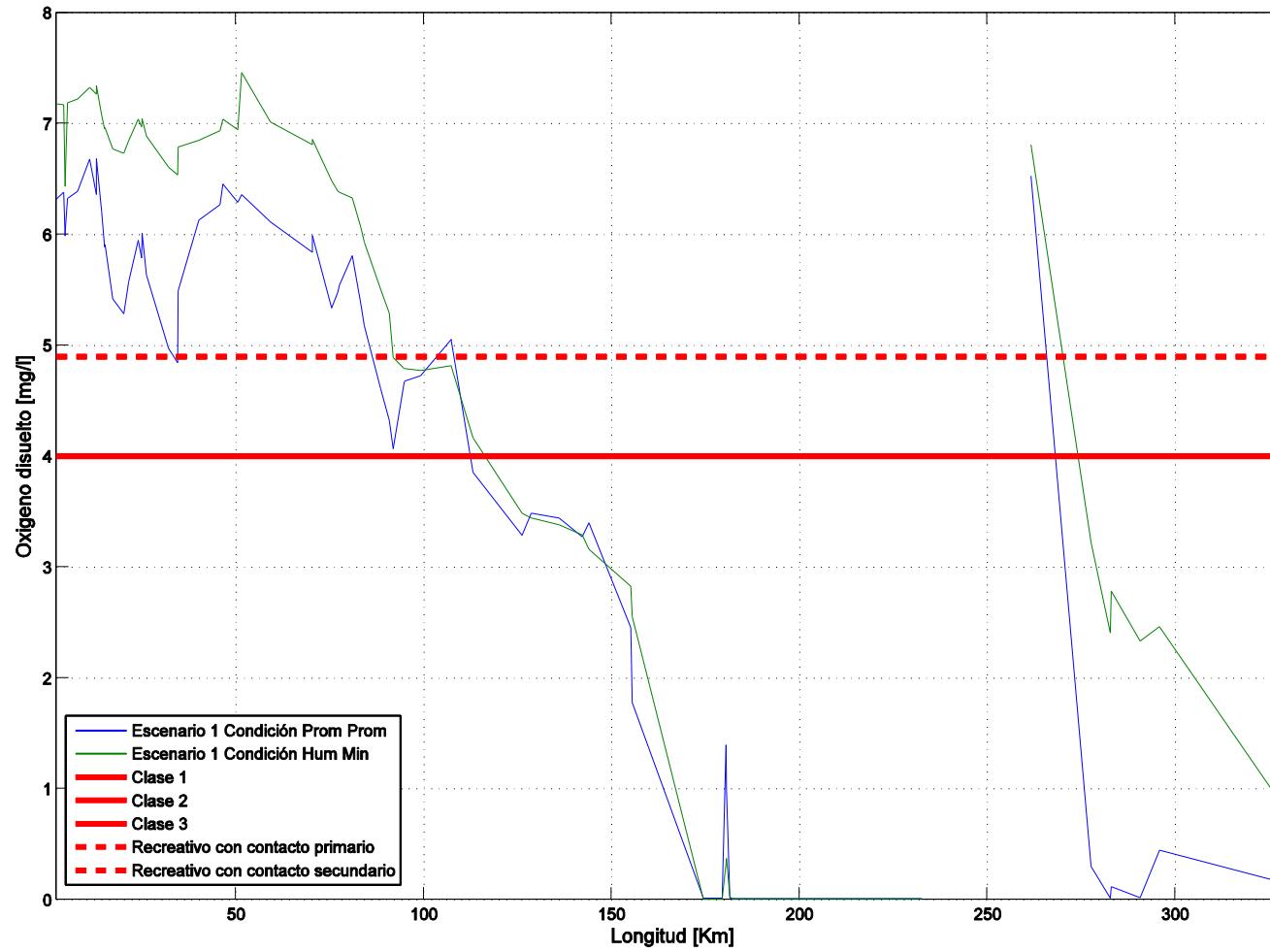
Simulación de escenarios (Banda máximos - mínimos)

Oxígeno disuelto



# Ejemplo Resultados

SIMULACIÓN TRAMO  
R.B. Aguas arriba V/pinznón vía principal -R.B. Puente SalSiPuedes  
Valores medios



# Conclusiones Río Bogotá

Con el modelo calibrado y validado se simularon 20 escenarios de saneamiento diferentes. Las conclusiones principales de los escenarios simulados son:

El escenario planteado de **tratamiento biológico de las efluentes de curtiembres y demás industrias de la Cuenca Alta**, junto con la implementación de los PSMV definido, para los municipios de la Cuenca Alta, se considera **NECESARIO para mantener condiciones aerobias** en la corriente, y condiciones favorables para **potabilización y riego agrícola** desde el Kilómetro 25 hasta el Kilómetro 85, justo aguas abajo de Tibitóc en la entrada del Río Negro.



# Conclusiones Río Bogotá

Bajo los escenarios modelados **no se alcanzará la Clase II** planteada para la parte alta de la Cuenca Alta del Río Bogotá, antes del kilómetro 25 en Suesca y en toda la Cuenca Alta, razón por la cual se recomienda este límite sea revisado por la autoridad ambiental CAR teniendo en cuenta los resultados del estudio.

No pueden, de acuerdo a la normatividad vigente, lleverse a cabo actividades de **uso agrícola en la parte alta del Río antes de Suesca, ni después de la confluencia del Río Negro en la cuenca media**. Solamente para los escenarios de **condiciones favorables con tratamiento secundario en la PTAR Salitre y la PTAR Canoas se presenta en la Cuenca Baja, a la altura de Tocaima**, la posibilidad de utilizar riego agrícola.



# Conclusiones Río Bogotá

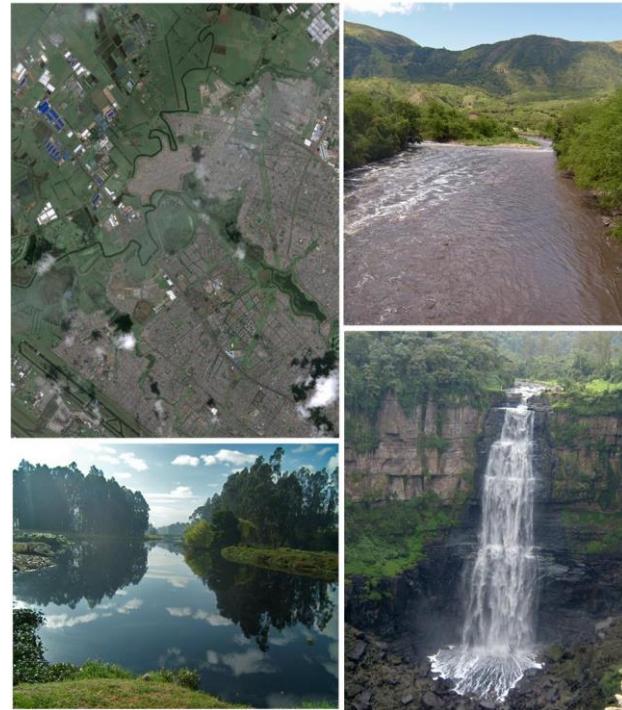
Además de tratamientos industriales y municipales en la Cuenca Alta definidos por los Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos a 2035, se considera **necesario tratamiento terciario en la PTAR Salitre, y la eliminación de las conexiones erradas de aguas residuales a los río Salitre, Fucha y Tunjuelo, para devolver condiciones aerobias al Río Bogotá en la Cuenca Media.**

**Costo aproximado – US\$3500 millones**



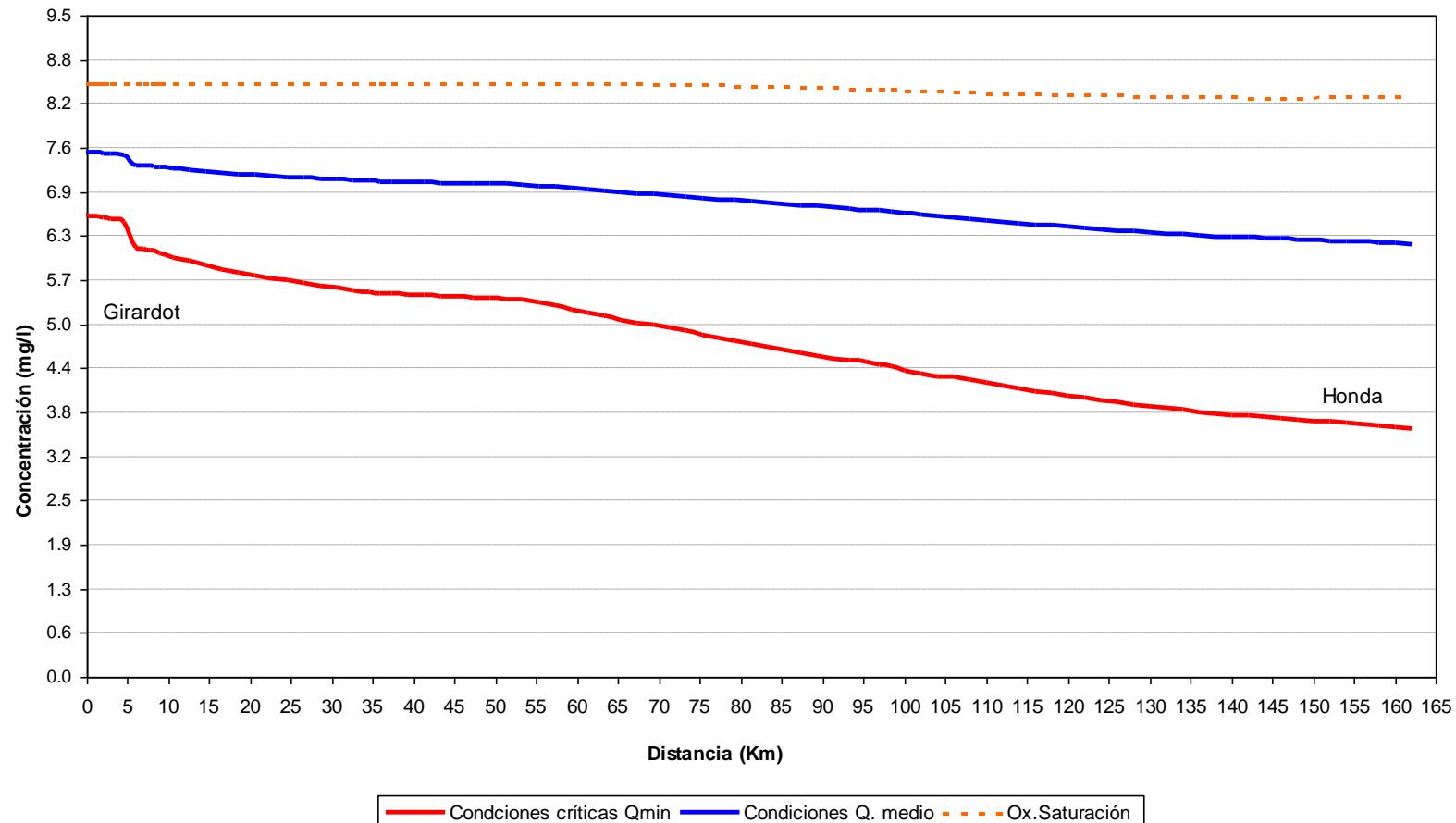
# Río Magdalena y Río Tárcoles Grande de Tárcoles

- (Uniandes – ACUAGYR) Modelación de la calidad del agua del Río Magdalena (Girardot – Honda) y caracterización de las aguas residuales de Girardot)
- (Uniandes – AyA 2003) Modelación de la calidad del agua del Río Grande Virilla de Tárcoles



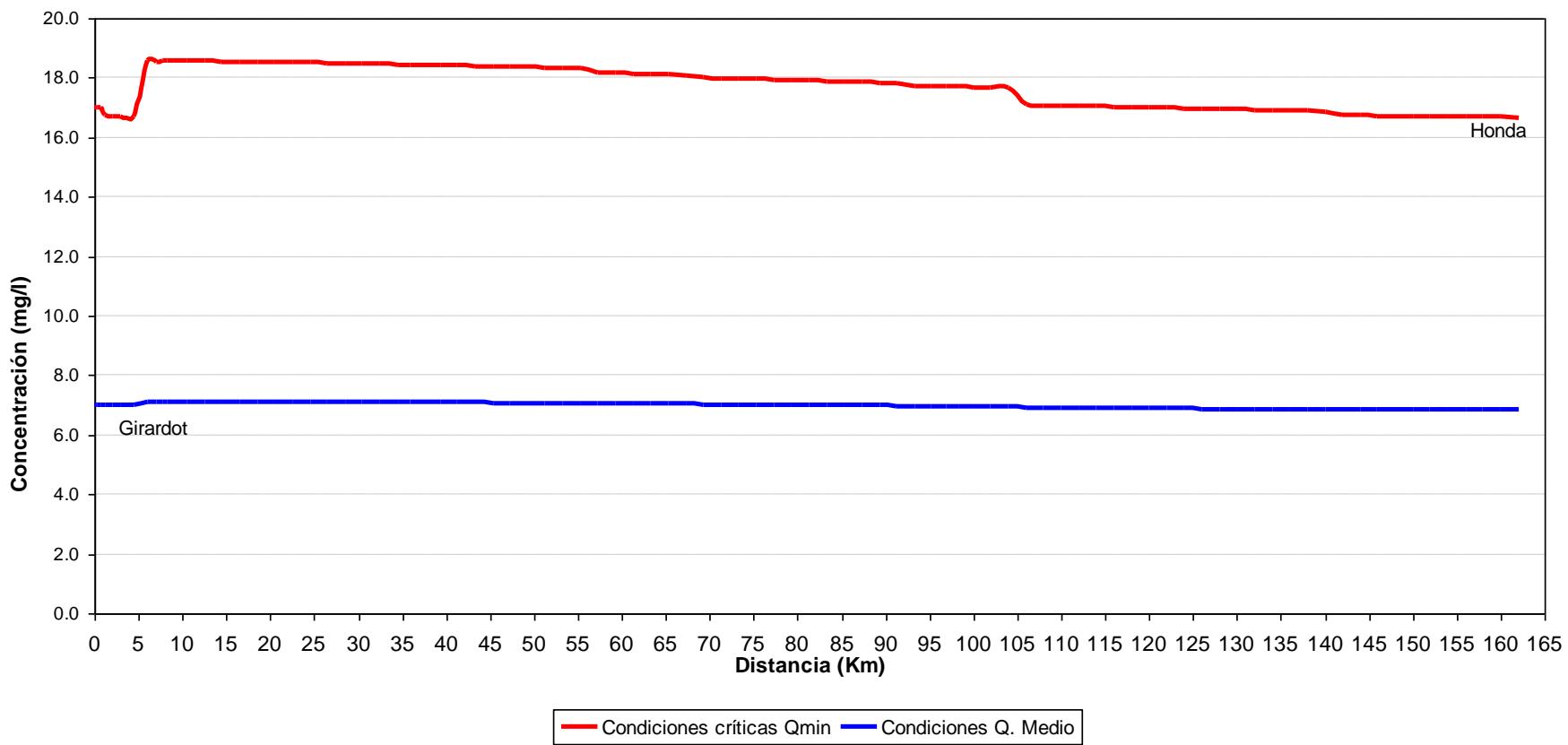
# Río Magdalena Girardot – Honda condiciones actuales

CONDICIONES ACTUALES "Sin Proyecto"  
Río Magdalena Girardot - Honda  
Oxígeno Disuelto

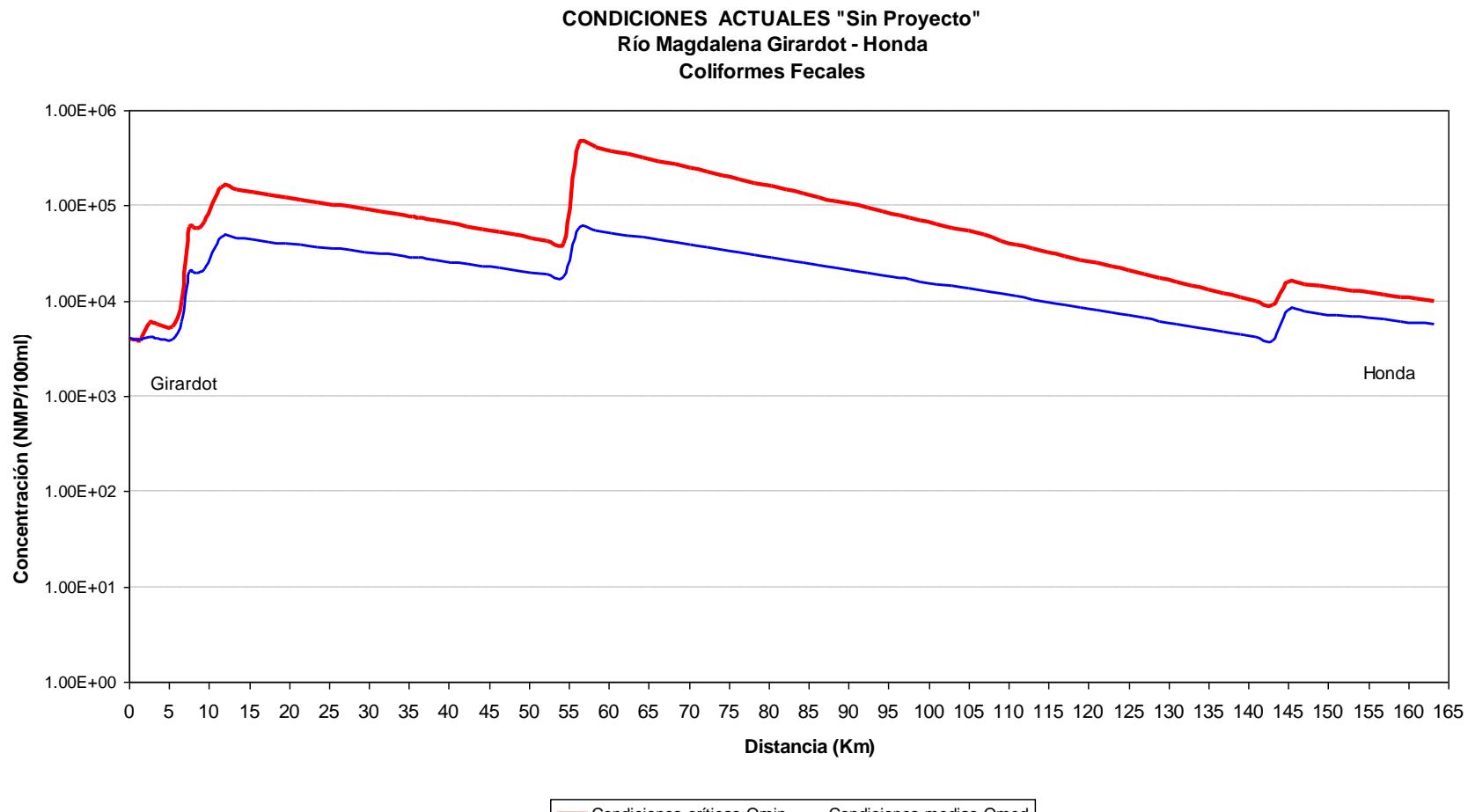


# Río Magdalena Girardot – Honda condiciones actuales

CONDICIONES ACTUALES "Sin Proyecto"  
Río Magdalena Girardot - Honda  
DBO

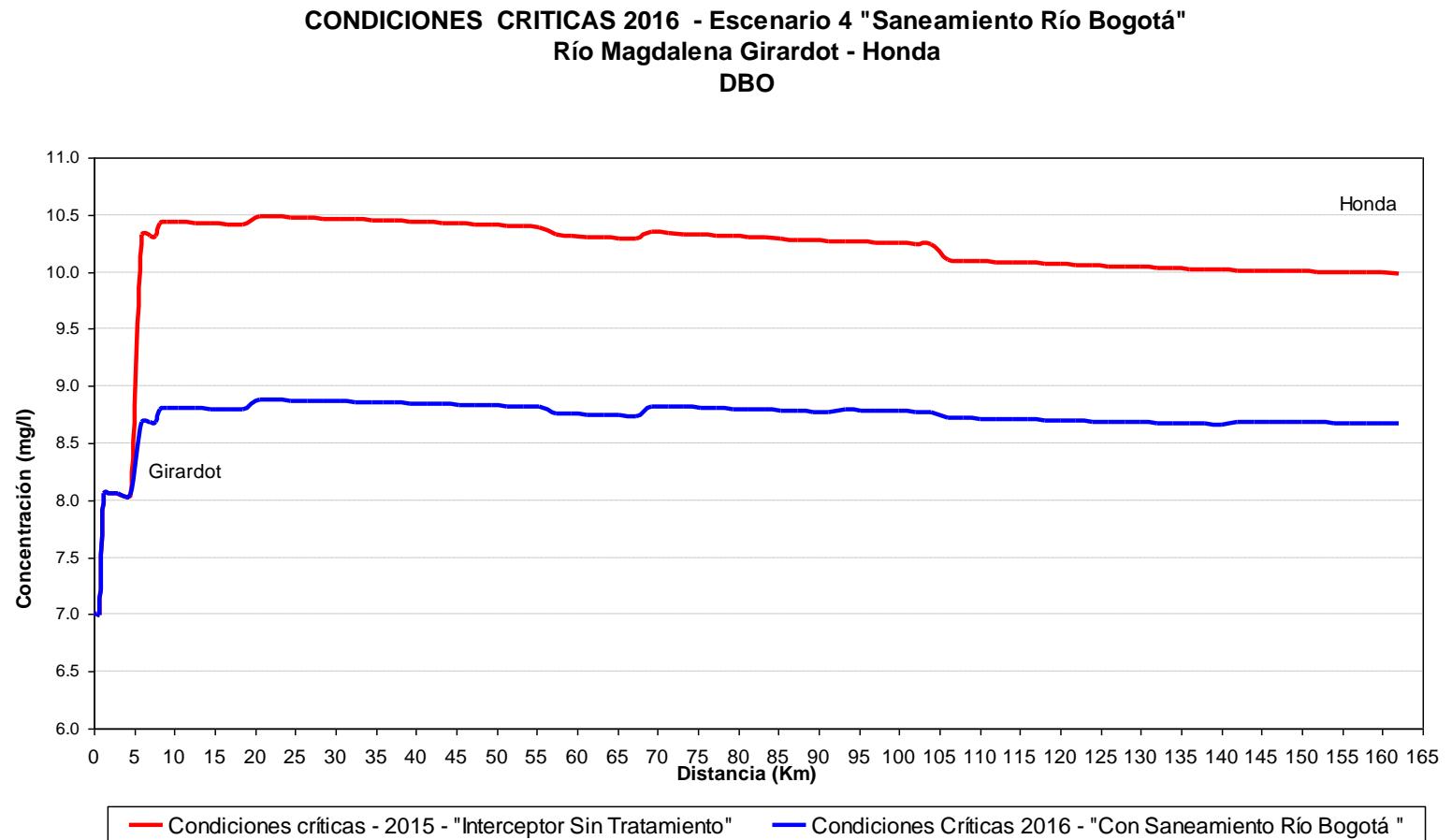


# Río Magdalena Girardot – Honda condiciones actuales



# Conclusiones Río Magdalena

Los resultados de modelación muestran que la mejora de la calidad del agua del Río Bogotá resulta en una mejora apreciable de la calidad del agua del Río Magdalena.



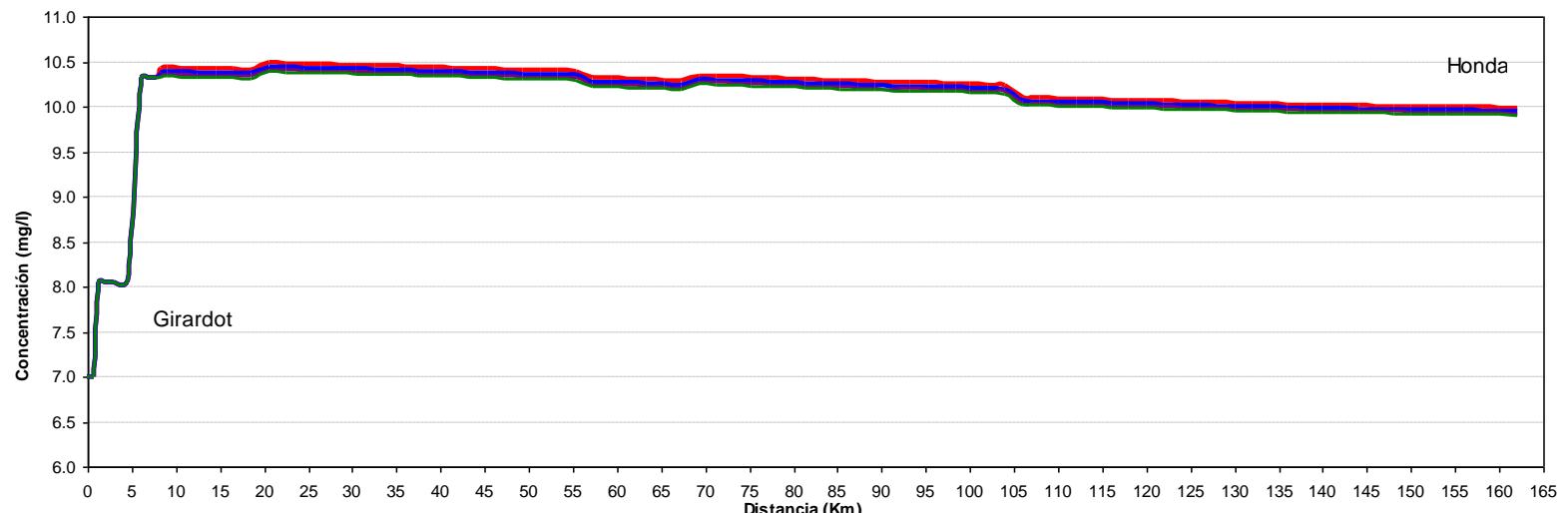
# Conclusiones Río Magdalena

La calidad del agua resultante en el Río Magdalena es literalmente idéntica para niveles de tratamiento primario, secundario o terciario, del efluente de la ciudad de Girardot.

## CONDICIONES CRITICAS 2015 "Alternativas de Tratamiento en Girardot"

Río Magdalena Girardot - Honda

DBO



- Condiciones críticas - 2015 - "Con Interceptor Sin Tratamiento"
- Condiciones Críticas 2015 - "Tanque de sedimentación primaria"
- Condiciones Críticas 2015 - "Laguna Facultativa"
- Condiciones Críticas 2015 - "Lodos Activados aerobios"

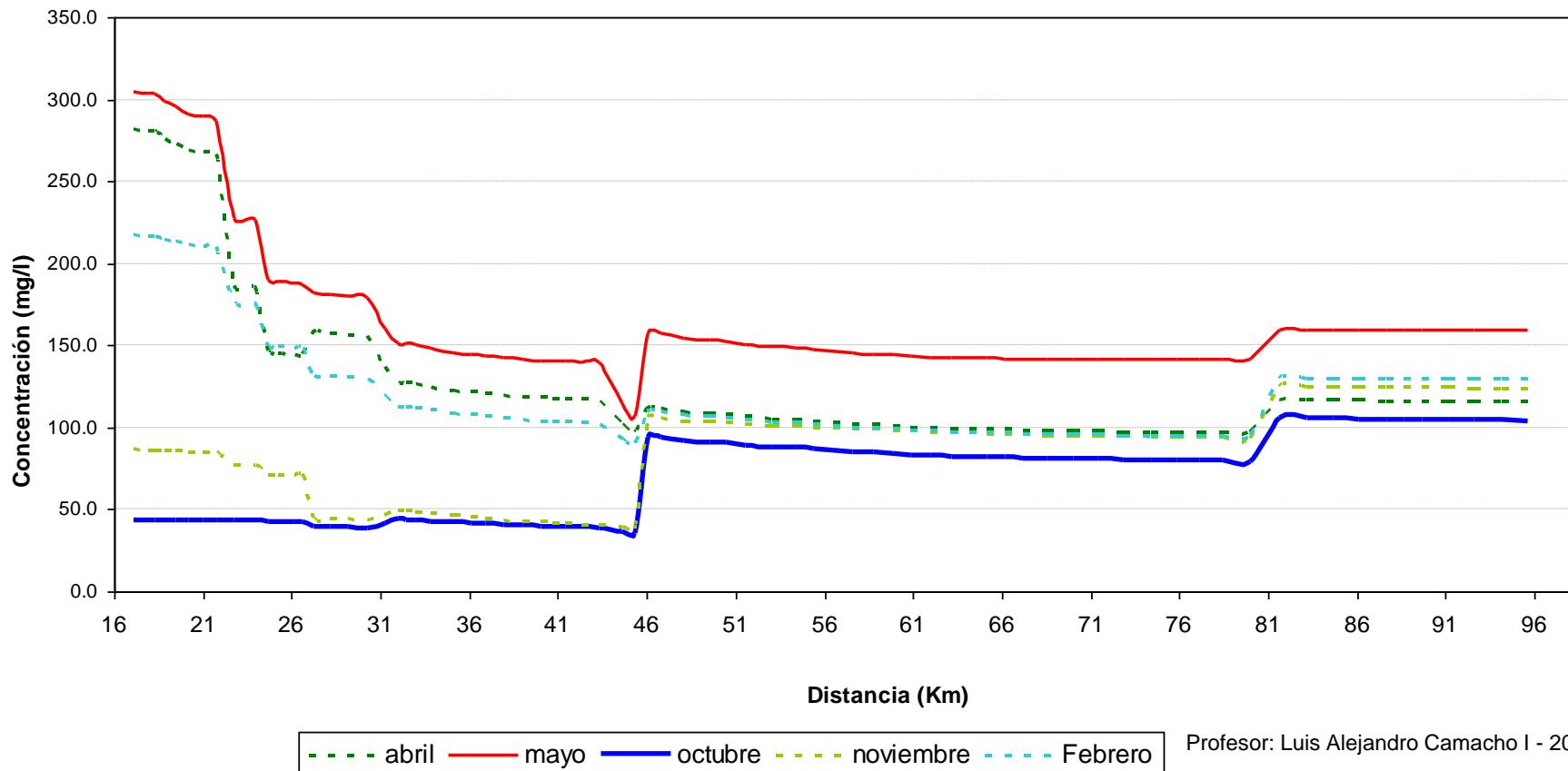
# RIO VIRILLA GRANDE DE TARCOLES

## 2005 "SIN PROYECTO" - SST

CONDICIONES ACTUALES - AÑO TIPICO-2005  
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya  
SST

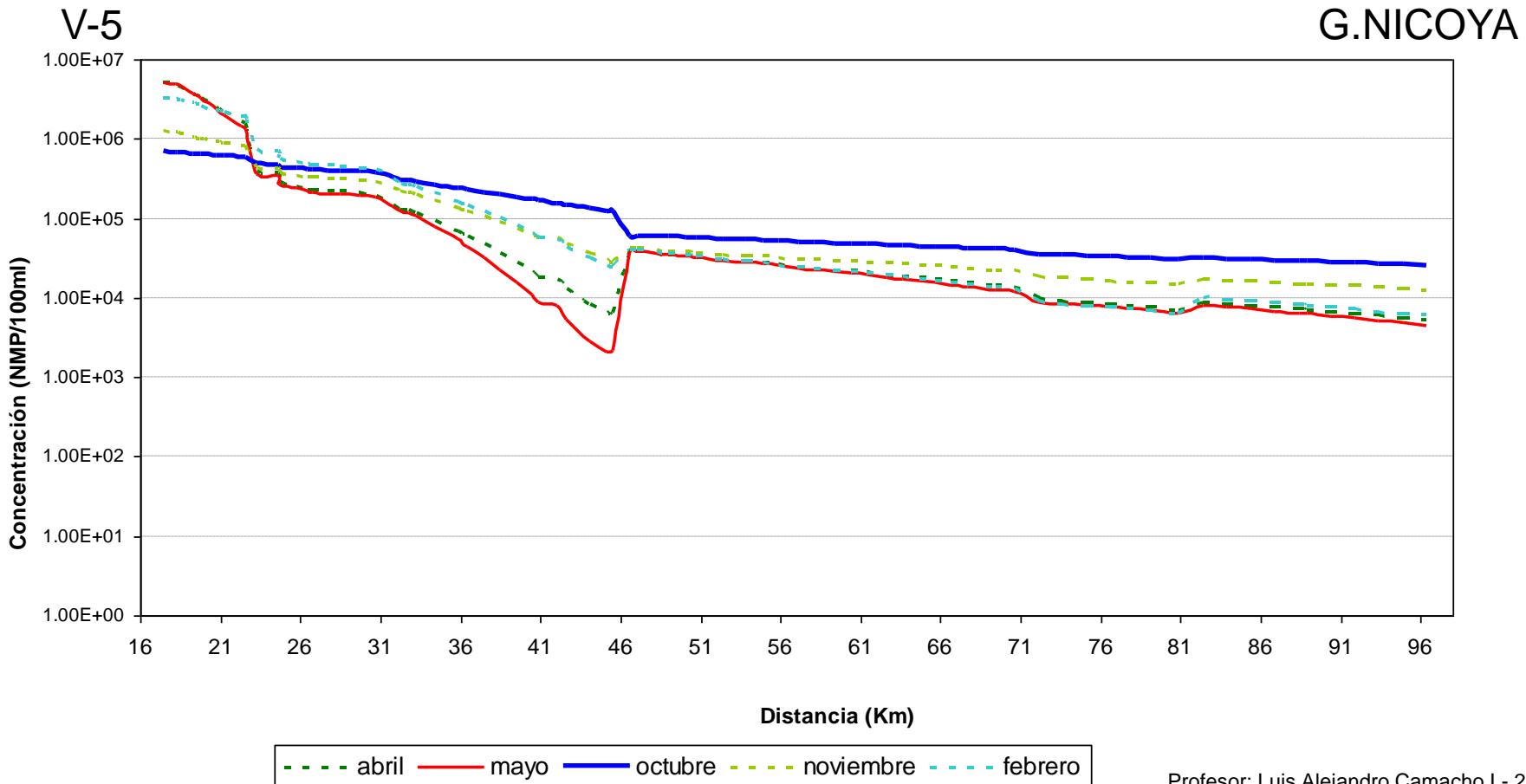
V-5

G.NICOYA



# 2005 “SIN PROYECTO” – Coliformes Fecales

CONDICIONES ACTUALES - AÑO TIPICO-2005  
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya  
Coliformes Fecales



# SIMULACIONES DE ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO – SAN JOSÉ CR

- **MICROTAMICES 075 mm, 02 mm, 02 mm  
Polyelectrolito**
- **TANQUE SEDIMENTACIÓN PRIMARIA (TSP)**
- **UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET (UASB)**
- **LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS  
ANAERÓBICA (LERan)**
- **LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS  
FACULTATIVA (LERfac)**
- **FILTRO DE GOTEO (FG, TRICKLING FILTER)**
- **LODOS ACTIVADOS AERÓBICOS (LAA)**

# TRATAMIENTO PRELIMINAR

Esquema	MT075	MT02	MTP02
Eficiencia Remoción de DBO	10%	20%	50%
Eficiencia Remoción de nutrientes (N, P)	-	-	-
Remoción de coliformes	25-75%	25-75%	25-75%
Remoción de SST	20%	30%	50%
Tiempo de retención hidráulico típico	1-2h	Ca. 6h	>1D
Molestia de olores	+	+	+
Requerimiento de tierra	++	++	++
Requerimiento de operadores expertos	++	++	++
Costo de inversión	++	++	++

(Evaluación de acuerdo a ++...excelente, +...positivo, - ... negativo)

1. Militamices de apertura 0.75 mm
2. Militamices de apertura 0.2 mm
3. Militamices de apertura 0.2 mm, con polyelectrolitos

# TRATAMIENTO 1ario Y 2ario

Condiciones ambientales	TSP	UASB	LER		FG	LAA
Condiciones ambientales	Anaerobias	Anaerobias	Anaerobias	Facultativa	Aerobias	Aerobias
Eficiencia Remoción de DBO	30-40%	>70%	>50%	>70%	80-90%	>90%
Eficiencia Remoción de nutrientes (N, P)	-	-	-	-	+(++)	+(++)
Remoción de coliformes	25-75%	90%	90%	90-99%	90-95%	90-98%
Tiempo de retención hidráulico típico	1-2h	Ca. 6h	>1D	>4D	Ca. 6h	Ca. 15h
Molestia de olores	+	++	+	+	++	++
Requerimiento de tierra	++	++	+	-	+	+
Requerimiento de operadores expertos	++	+/-	++	++	+	-
Costo de inversión	++	++	++	+	+	-

1. TSP: Tanque de sedimentación primario 2. UASB: upflow anaerobic sludge blanket 3. LER: Laguna de estabilización de residuos, 4. FG: filtro de goteo (Trickling filter) 5. LAA: Lodos activados aeróbicos

# TRATAMIENTOS PRELIMINARES Y 1ario

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO PRELIMINAR TAMICES  
CONDICION CRITICA - MAYO 2025

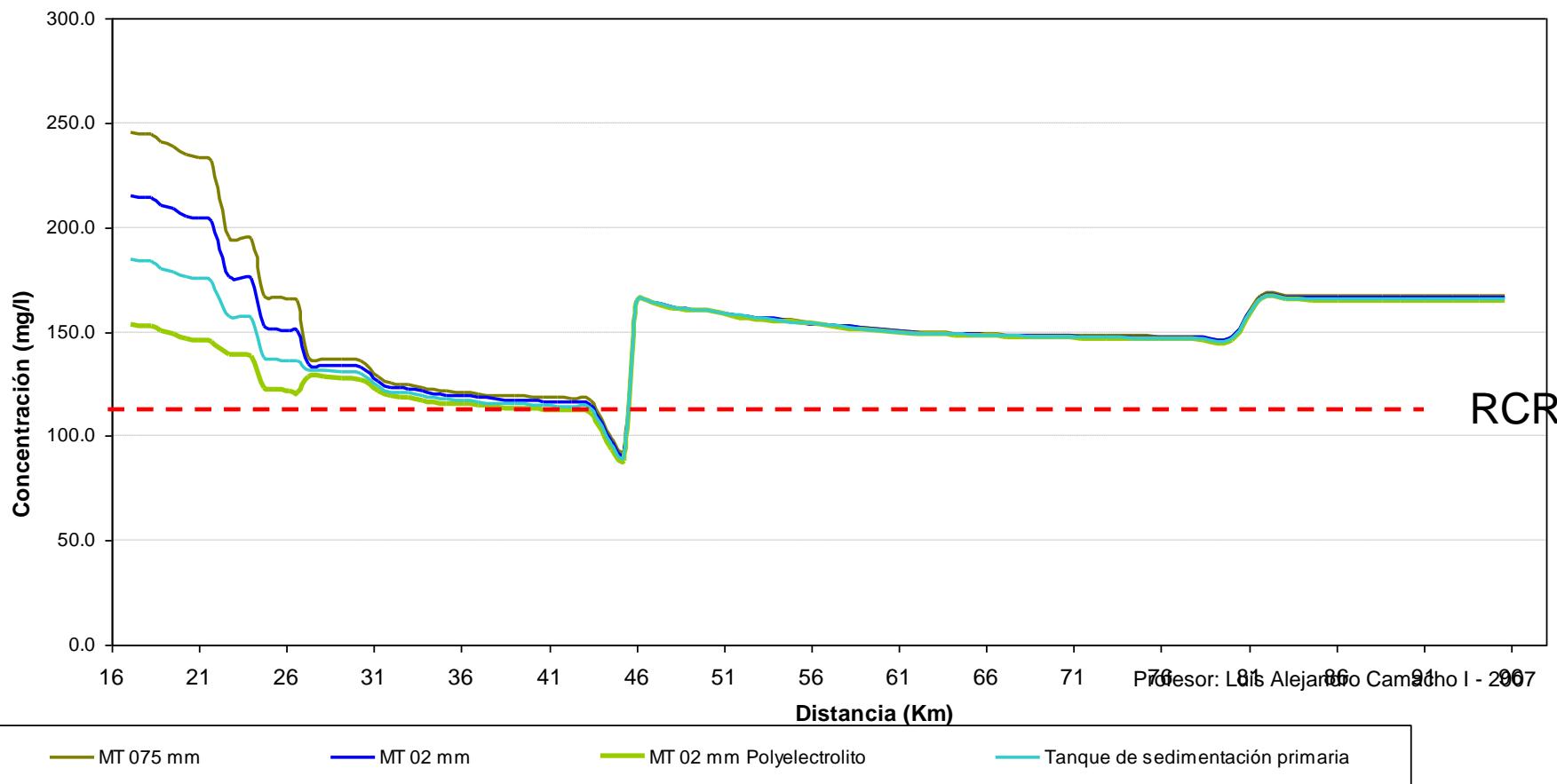
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya

SST

**SST**

G.NICOYA

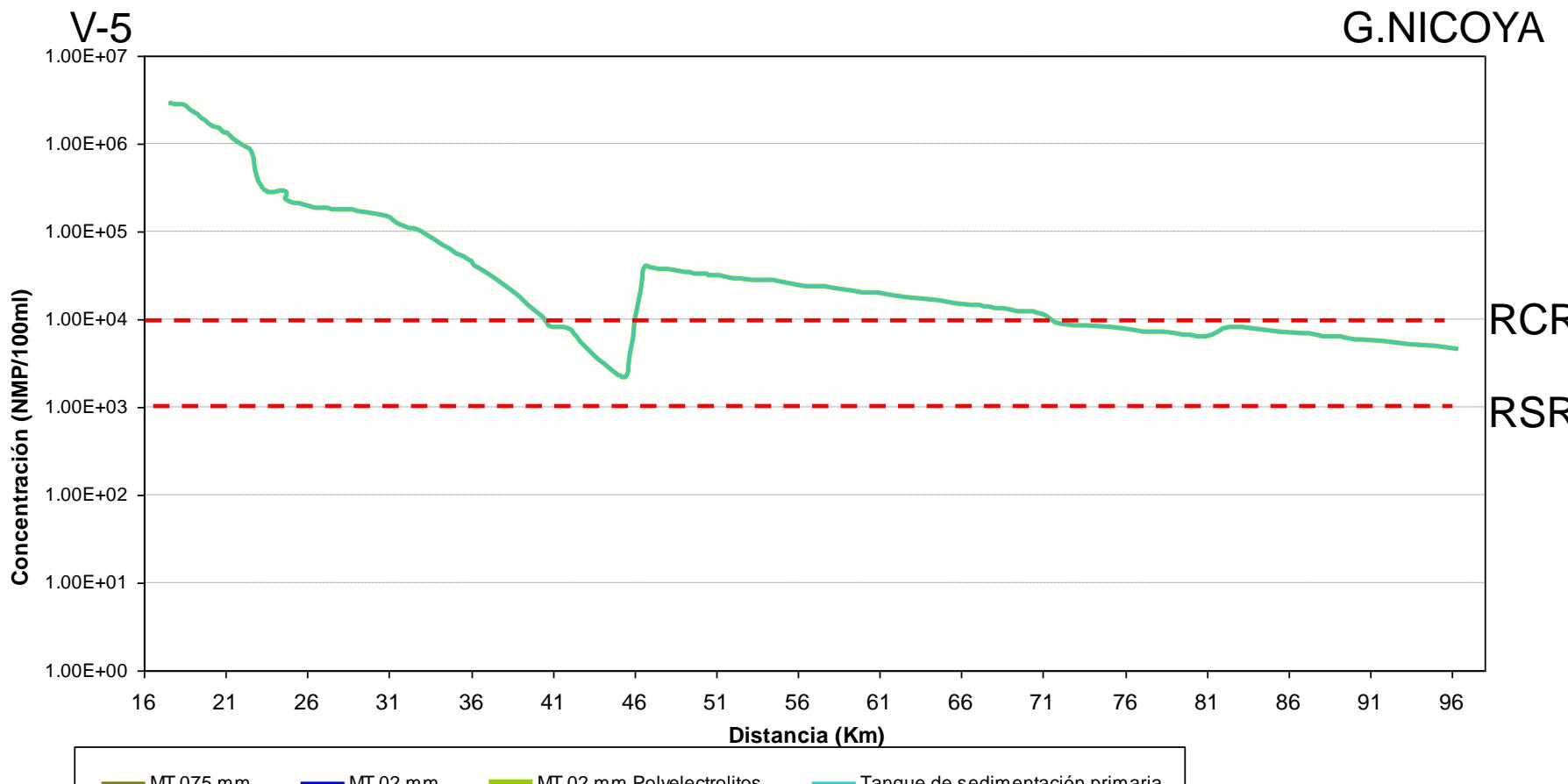
V-5



# TRATAMIENTOS PRELIMINARES Y 1ario

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO PRELIMINAR TAMICES  
CONDICION CRITICA - MAYO 2025  
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya  
Coliformes Fecales

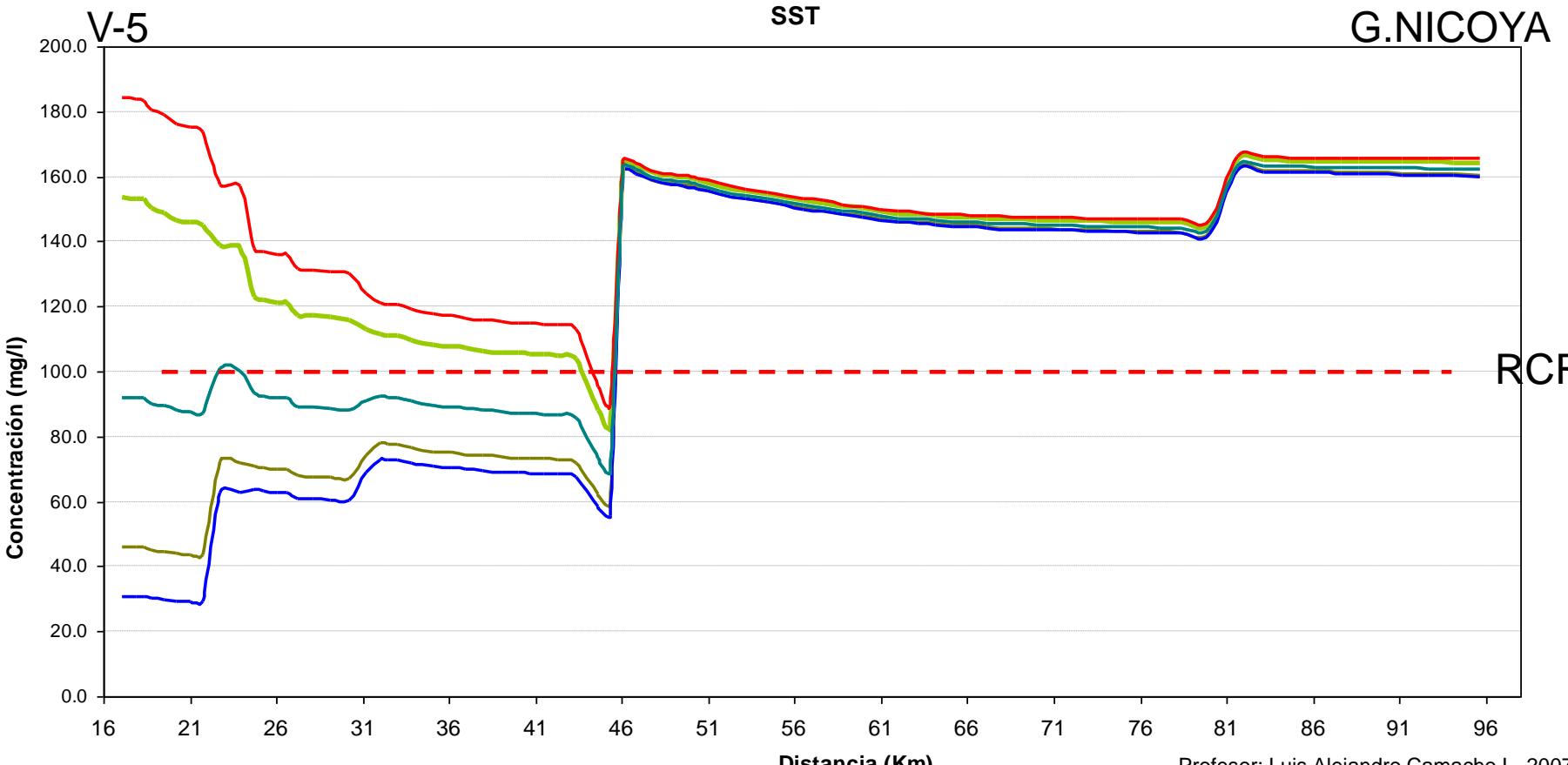
CF



# TRATAMIENTOS 1arios Y 2arios

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO  
CONDICION CRITICA - MAYO 2025  
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya

**SST**

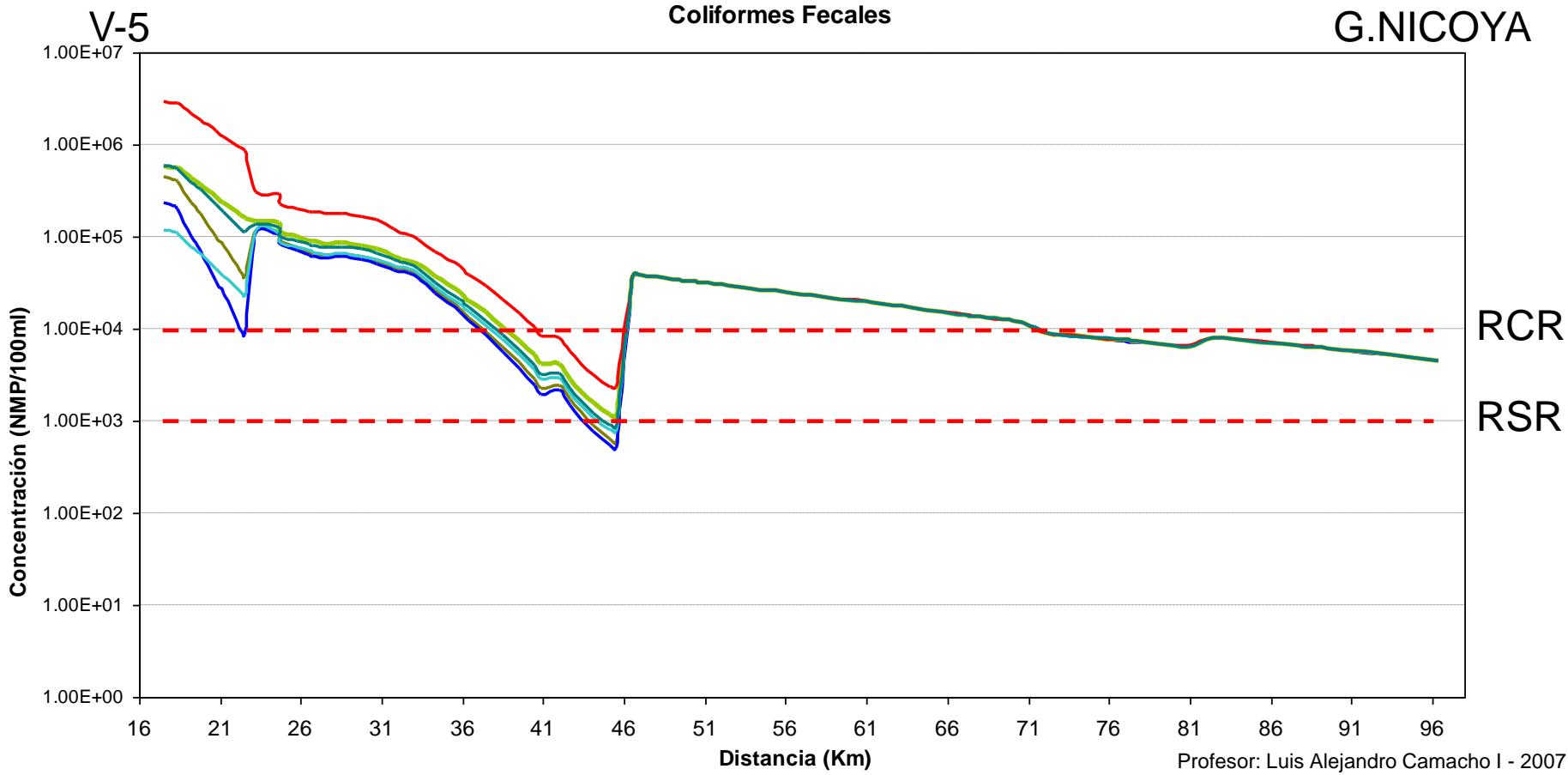


# TRATAMIENTOS 1arios Y 2arios

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO  
CONDICION CRITICA - MAYO 2025  
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya  
Coliformes Fecales

CF

G.NICOYA



Filtro Goteo	Lodos activados aerobicos	Lag Estabilización Anaeróbica
Lag Estabilización Facultativa	Tanque de sedimentación primaria	UASB

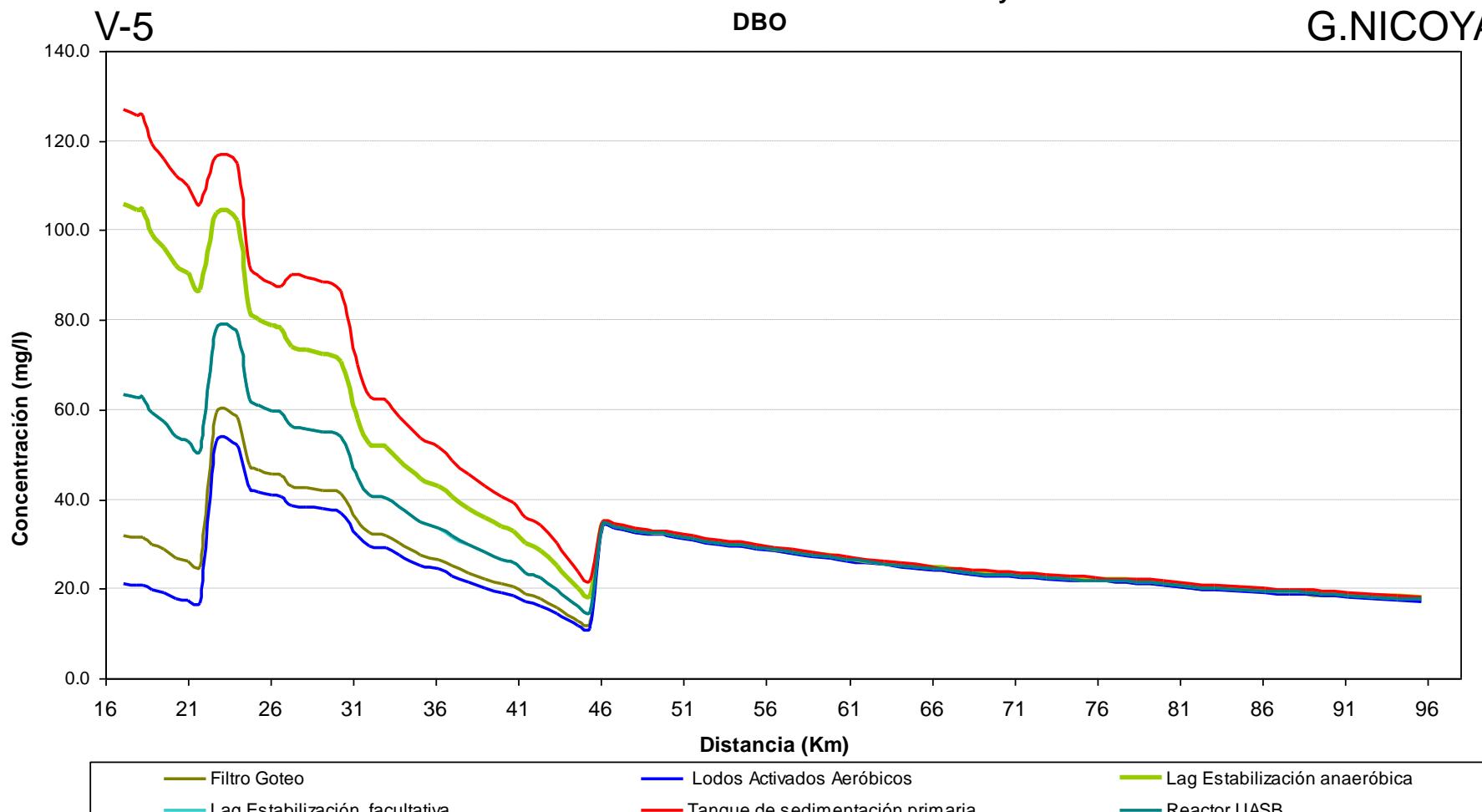
# TRATAMIENTOS 1arios Y 2arios

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO  
CONDICION CRITICA - MAYO 2025  
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya

DBO

DBO

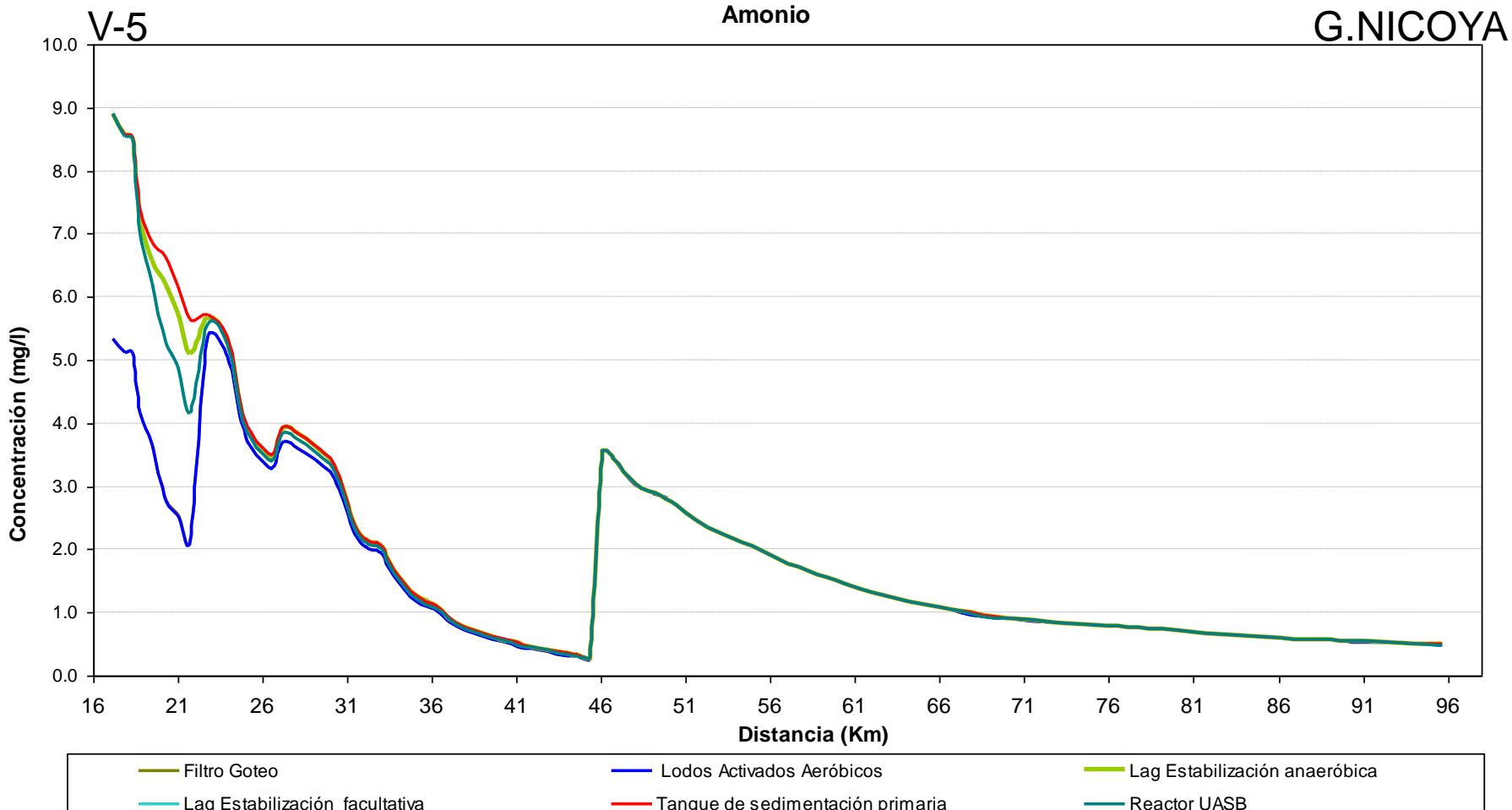
G.NICOYA



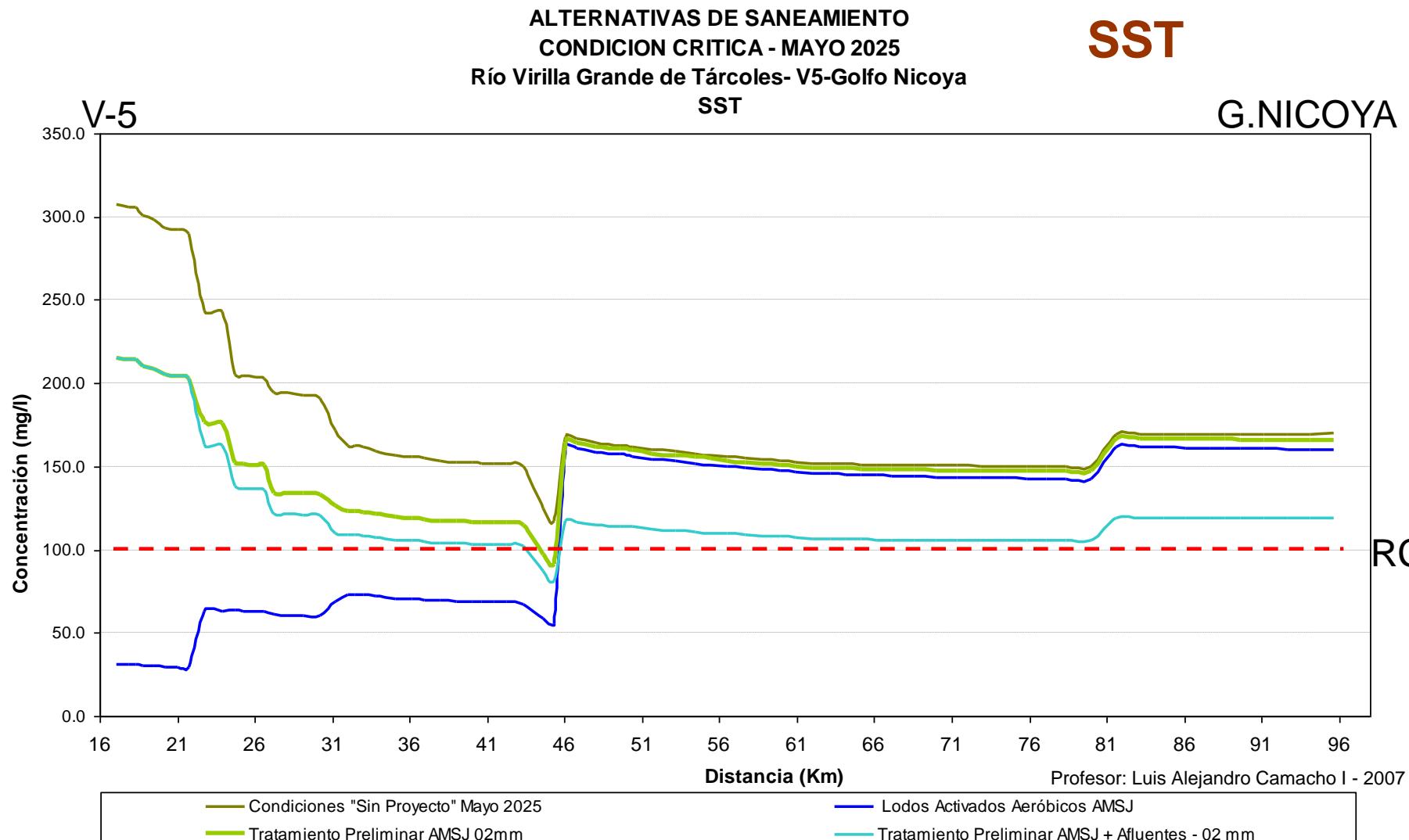
# TRATAMIENTOS 1arios Y 2arios

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO  
CONDICION CRITICA - MAYO 2025  
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya  
Amonio

NH<sub>4</sub>



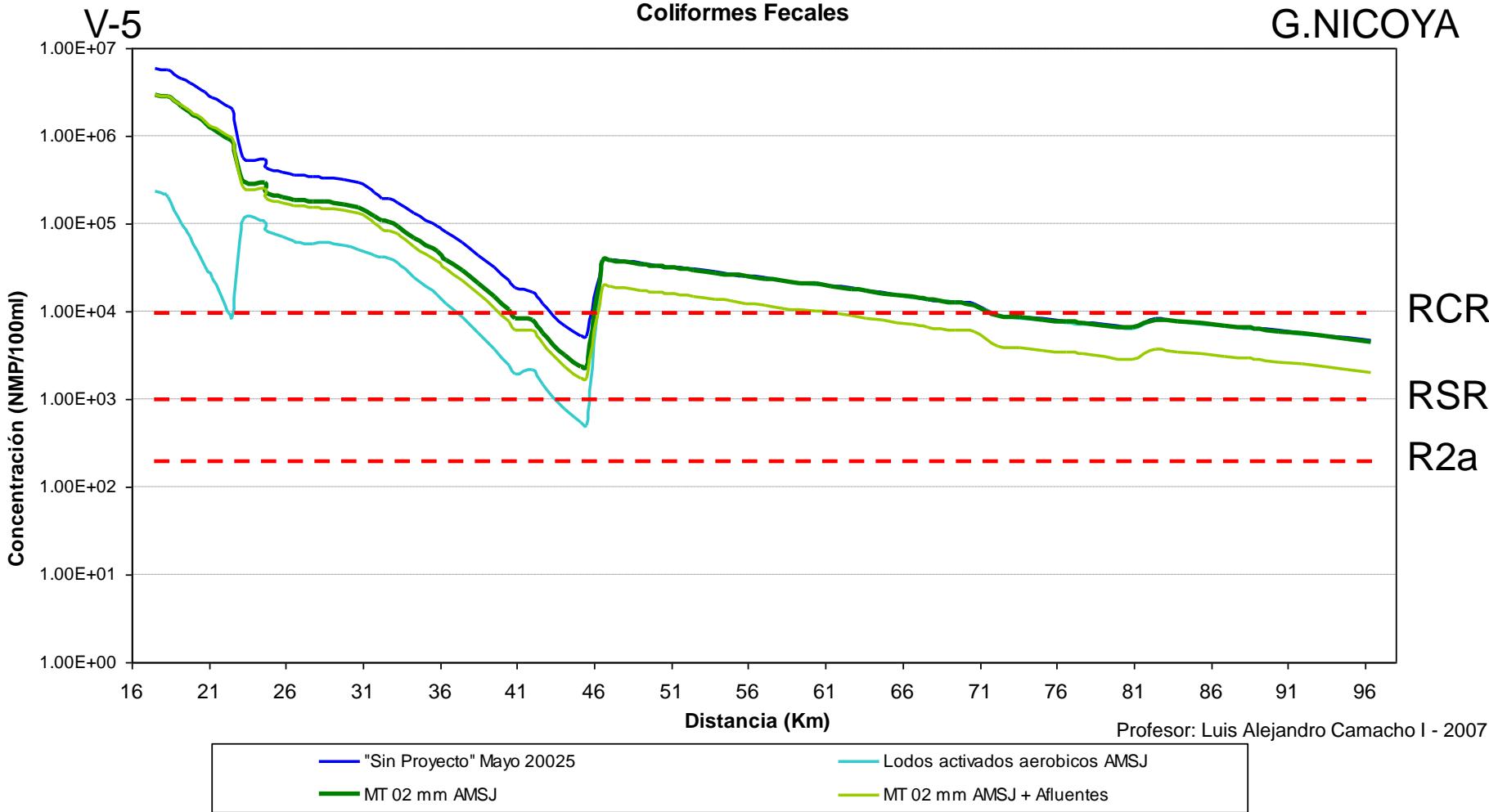
# TRATAMIENTO EN EL AMSJ Y AFLUENTES



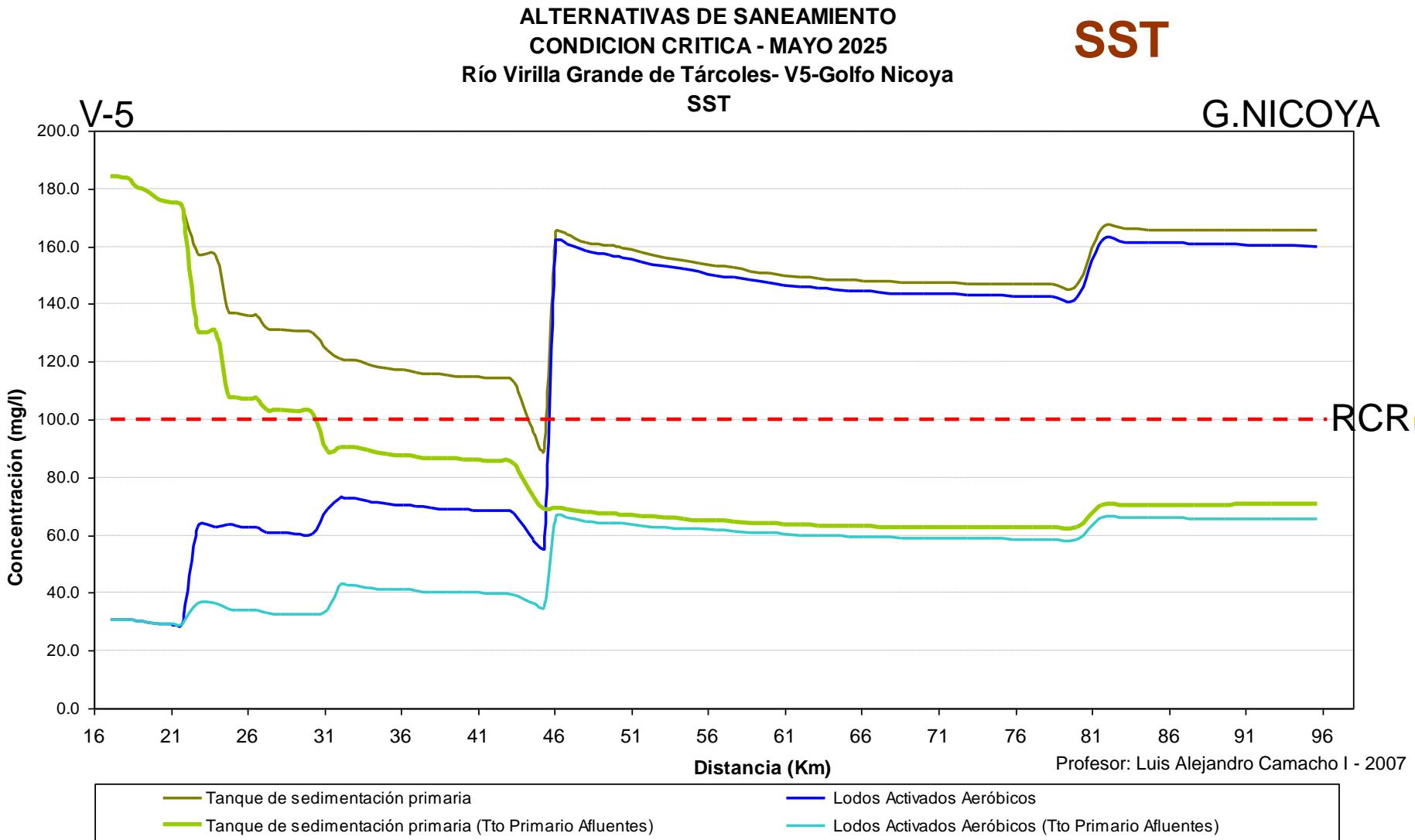
# TRATAMIENTO EN EL AMSJ Y AFLUENTES

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO  
CONDICION CRITICA - MAYO 2025  
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya  
Coliformes Fecales

CF



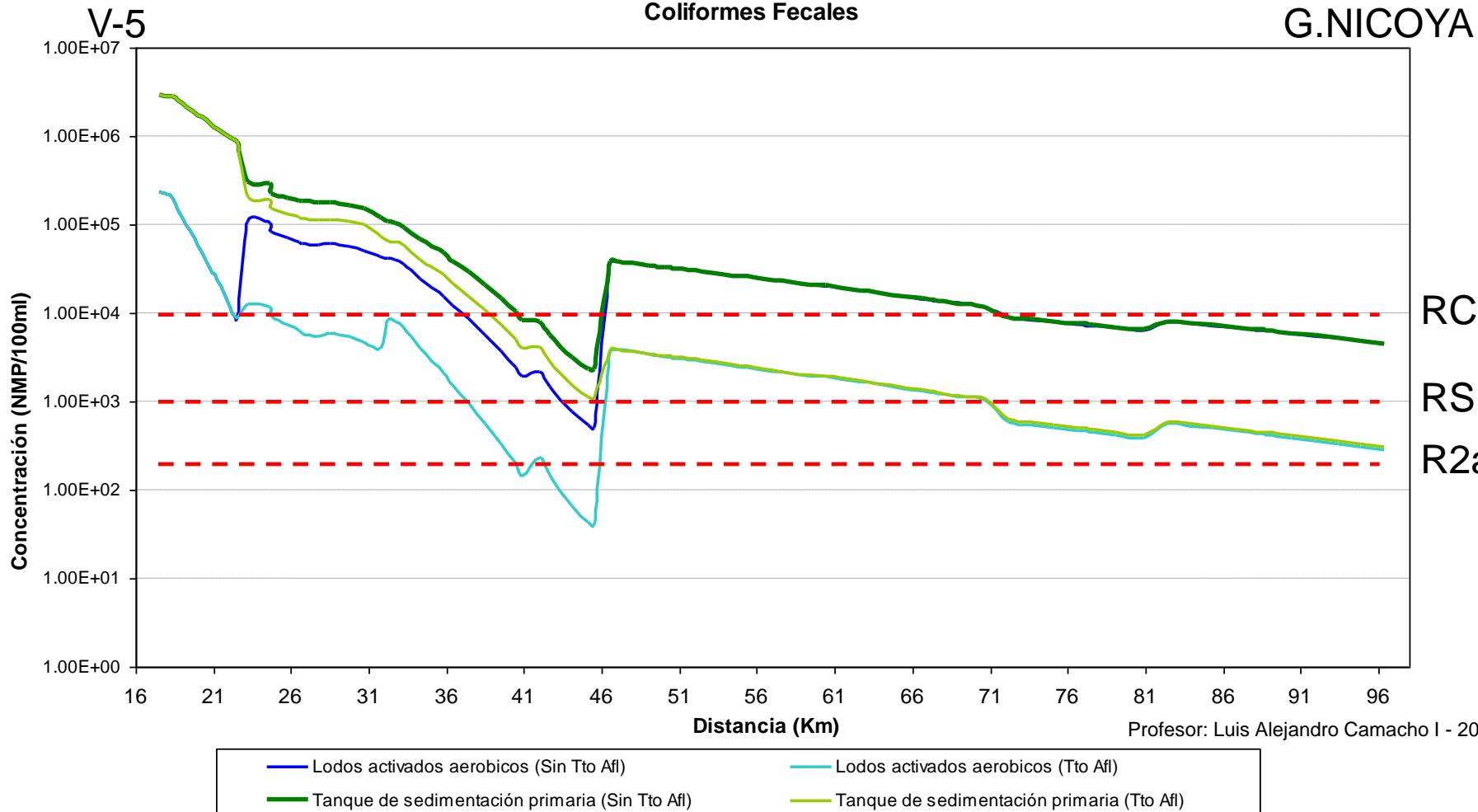
# TRATAMIENTO EN EL AMSJ Y AFLUENTES



# TRATAMIENTO EN EL AMSJ Y AFLUENTES

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO  
CONDICION CRITICA - MAYO 2025  
Río Virilla Grande de Tárcoles- V5-Golfo Nicoya  
Coliformes Fecales

CF



# Conclusión

Los modelos de **transporte** de contaminantes y de **calidad** del agua permiten **dimensionar y diseñar** soluciones estructurales (e.g. plantas de tratamiento) y no estructurales (e.g. tecnologías de producción más limpias) requeridas para alcanzar estándares de calidad de agua bajo diferentes niveles de contaminación y/o tratamiento.

Los modelos permiten determinar **la capacidad asimilativa** (i.e. dilución, dispersión, reacción) **de sustancias biodegradables o acumulativas**

Los modelos permiten **priorizar** la toma de decisiones



# Colorario

Sin embargo, se requiere una aplicación **cuidadosa, honesta y responsable** de estas herramientas.

¿Cuál debe ser la metodología para la obtención de un modelo **predictivo** de calidad del agua?



### 3. Pregunta de investigación

Cómo se implementa un modelo ***predictivo*** hidráulico de calidad del agua en ríos?



Metodología propuesta como resultado  
de estudios integrales de saneamiento:

Casos Río Bogotá, Río Magdalena, Río  
Virilla-Grande de Tárcoles  
(Uniandes)

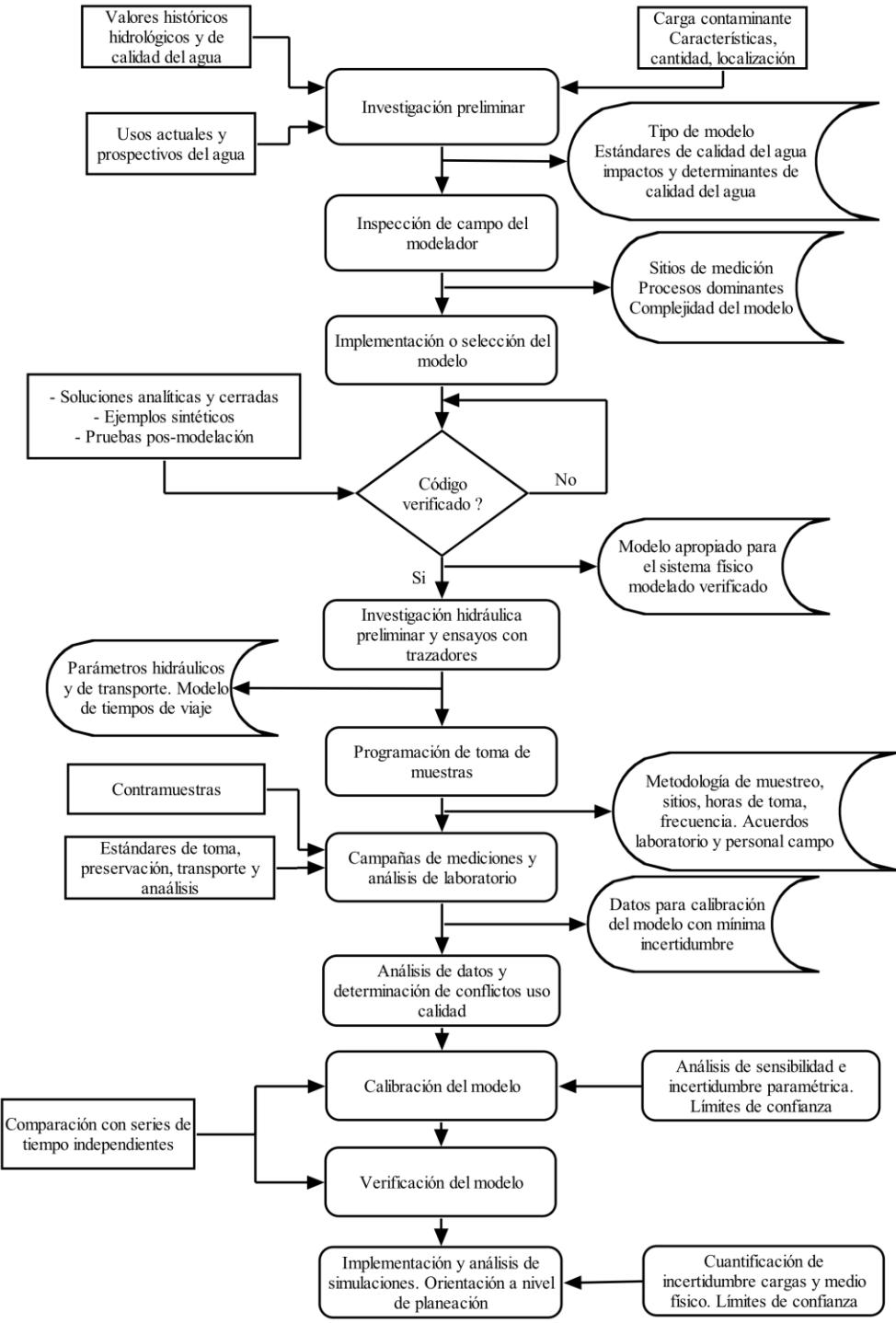
Río Teusacá, Canal del Dique, Mojana  
(Unal)



# Metodología

# Aplicación rigurosa de un Marco o Protocolo de Modelación de calidad del agua en ríos

Camacho y Díaz-Granados (2003)



# METODOLOGIA PROPUESTA

## 1. INVESTIGACION PRELIMINAR



```
graph TD; A[1. INVESTIGACION PRELIMINAR] --> B[ESTANDARES  
DETERMINANTES  
IMPACTOS]
```

**ESTANDARES  
DETERMINANTES  
IMPACTOS**



# INVESTIGACION PRELIMINAR

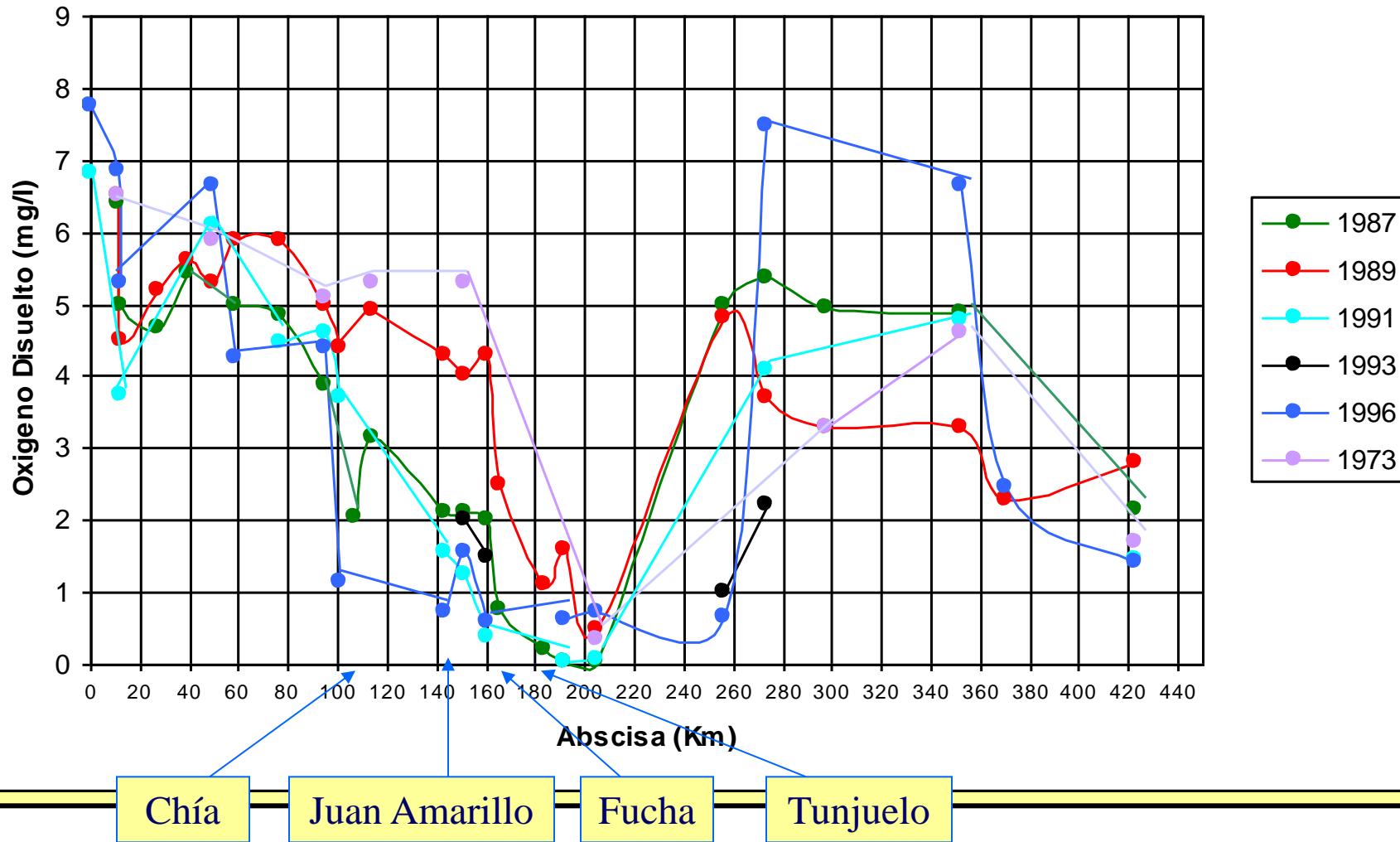
## USOS ACTUALES Y PROSPECTIVOS DEL AGUA

### Escenario Prospectivo Actividad Socioeconómica

Cuenca Alta		Cuenca Media		Cuenca Baja	
Hoy	Escenario más probable	Hoy	Escenario más probable	Hoy	Escenario más probable
Agroindustria	Urbanización	Urbanización	Urbanización	Agricultura Tradicional	Urbanización
Industria	Industria	Agroindustria (flores)	Industria	Urbanización	Turismo y recreación
Urbanización	Agroindustria	Industria	Agroindustria	Energía	Transporte
Agricultura Comercial	Agricultura Comercial	Transporte	Agricultura Comercial	Turismo y recreación	Energía
Explotación Forestal	Comercio	Agricultura Comercial	Ganadería esp. mayores	Ganadería esp. menores	Agricultura tradicional
Explotación Minera	Transporte	Explotación Minera	Ganadería esp. menores	Ganadería esp. mayores	Ganadería esp. mayores
		Energía (Muña)	Transporte	Transporte	Ganadería esp. menores

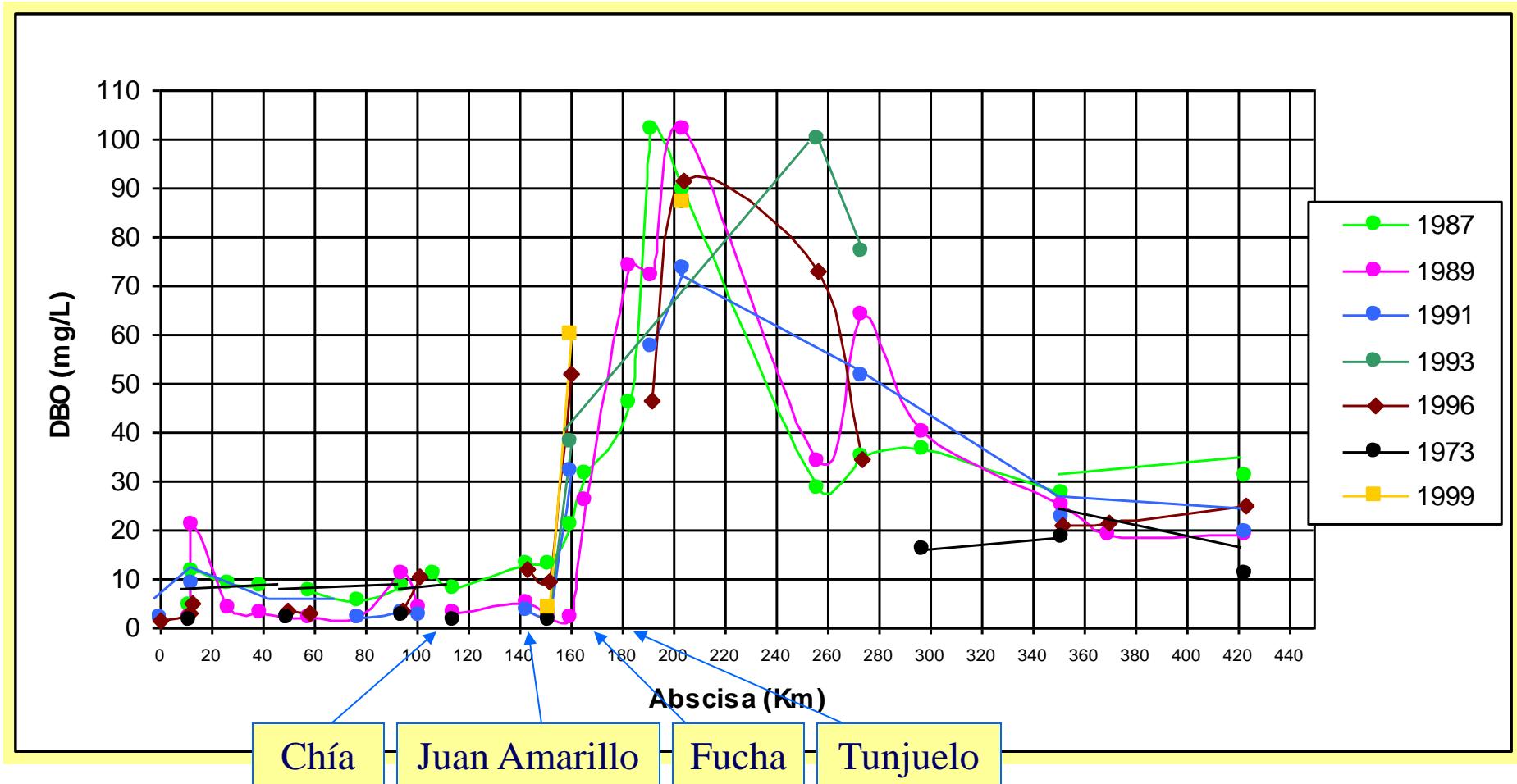
# DATOS HISTÓRICOS

## Variación Histórica del Oxígeno Disuelto en el río Bogotá



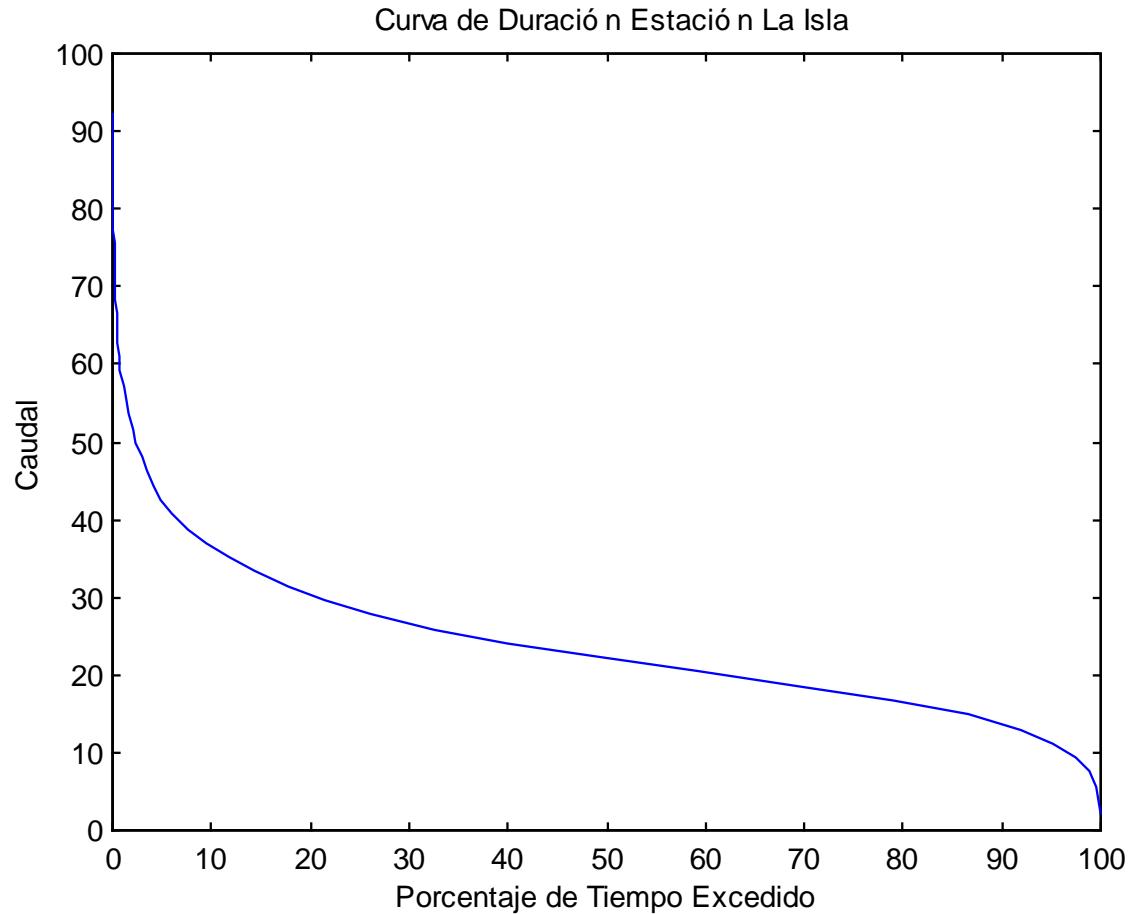
# DATOS HISTÓRICOS

## Variación Histórica de DBO en el río Bogotá

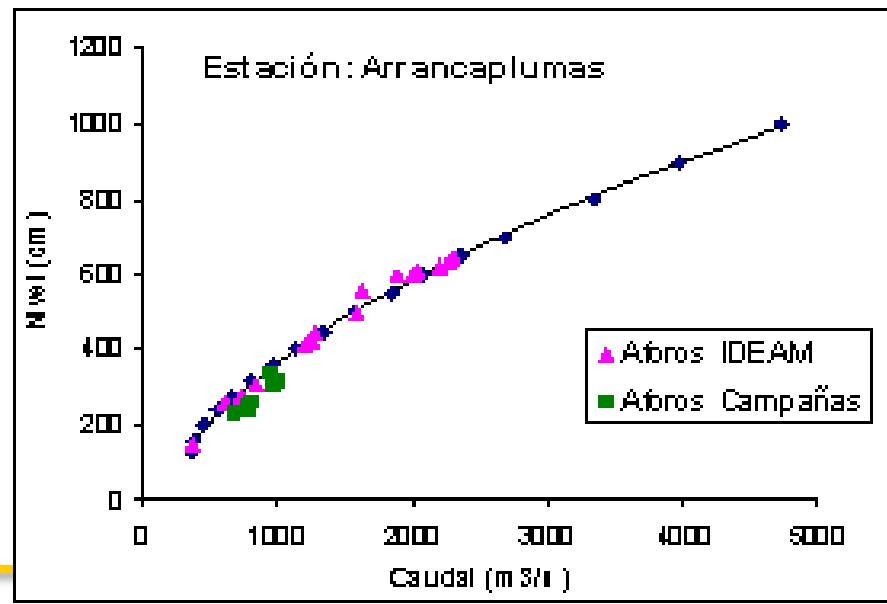
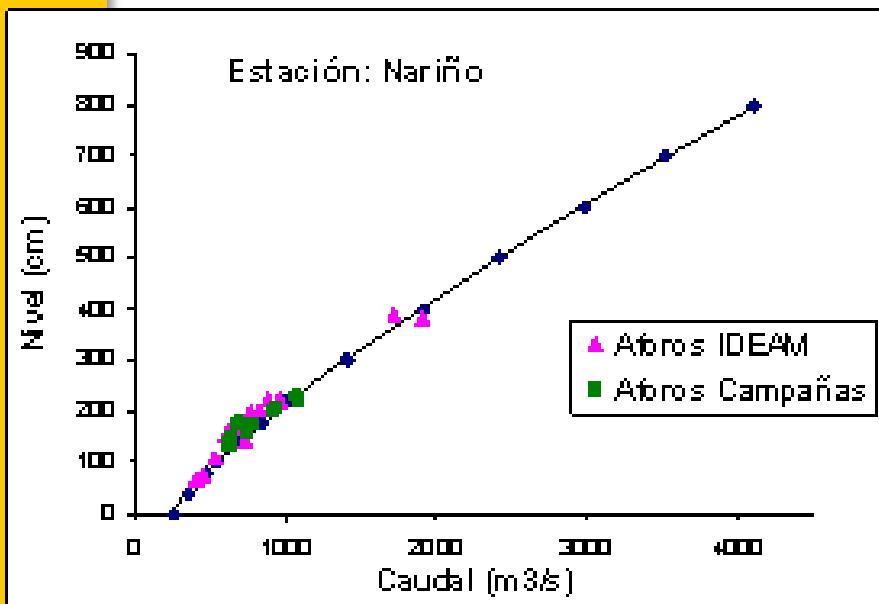


# INVESTIGACION PRELIMINAR INFORMACIÓN SECUNDARIA

## CURVA DE DURACION CAUDALES



# Estudios hidrológicos



## Curvas de calibración nivel caudal

Nariño:

$$Q = 237.4778 + 1.0075449N^{1.2350386}$$

$$R^2 = 0.99986$$

Arrancaplumas:

$$Q = (10.112315 + 0.058945959N)^2$$

$$R^2 = 0.99938$$

# Estudios hidrológicos

Tabla 11 - Resultados de análisis de frecuencia estación Nariño  
a. Caudales mínimos semanales

Periodo de retorno	Probabilidad de no excedencia	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Desviación estándar	Intervalo de confianza (95%)	
50	0,98	432	69,4	678	950
25	0,96	479	55,6	659	877
10	0,9	531	40,6	621	780
5	0,8	553	32,8	575	704
3	0,6667	585	29,3	528	643
2,33	0,5708	640	28,3	498	609
2,00	0,5	700	27,7	477	586
1,50	0,3333	768	27,1	426	532
1,25	0,2	814	27,6	378	486

Análisis de frecuencias series anuales, caudales mínimos diarios, mínimos semanales, máximos diarios

# Estudios hidrológicos

b. Caudales mínimos diarios

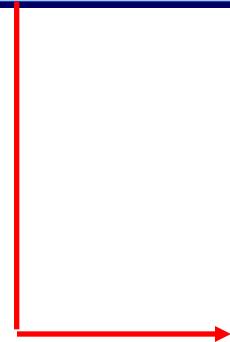
Periodo de retorno	Probabilidad de no excedencia	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Desviación estándar	Intervalo de confianza (95%)	
50	0,02	263	40,2	184	342
25	0,04	290	33,7	224	356
10	0,1	333	26,9	280	386
5	0,2	376	24,1	328	423
3	0,3333	417	23,7	371	464
2,33	0,4292	443	23,9	397	490
2	0,5	462	24,3	415	510
1,50	0,6667	510	25,7	460	560
1,25	0,8	557	28,7	501	614

c. Caudales máximos diarios

Periodo de retorno	Probabilidad de No excedencia	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Desviación estándar	Intervalo de confianza (95%)	
100	0,99	5670	708	4280	7060
50	0,98	5350	554	4260	6430
25	0,96	5010	419	4190	5830
10	0,90	4530	281	3980	5080
5	0,80	4130	216	3700	4550
3	0,66670	3780	190	3410	4150
2,33	0,57080	3580	180	3230	3930
2	0,50	3450	173	3110	3790
1,5	0,333	3150	158	2840	3460

# METODOLOGIA PROPUESTA

## 2. INSPECCIÓN DE CAMPO



**SITIOS DE MEDICIÓN  
PROCESOS  
DOMINANTES**



# COMPLEJIDADES

## *Cuenca media*

Entender apropiadamente  
condiciones anaerobias e  
interacciones columna agua  
– sedimento

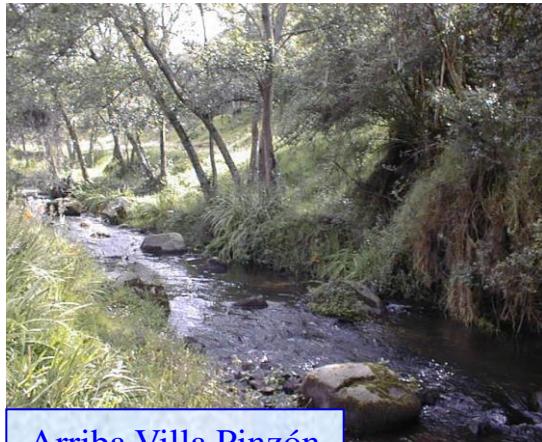


## *Cuenca alta y la cuenca baja*

Representar adecuadamente  
fenómenos de transporte  
propios de ríos de montaña



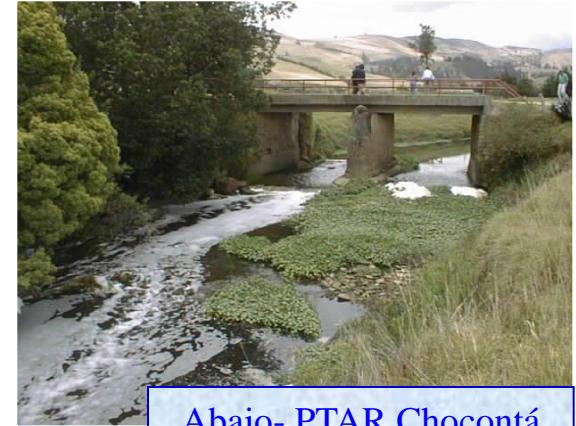
# SITIOS DE MEDICION CUENCA ALTA



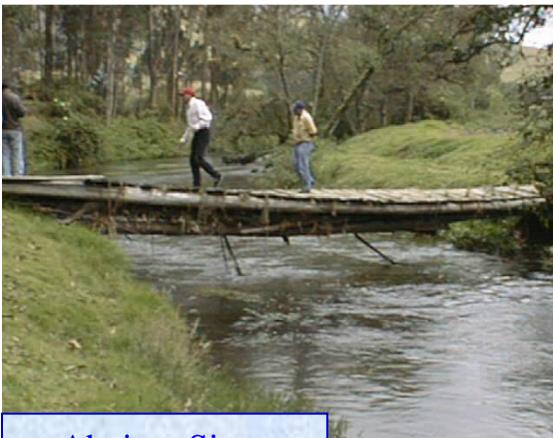
Arriba Villa Pinzón



Abajo Villa Pinzón – Q.San Pedro



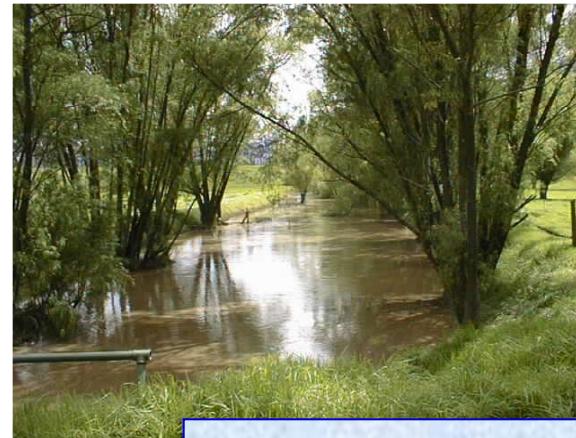
Abajo- PTAR Chocontá



Abajo – Sisga



PTAR Gachancipá



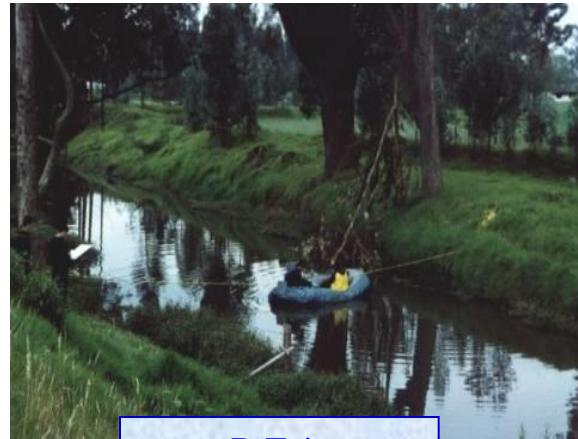
RB Abajo - Tocancipá



# SITIOS DE MEDICION CUENCA MEDIA



La Balsa



R.Frío



La Virgen



Colector Patio Bonito



RB La Isla



RB Mondoñedo



# SITIOS DE MEDICION CUENCA BAJA



D. Cadena Nueva - La Guaca



Salto del Tequendama



R. Apulo



Descarga Tocaima



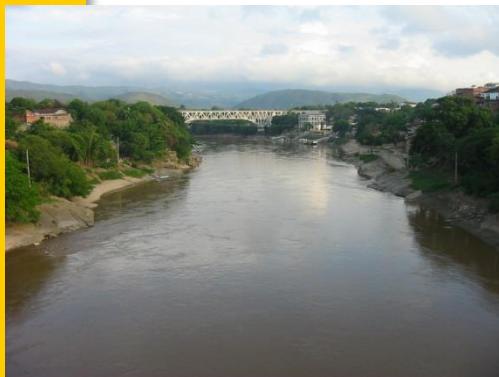
RB Desembocadura



R. Magdalena

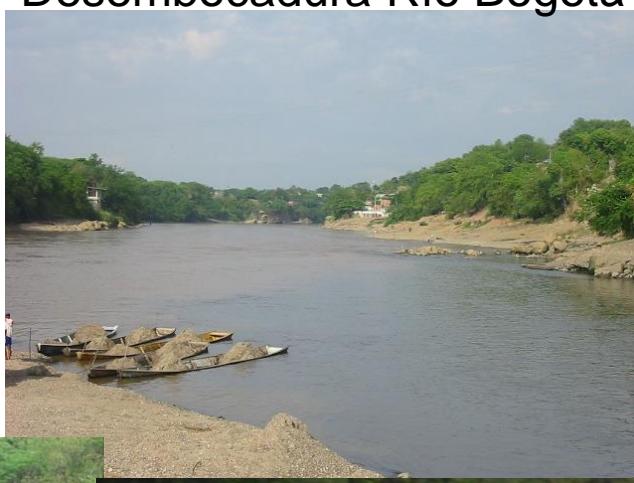


# Mediciones Río Magdalena



Pte. Ospina

Desembocadura Río Bogotá



Estación Nariño



Estación Arrancaplumas



Bocatoma Cambao



# METODOLOGIA PROPUESTA

## **3. IMPLEMENTACIÓN O SELECCIÓN DE UN MODELO MATEMATICO Y VERIFICACION DEL CÓDIGO**



**MODELO APROPIADO  
PARA EL SISTEMA  
FÍSICO MODELADO  
BIEN CODIFICADO**



# MODELOS ...

- Modelos de tránsito de crecientes
  - Alarma
  - Planeamiento y diseño
- Modelos de transporte de contaminantes
  - Alarma,
  - Diseño de planes de contingencia
- Modelos de calidad del agua
  - Alarma
  - Planeamiento de saneamiento
  - Diseño de saneamiento

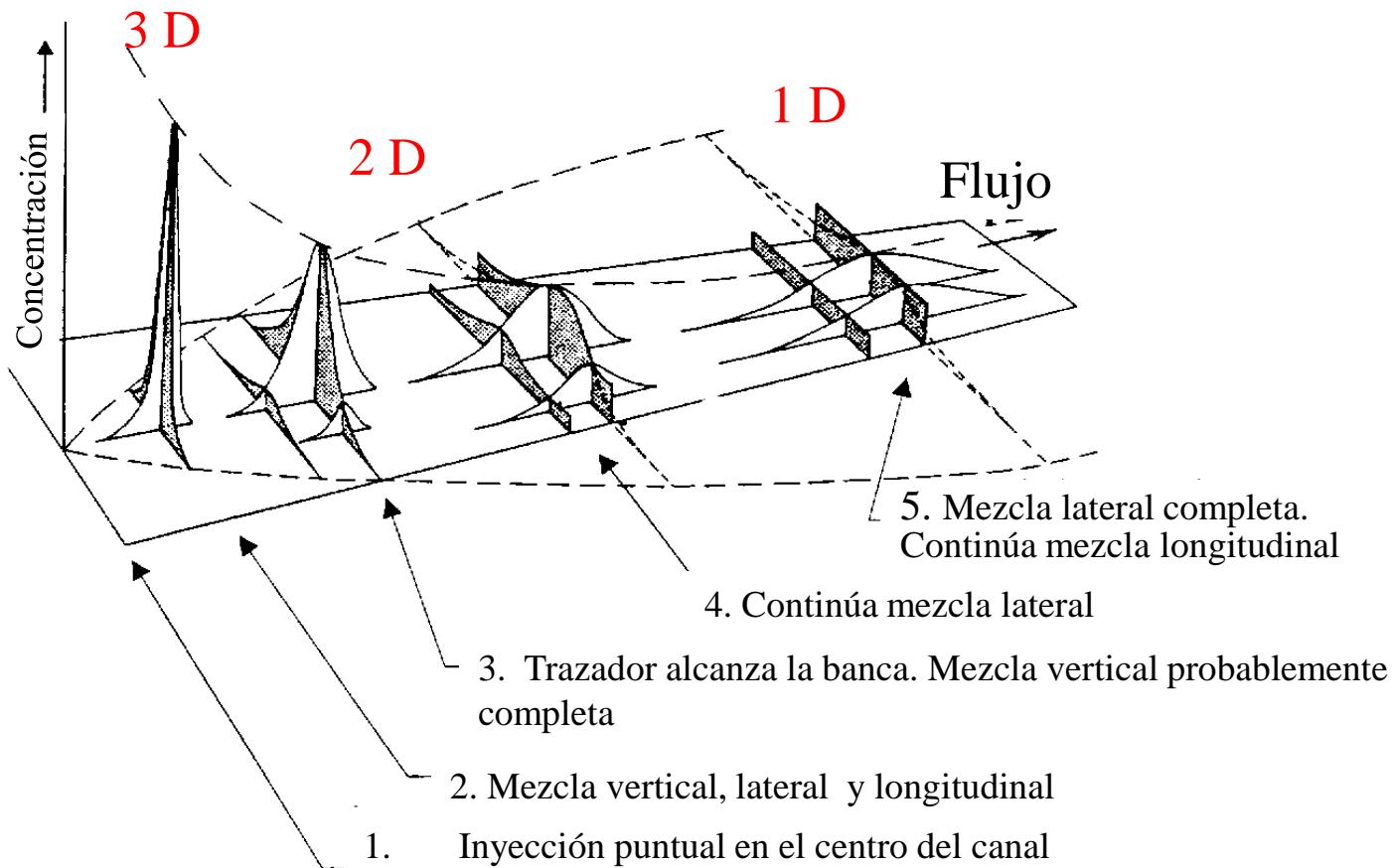


**Nivel de Complejidad – Integración flujo - calidad**

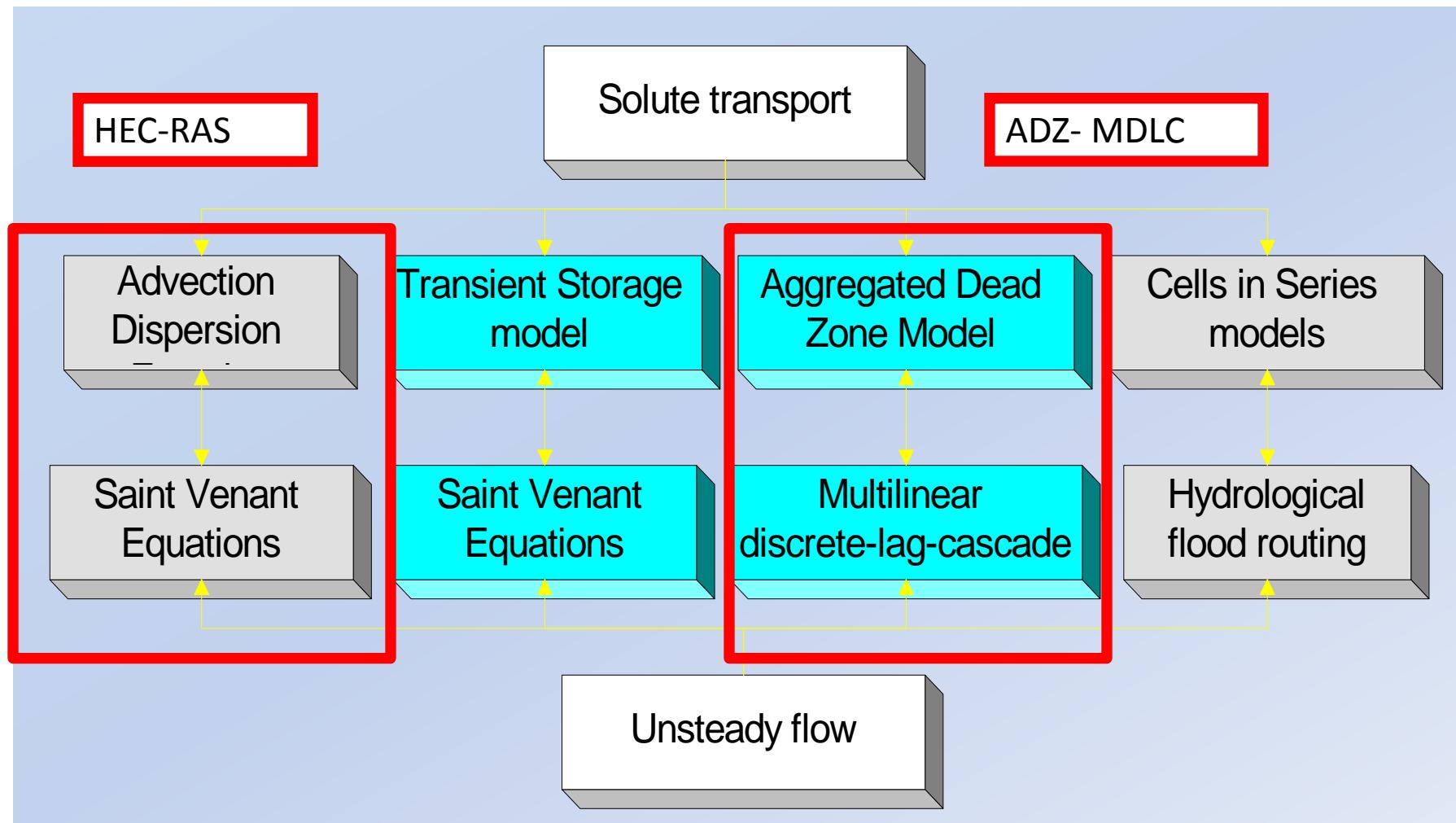


# Modelos de transporte de

Patrones de mezcla lateral y longitudinal y cambios en la distribución de la concentración de un trazador inyectado instantáneamente



# MODELOS DE TRANSPORTE



# Selección e implementación del modelo de calidad del agua

## Modelos de estado estable:

- QUAL2K – Nivel de planamiento (e.g. R. Bogotá, 2001)

## Modelos Dinámicos:

- WASP (WATER QUALITY ANALYSIS SIMULATION PROGRAM)
- HEC RAS Versión 4.0**
- MIKE 11
- SIMBA
- SMS (Modulo de calidad de agua RMA4)
- ADZ – MDLC - QUASAR extendido. – Nivel diseño (e.g. R. Bogotá, 2010)**

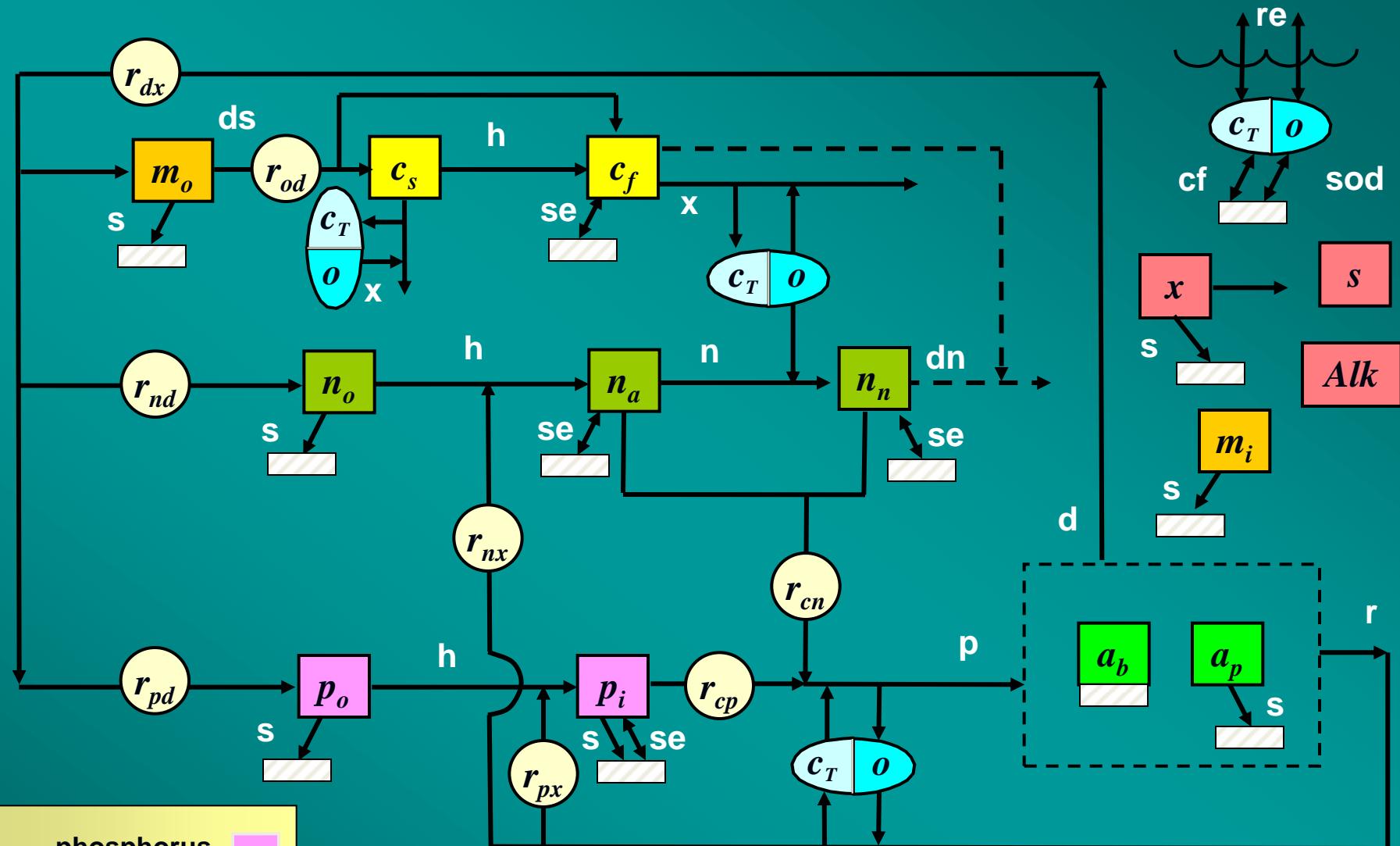


# Q2K

## DETERMINANTES CONVENCIONALES

Variable	Symbol	Units*
Conductivity	$s$	$\mu\text{mhos}$
Inorganic suspended solids	$m_i$	mgD/L
Dissolved oxygen	$o$	mgO <sub>2</sub> /L
Slowly reacting CBOD	$c_s$	mgO <sub>2</sub> /L
Fast reacting CBOD	$c_f$	mgO <sub>2</sub> /L
Organic nitrogen	$n_o$	$\mu\text{gN/L}$
Ammonia nitrogen	$n_a$	$\mu\text{gN/L}$
Nitrate nitrogen	$n_n$	$\mu\text{gN/L}$
Organic phosphorus	$p_o$	$\mu\text{gP/L}$
Inorganic phosphorus	$p_i$	$\mu\text{gP/L}$
Phytoplankton	$a_p$	$\mu\text{gA/L}$
Detritus	$m_o$	mgD/L
Pathogen	$X$	cfu/100 mL
Alkalinity	$Alk$	mgCaCO <sub>3</sub> /L
Total inorganic carbon	$c_T$	mole/L
Bottom algae biomass	$a_b$	mgA/m <sup>2</sup>
Bottom algae nitrogen	$IN_b$	mgN/m <sup>2</sup>
Bottom algae phosphorus	$IP_b$	mgP/m <sup>2</sup>

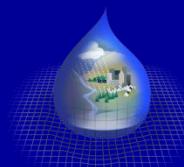
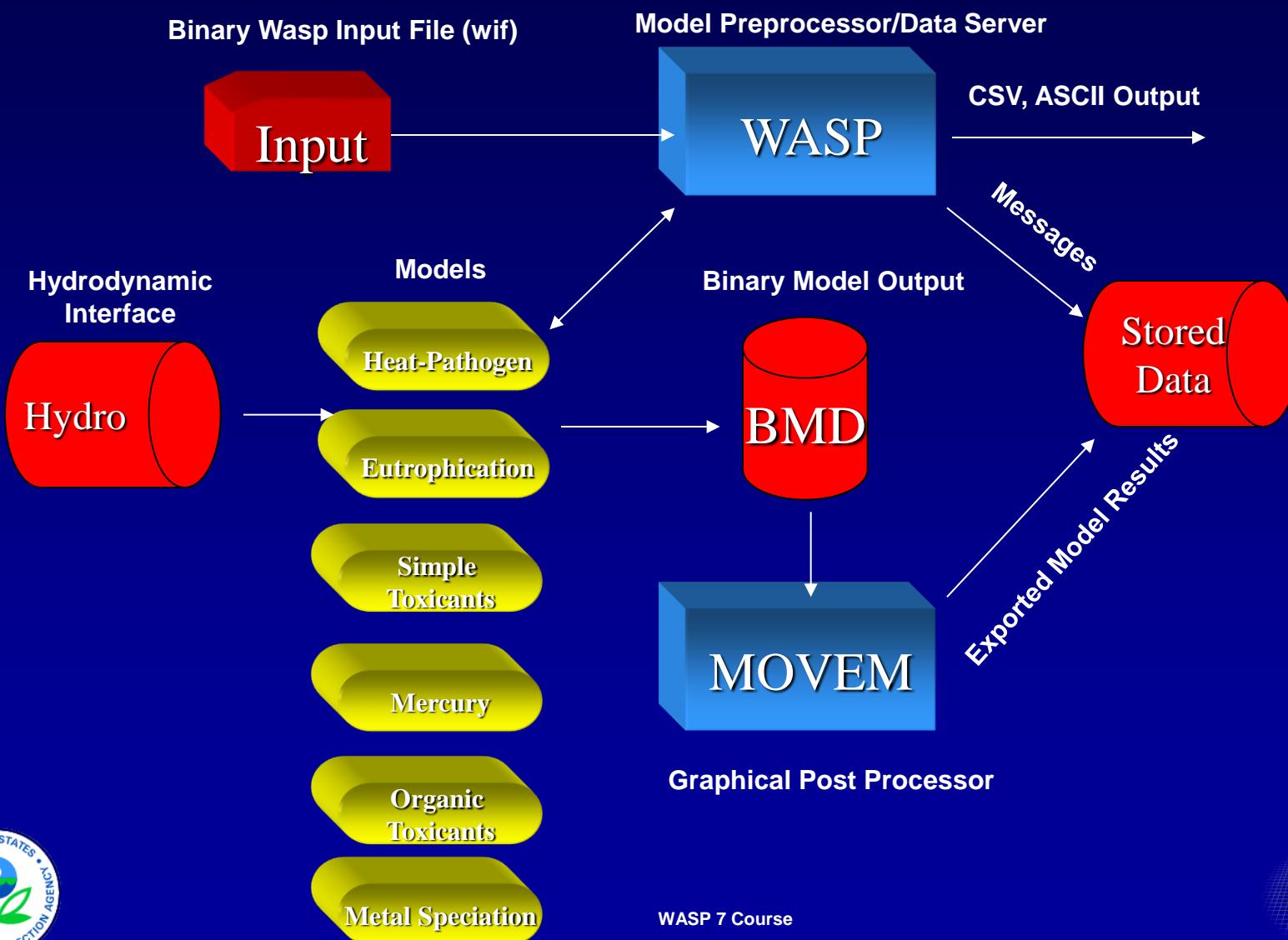




Legend:

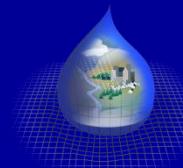
- phosphorus (pink)
- nitrogen (light green)
- organic carbon (yellow)
- plants (light green)
- non-living solids (orange)
- oxygen/inorg C (light blue)
- other (red)

# WASP Modeling Framework



# WASP Ventajas y Características

- **Flexibilidad en la red**
  - Aplicable a la mayoría de cuerpos de agua con algún nivel de complejidad
- **Aborda la mayoría de problemas de calidad del agua**
  - Calidad del agua convencional: OD, eutroficación, calor
  - Transporte y destino de tóxicos: organicos, metals simples, mercurio
- **Separación of Procesos**
  - Transporte
  - Cinética
- **Comunicación interna (Calor a Eutro. a Tóxicos)**
- **Comunicaciones externas a Modelos y Hojas de Cálculo**
- **Tres Técnicas de Solución Numérica**



# WASP Limitaciones

- No maneja algunos determinantes y procesos:
  - Procesos de zona de mezcla
  - Líquidos en fase no acuosa (e.g., vertimientos aceites o hidrocarburos)
  - Zonas de secado (planicies de inundación)
  - Reacciones de especiación de metales (módulo especial, META4, no hace parte general de la liberación de WASP)
- Archivos hidrodinámicos potencialmente grandes
- Módulos separados de eutroficación y de destino de sustancias tóxicas
  - Versión 7.3: comunicación interna CALOR - EUTRO - TOXI
- No puede correrse en modo automático
  - Programas de calibración objetiva
  - Programas de simulación de Monte Carlo
  - Version 7.3: Ejecución modo supervisor e importación de datos



# ADZ – MDLC - QUASAR EXTENDIDO

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
QUASAR EXTENDIDO permite la modelación dinámica de la calidad del agua en una red hídrica de canales conectados con vertimientos puntuales. El módulo permite la modelación del transporte y destino de un conjunto limitado de componentes de calidad del agua pero puede ser fácilmente extendido a otros determinantes. El modelo utiliza la ecuación de transporte de solutos ADZ apropiada para ríos con piscinas o zonas muertas de flujo lento.	<p><b>1.</b> Transporte de trazadores</p> <p><b>2.</b> Transporte de sólidos suspendidos</p> <p><b>3.</b> Oxígeno disuelto</p> <p><b>3.1.</b> Reaireación</p> <p><b>3.2.</b> Oxidación carbonácea</p> <p><b>3.3.</b> Nitrificación</p> <p><b>3.4.</b> Denitrificación</p> <p><b>3.5.</b> Fotosíntesis y Respiración</p> <p><b>3.6.</b> Crecimiento de fitoplancton</p> <p><b>3.7.</b> Muerte de fitoplancton</p> <p><b>3.8.</b> Demanda de oxígeno de sedimentos</p> <p><b>4.</b> Eutrofificación</p> <p><b>4.1.</b> Ciclo de P</p> <p><b>4.2.</b> Ciclo de N</p> <p><b>4.3.</b> OD</p> <p><b>4.4.</b> Fitoplancton</p> <p><b>5.</b> Temperatura</p> <p><b>6.</b> Salinidad y/o sólidos disueltos</p> <p><b>7.</b> Coliformes totales</p>	<p>1. Caudal y nivel de agua</p> <p>2. SST</p> <p>3. Nitratos</p> <p>4. Nitrógeno amoniacial</p> <p>5. DBO</p> <p>6. Oxígeno disuelto</p> <p>7. Fósforo orgánico particulado</p> <p>8. Fósforo soluble reactivo</p> <p>9. Coliformes totales</p> <p>10. Fitoplanton</p> <p>11. Tiempos de retención hidráulica y retraso advectivo de los solutos calculados en función de caudal y considerando zonas muertas</p> <p>12. Temperatura</p> <p>13. Salinidad y/o sólidos disueltos</p>	El software es libre y de código abierto, desarrollado por el Director del Proyecto desde 1991	<p>Software muy versatil que permite la modelación con SIMULINK en forma iconográfica</p> <p>Ambiente de trabajo amigable basado en Simulink lo que permite el montaje del modelo de manera cómoda</p> <p>Puede utilizarse para control en tiempo real y análisis en línea del comportamiento de la calidad del cuerpo de agua.</p> <p>Por corresponder a un software "desarrollado en casa" puede modificarse y extenderse fácilmente y muy rápidamente</p> <p>La complejidad del modelo puede incrementarse en el tiempo, por ejemplo incluyendo el transporte y destino de sustancias tóxicas una vez se calibren correctamente las interacciones agua - sedimento.</p>	<p>Requiere modificación para considerar condiciones anaeróbicas en algunos tramos del Río Bogotá</p> <p>Se requiere modificación para incorporar la especie de nitrógeno orgánico</p> <p>El módulo de temperatura requiere modificación por uno más sofisticado como el de Qual2k o WASP.</p>

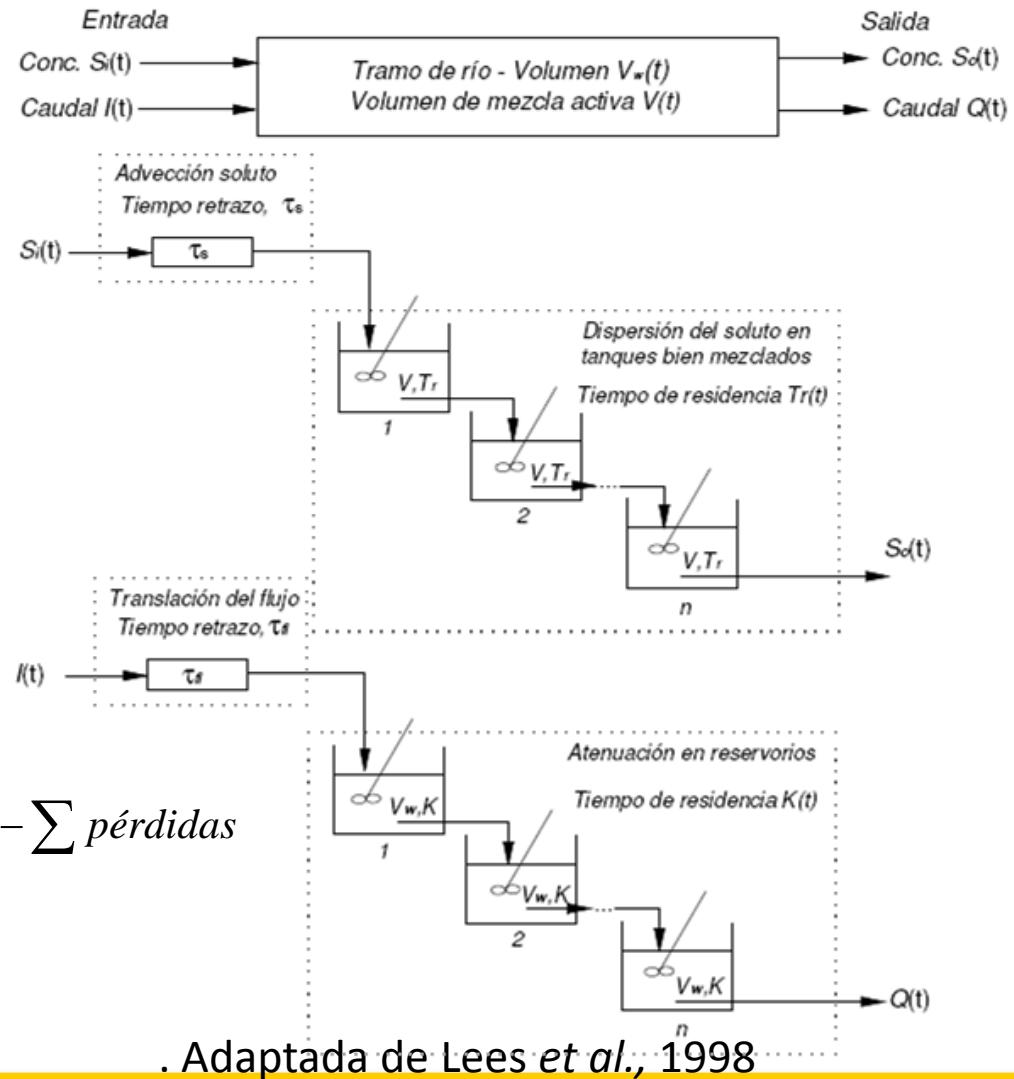


# Modelo – ADZ-MDLC-QUASAR

$$\frac{\partial Q(t)}{\partial t} = \frac{1}{K} (Q_m(t - \tau_{fj}) - Q(t))$$

$$\frac{\partial S(t)}{\partial t} = \frac{1}{Tr} (S_m(t - \tau) - S(t))$$

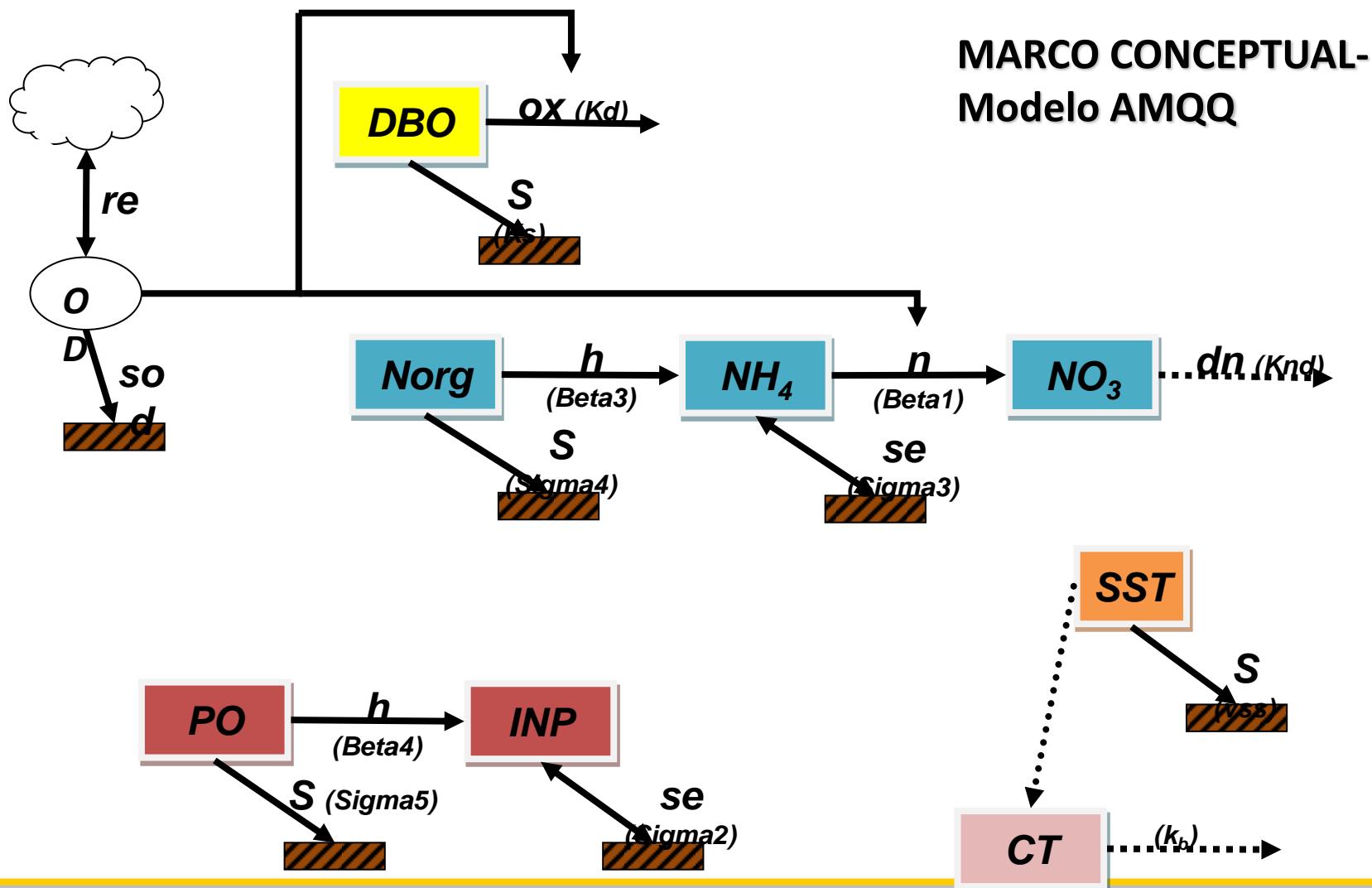
$$\frac{\partial X(t)}{\partial t} = \frac{1}{Tr} (e^{-kt} \cdot X_m(t - \tau) - X(t)) + \sum \text{fuentes} - \sum \text{pérdidas}$$



Adaptada de Lees *et al.*, 1998



# QUASAR Extendido

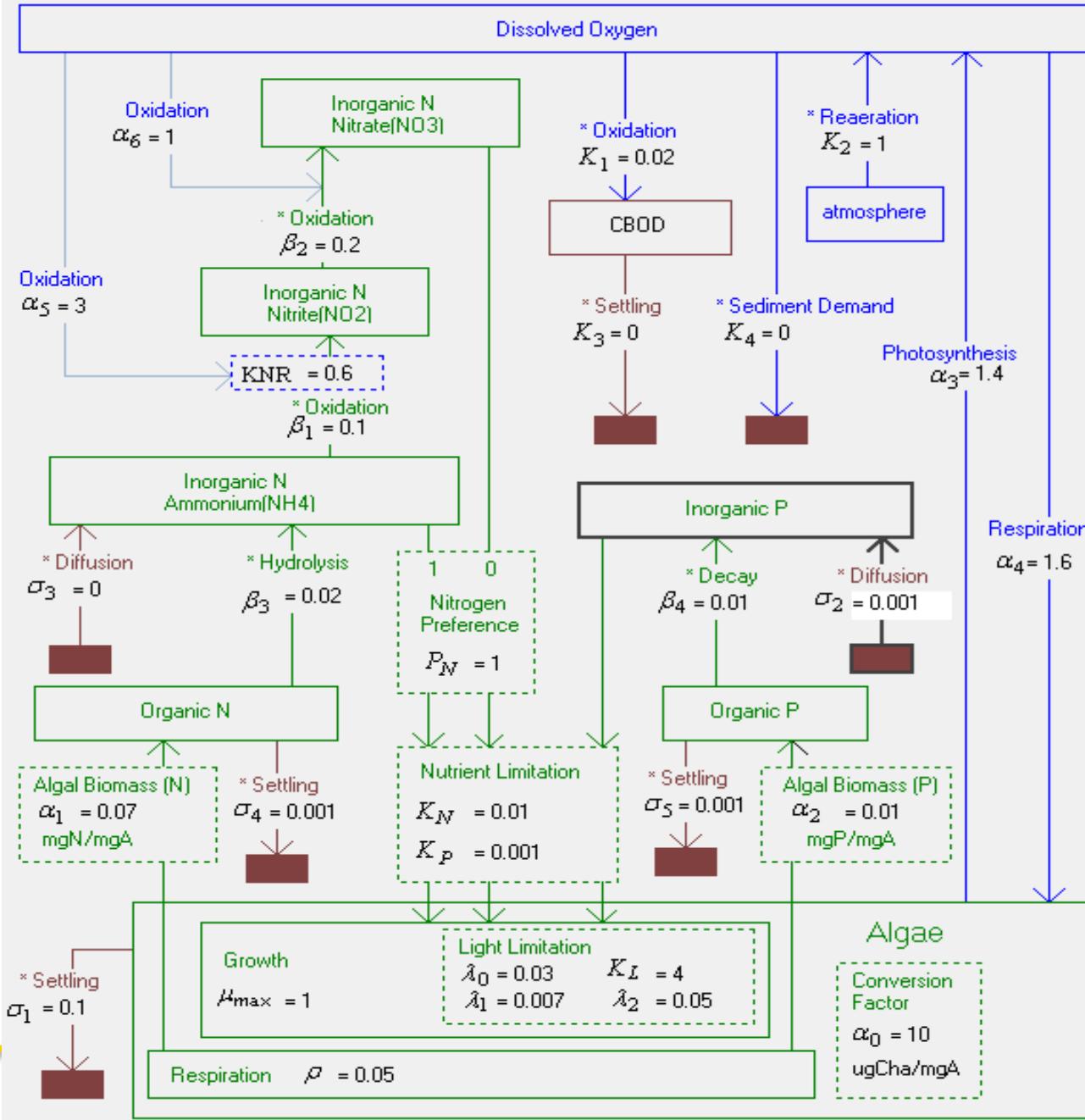


# HEC - RAS (Versión 4.0)

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>El módulo para la modelación de calidad del agua de HEC-RAS, está destinado a permitir al usuario realizar análisis de calidad del agua en sistemas fluviales. Incluye un módulo de Advección - Dispersión, contando adicionalmente con la capacidad de modelar temperatura del agua. Este nuevo módulo utiliza el esquema numérico explícito QUICKEST - ULTIMATE (Leonard, 1991) para solucionar la ecuación unidimensional de Advección - Dispersión usando un volumen de control con aplicación completa del cálculo de la energía térmica. C95</p>	<p>1. Transporte de sedimentos/Modelación de lecho móvil.</p> <p>2. Métodos de Análisis de Impactos de Sedimentos (SIAM).</p> <p>3. Modelo de temperatura.</p> <p>4. Modelación de nutrientes</p> <p>4.1. Nitrógeno Disuelto (NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, y Org-N)</p> <p>4.2. Fósforo Disuelto (PO<sub>4</sub> - P y Org P)</p> <p>4.3. Algas</p> <p>4.4. Oxígeno Disuelto</p> <p>4.5. Demanda Biológica de Oxígeno Carbonácea (CBOD)</p> <p>5. Modelación de constituyentes arbitrarios: definidos por el usuario, independientes de la temperatura y de los nutrientes del agua.</p> <p>6. Reglas definidas por el usuario para el control de operación de compuertas</p> <p>7. Modelación de flujo a presión en tuberías</p>	<p>1. Modelo de nutrientes</p> <p>1.1. Nitrito disuelto (NO<sub>2</sub>)</p> <p>1.2. Nitrato disuelto (NO<sub>3</sub>)</p> <p>1.3. Nitrógeno Orgánico disuelto (OrgN)</p> <p>1.4. Nitrógeno amoniaco disuelto (NH<sub>4</sub>)</p> <p>1.5. Fósforo orgánico disuelto (OrgP)</p> <p>1.6. Ortofósfato disuelto (PO<sub>4</sub>)</p> <p>1.7. Algas (A)</p> <p>1.8. Demanda Biológica de Oxígeno Carbonácea (CBOD)</p> <p>1.9. Oxígeno disuelto (DOX)</p>	<p>Gratis. El software puede descargarse gratuitamente de <a href="http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/">http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/</a></p>	<p>Software versátil, sencillo de manejar ampliamente utilizado para simulaciones hidrodinámicas.</p> <p>Modelo gratuito respaldado por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos.</p> <p>El módulo hidrodinámico ha sido ampliamente utilizado en para simulación de el medio de la ingeniería calidad del agua es y es reconocido como nuevo y no ha sido apropiado y robusto en aplicado con una gran cantidad de cantidad amplia de datos. aplicaciones.</p> <p>Presenta algunos errores de código que La interfaz para manejo interrumpe su de datos de calidad del funcionamiento de forma agua es amigable y súbita. El software se altamente flexible, encuentra aún en comoda para el trabajo desarrollo por parte del del usuario cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos.</p>	<p>Permite modelar un número limitado de componentes de calidad del agua. El código es cerrado y no se puede modificar</p> <p>No contiene la cinética y los procesos que se presentan en condiciones anaerobias</p> <p>El código implementado ampliamente utilizado en para simulación de el medio de la ingeniería calidad del agua es y es reconocido como nuevo y no ha sido apropiado y robusto en aplicado con una gran cantidad de cantidad amplia de datos. aplicaciones.</p> <p>Presenta algunos errores de código que La interfaz para manejo interrumpe su de datos de calidad del funcionamiento de forma agua es amigable y súbita. El software se altamente flexible, encuentra aún en comoda para el trabajo desarrollo por parte del del usuario cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos.</p>



# MARCO CONCEPTUAL-Modelo HEC RAS



Esquema de las interacciones analizadas por HEC-RAS en el módulo de modelación de nutrientes (Tomado de HEC-RAS 4.0)



# MIKE 11

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
MIKE 11 permite la simulación hidráulica, de calidad de agua y transporte de sedimentos en estuarios, ríos, sistemas de irrigación, canales y otros cuerpos de agua. Es un modelo unidimensional dinámico para diseño detallado, manejo y operación de sistemas simples y complejos de canales y ríos. Funciona a través de módulos que son acoplados en un proyecto.	1. Hidrodinámica	1. Plantilla eutrofización	Módulo hidrodinámico ilimitado (MIKE 11): utilizada en el campo de la ingeniería en un gran número de aplicaciones. Alrededor de \$50'000.000	Software ampliamente utilizado en el campo de la ingeniería en un gran número de aplicaciones. Es el software comercial no gratuito de más reconocimiento y uso en proyectos de gran escala para consultoría e investigación.	Dado que es un software comercial de alto costo, los procesos, ecuaciones, cinética y desarrollo de códigos que utiliza como solución el modelo son cerrados y no se conocen en su totalidad y se mantienen por DHI bajo reserva. El usuario no puede tener conocimiento completo de la operación y forma de solución de las ecuaciones que utiliza el programa. En la literatura han sido mostrados casos en los cuales el modelo MIKE11 pierde robustes y presenta fallas en su operación y solución de las ecuaciones.
	2. Advección Dispersión	1.1. Fitoplancton			
	3. Transporte de Sedimentos	1.2. Carbono			
	4. ECOLab (Módulo para la modelación de calidad del agua)	1.3. Nitrógeno			
		1.4. Fósforo	Módulo AD: Alrededor de \$9'000.000		
	4.1. Eutrofización	1.5. Clorofila	GIS (MIKE 11): Alrededor de \$9'000.000		
	4.2. Metales pesados	1.6. Zooplancton			
	4.3. Coliformes	1.7. Carbono	ECOLAB: Alrededor de \$10'000.000		
	4.4. BOD disuelta, BOD en suspensión, BOD en el lecho del río, OD, amoniaco y nitrato.	1.8. Detritos			
		1.9. Carbono	DHI ofrece planes de inversión a 5 años para manejo de licencias y actualizaciones para las cuales también es necesario realizar los pagos correspondientes con lo cual el costo puede ascender a más de \$150'000.000		
	5. Lluvia – Escorrentía	1.10. Nitrógeno			
	6. Predicción de inundaciones	1.11. Fósforo			
		1.12. Nitrógeno inorgánico			
		1.13. Fósforo inorgánico			
		1.14. Oxígeno disuelto			
		1.15. Vegetación benthica			
		2. Plantilla metales pesados			



# SIMBA

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>SIMBA permite realizar un análisis holístico del sistema de alcantarillado, planta de tratamiento, manejo de lodos y aguas receptoras. Todos los componentes necesarios para un análisis detallado de los subsistemas y sus interacciones se integran en un sistema de simulación simple. El modelo facilita las aplicaciones en campos como: Planeamiento y diseño de plantas de tratamiento considerando variantes operacionales, incluyendo control, optimización de diseño de procesos y operación de plantas existentes, análisis de los procesos de manejo de agua, tratamiento de lodos y consumo de energía, análisis de flujos en áreas urbanas, desarrollo y prueba de estrategias para control en tiempo real de sistemas de drenaje urbano, análisis de interacciones de lluvia, tratamiento de aguas y calidad del agua del cuerpo receptor.</p>	<p><b>1.</b> Simulación de PTAR's  <b>2.</b> Modelos para clarificación primaria y secundaria  <b>3.</b> Modelación de sistemas de alcantarillado  <b>4.</b> Procesos anaeróbicos  <b>5.</b> Cuerpos de agua receptoras  <b>6.</b> Aproximación de modelación de Lagrange</p>	<p><b>1.</b> Alcantarillados  <b>1.1.</b> OD  <b>1.2.</b> Amoniaco  <b>2.</b> PTAR  <b>2.1.</b> OD  <b>2.2.</b> Nitrógeno  <b>2.3.</b> Fósforo</p>	El software tiene un costo por licencia cercano a los 1000 Euros	<p>Software muy versatil que permite la modelación de manera integrada Alcantarillado - PTAR - Río</p> <p>Ambiente de trabajo amigable basado en Simulink lo que permite el montaje del modelo de manera cómoda</p> <p>Dado que tiene un amplio desarrollo para modelación de calidad del agua en alcantarillados, contiene la cinética y procesos bajo condiciones anaerobias</p> <p>Puede utilizarse para control en tiempo real y análisis en línea del comportamiento de la calidad del cuerpo de agua.</p> <p>Permite un estudio amplio del sistema integrado y las interacciones Alcantarillado-PTAR-Río ya que contiene gran cantidad de procesos, ecuaciones y cinética para representar de forma completa el sistema</p>	<p>Para el análisis hidrodinámico de ríos utiliza SWWM cuyos desarrollos se concentran principalmente al análisis hidráulico de alcantarillados y por tanto podría no ser el más apropiado para el caso de ríos.</p> <p>El objetivo principal de SIMBA es realizar la simulación integrada Alcantarillado - PTAR - Río lo cual podría considerarse por fuera del alcance del estudio para el proyecto.</p> <p>Se encuentra poca información en la literatura sobre el funcionamiento propio del Software, por lo cual sería necesario contactarse con IfaK para obtener mayor información sobre su operación y limitaciones y ventajas potenciales.</p>



# Surface Water Modelling System (SMS)

DESCRIPCIÓN CORTA	PROCESOS MODELADOS	VARIABLES DE ESTADO	COSTO ESTIMADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>SMS es una interfaz gráfica para pre y post procesamiento de modelos hidrodinámicos en una, dos y tres dimensiones. Incluye elementos finitos 2D, diferencias finitas 2D, elementos finitos 3D y herramientas de modelación 1D. Los modelos soportados por SMS incluyen GFGEN, RMA2 (modelo hidrodinámico que se acopla a RM4), RMA4 (modelo para calidad del agua), SED2D-WES, ADCIRC, CGWAVE, STWAVE, M2D, HIVEL2D y HEC-RAS. Las aplicaciones primarias de dichos modelos incluyen: cálculo de niveles y velocidades de flujo en condiciones de flujo permanente y no permanente, modelación de contaminantes, intrusión salina, transporte de sedimentos, dispersión de ondas, propiedades de ondas y otros.</p>	<p><b>1. Transporte de solutos (1 y 2D)</b></p> <p><b>2. OD</b></p> <p><b>3. DBO</b></p> <p>Calcula concentraciones de hasta 6 constituyentes, conservativos y no conservativos, con una malla computacional de una y/o dos dimensiones.</p>	<p><b>1. Oxígeno disuelto (plantilla)</b></p>	<p>Los módulos RMA2 (Hidrodinámico) y RMA 4 (Calidad del agua) cuestan del orden de \$8'000.000</p>	<p>Permite análisis en una y dos dimensiones</p>	<p>El enfoque de los módulos RMA2 y RMA4 está orientado hacia el análisis de costas, por tal motivo permiten modelación 2D, sin embargo pensando en la modelación de ríos podría considerarse de un nivel de complejidad excesivo</p> <p>Se encuentra limitado al análisis de hasta 6 constituyentes de calidad del agua.</p> <p>La única plantilla de análisis predeterminada en el software es la de oxígeno disuelto, cualquier otro constituyente de calidad del agua deberá ingresarse y definirse de manera manual</p> <p>No contiene la cinética y los procesos que se presentan en condiciones anaerobias</p> <p>La interfaz para ingreso de datos e información sobre las características del río es bastante compleja y poco amigable requiriendo en algunas circunstancias la generación de archivos txt para ensamble en el modelo</p>



# SELECCIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA

## Resumen

- QUAL2-E (EPA)
  - No maneja bien condiciones anaeróbicas
  - Requiere correcciones para su aplicación Río Bogotá
  - Interacciones agua sedimentos se modelan exógenamente
  - No es amigable
- QUAL2-K (Chapra, 2001 – EPA 2002)
  - Ok. Condiciones anaeróbicas,
  - Ok Interacciones agua sedimentos se manejan endógenamente
  - Facilidad de uso, amigabilidad



# SELECCIÓN DEL MODELO

QUASAR (Whitehead, et al. 1997)

- Sencillez modelo conceptual. Muy costoso
- Requiere modificaciones. Dinámica a nivel planeamiento?

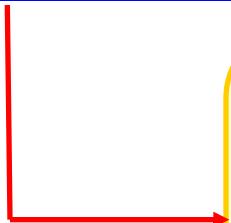
OTIS (Runkel, 1998), ADZ (Beer y Young, 1983)

- Ok. Procesos de transporte Ríos de Montaña
  - Requieren extensión para su aplicación como
  - modelos de calidad
- 
- MIKE-11
  - Complejidad justificada a este nivel ?
  - Manejo de condiciones anaeróbicas? Metanogénesis? Costo?



# METODOLOGIA PROPUESTA

## 4. INVESTIGACIÓN HIDRÁULICA PRELIMINAR Y ENSAYOS CON TRAZADORES



PARÁMETROS  
HIDRÁULICOS Y DE  
TRANSPORTE

MODELOS DE TIEMPO  
DE VIAJE



# Investigación hidráulica

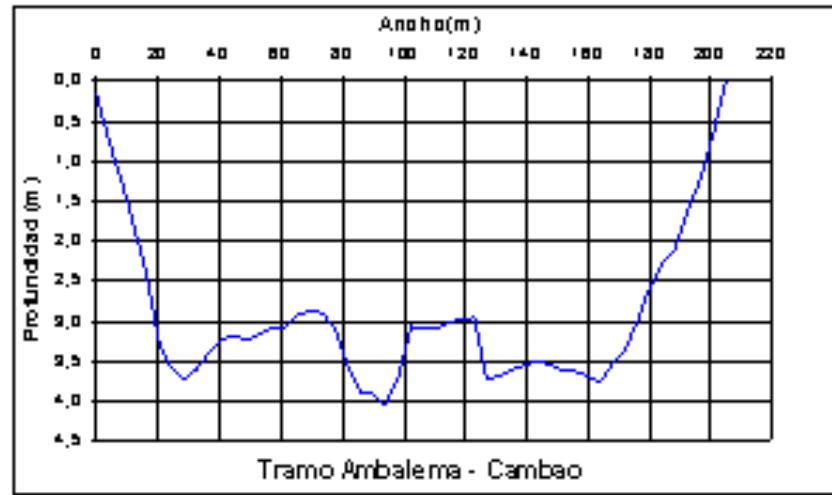
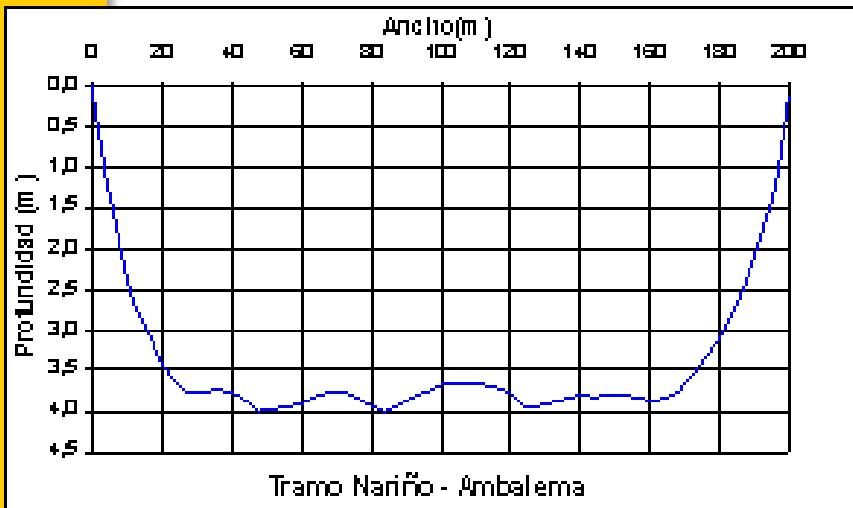
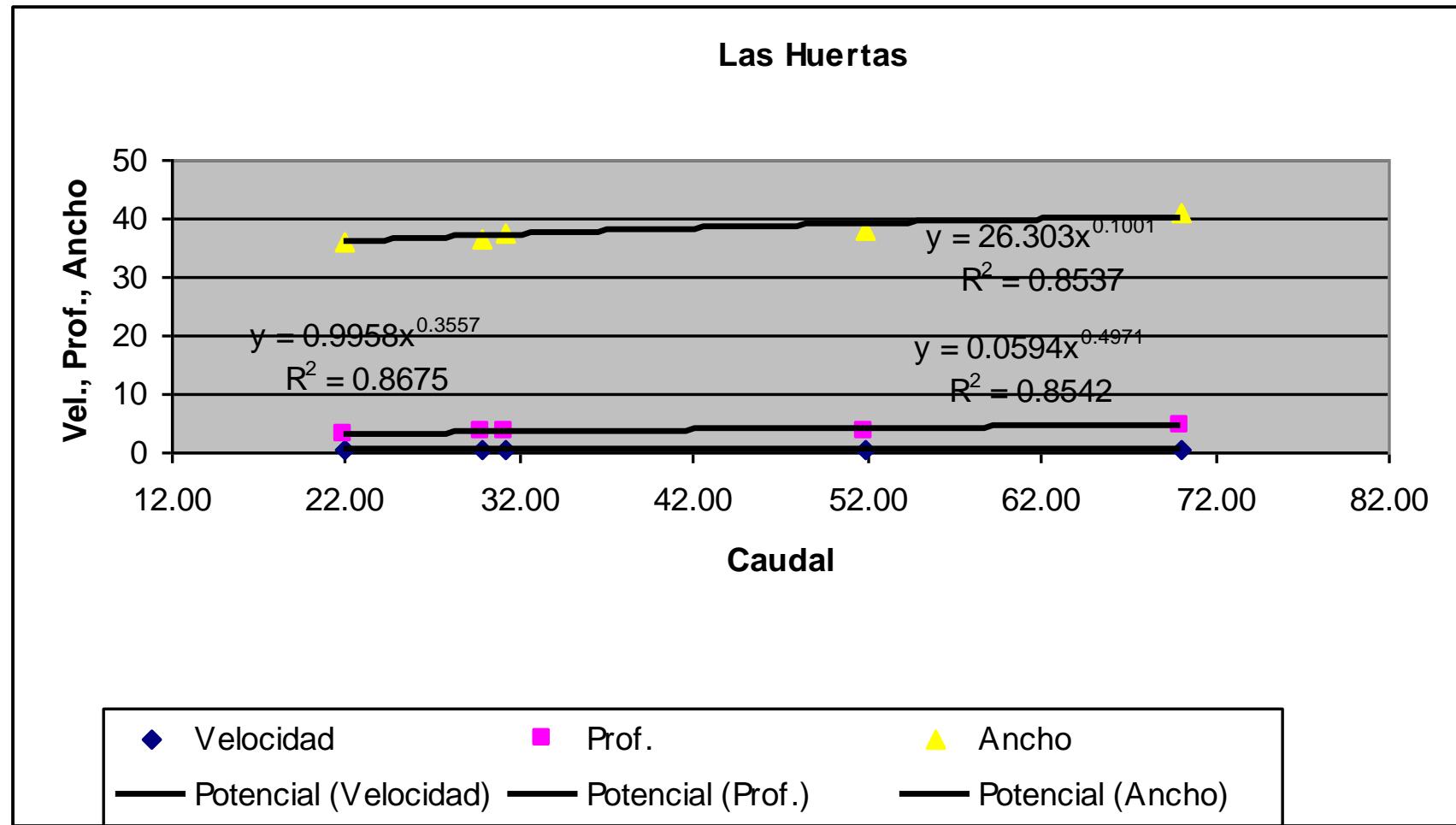


Tabla 44 – Características de las secciones transversales trapezoidales de los subtramos de estudio

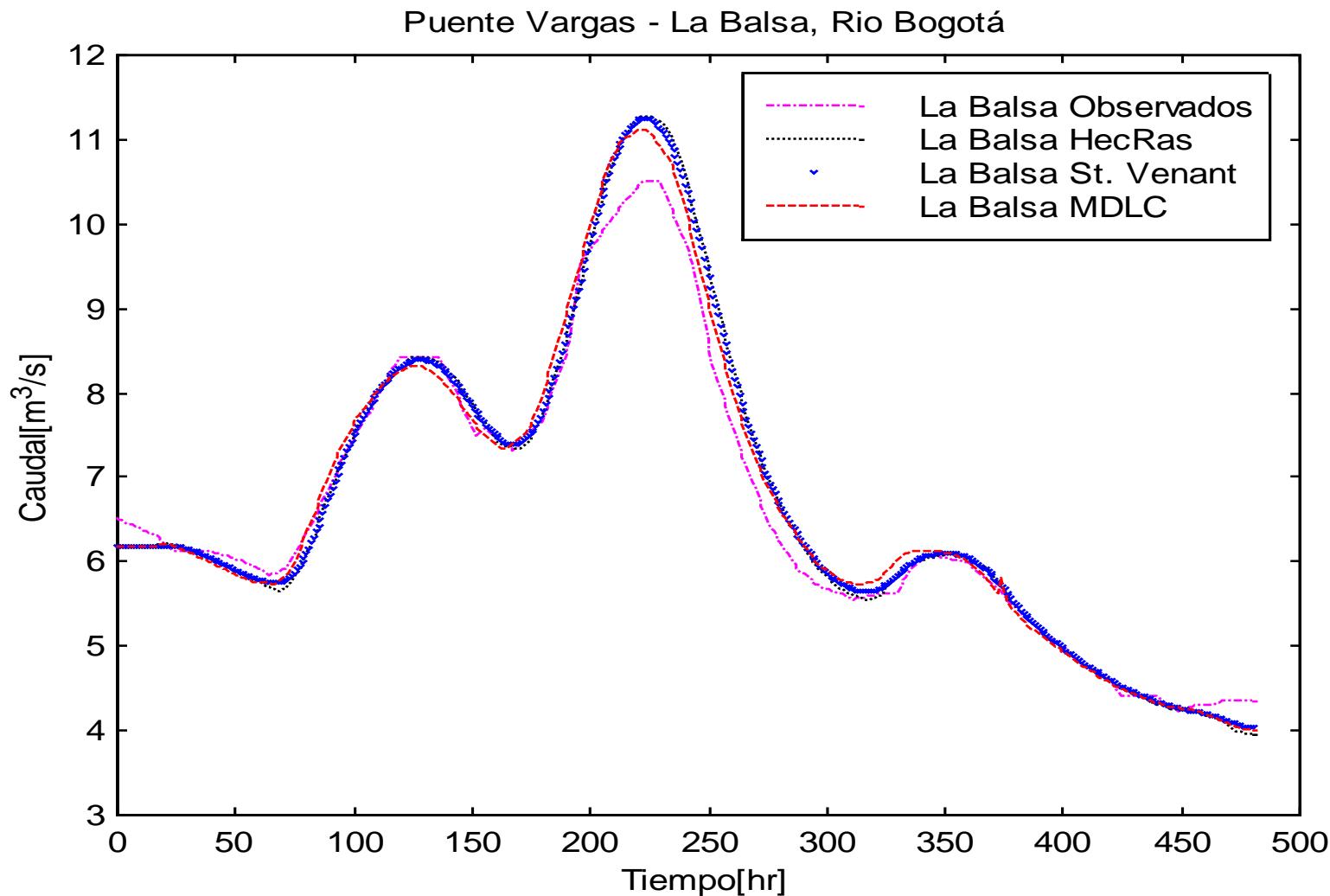
Subtramo	Ancho base (m)	z
Purificación - Coello	80	6.67
Coello - Nariño	100	5.00
Nariño - Ambalema	160	5.26
Ambalema – Sabandija	150	8.11
Sabandija - Arrancaplumas	55	5.93

Secciones transversales medias

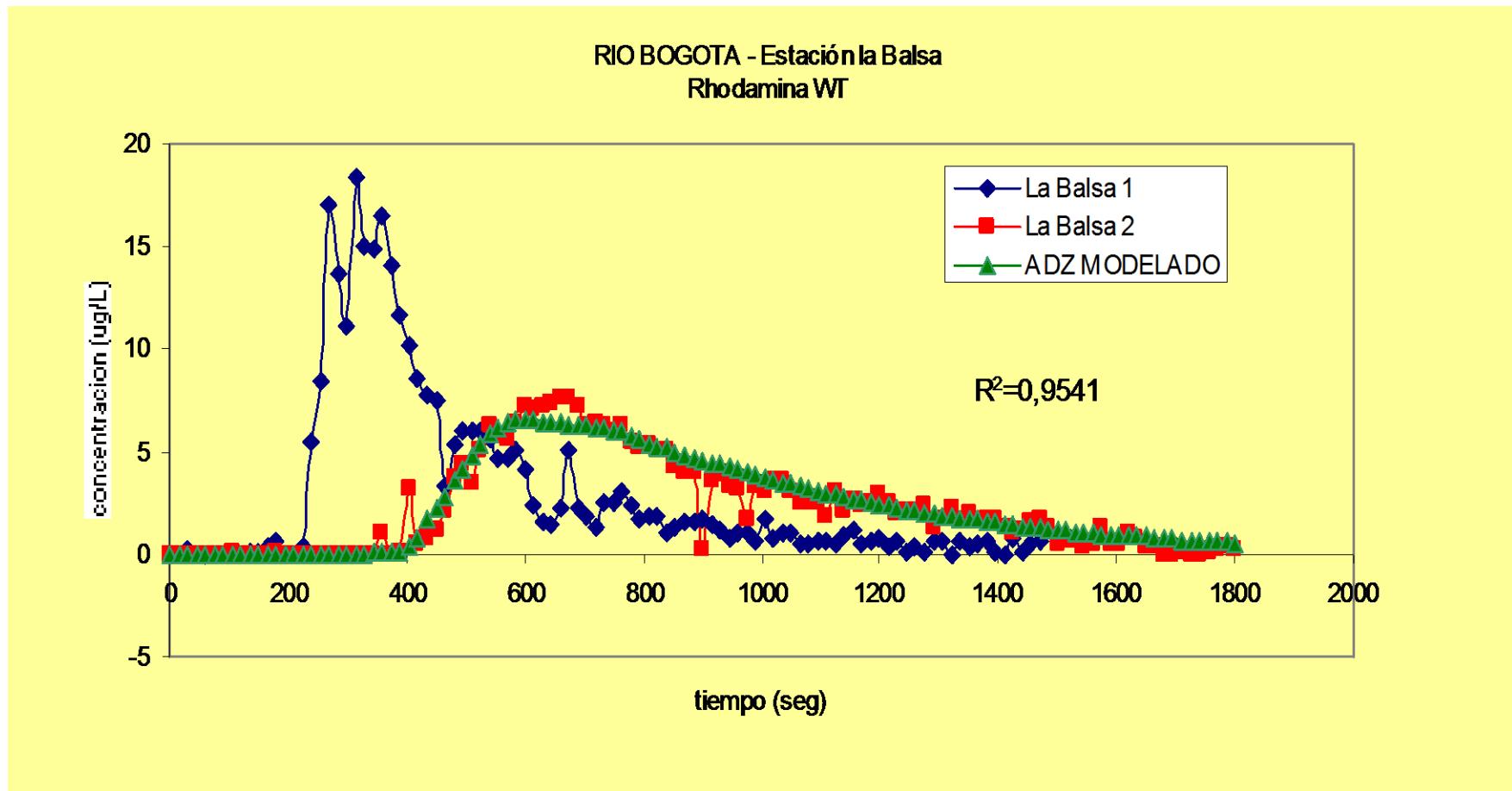
# INVESTIGACIÓN HIDRAULICA



# CALIBRACION HIDRAULICA

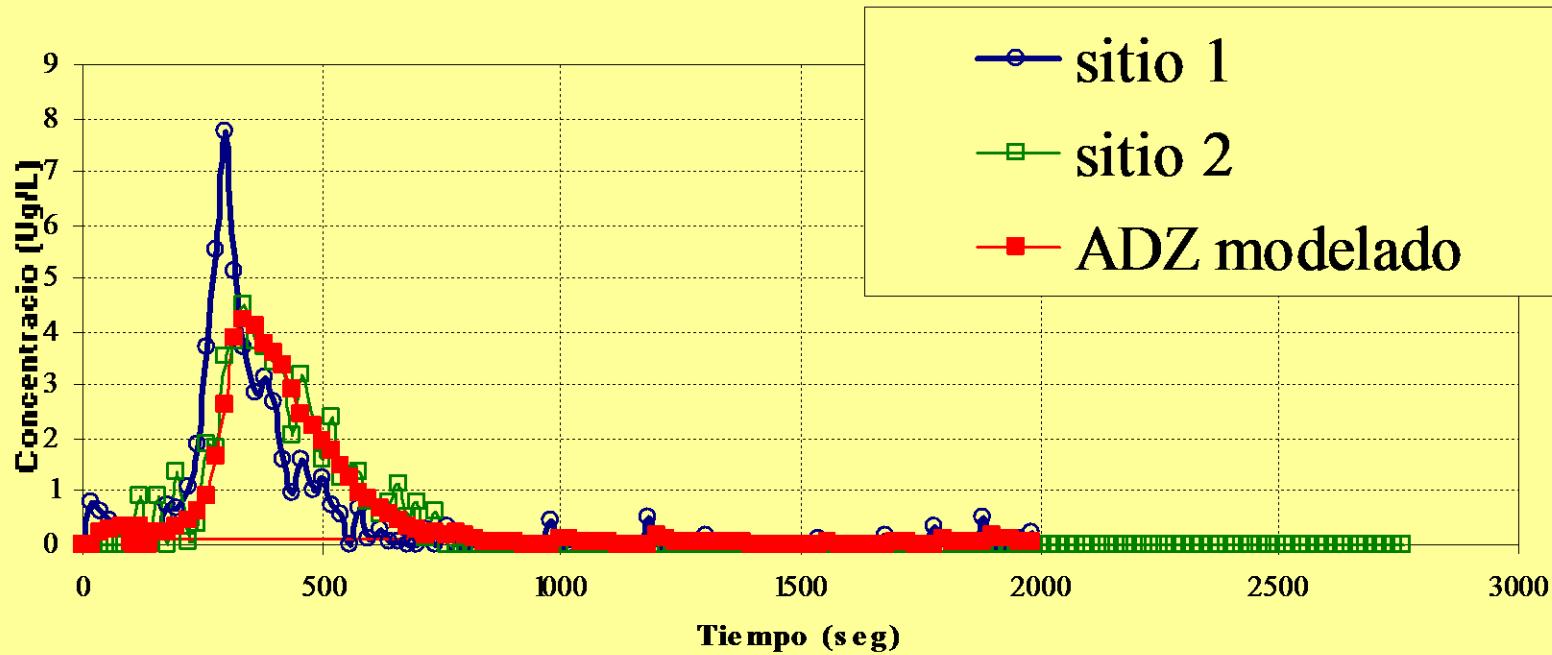


# EXPERIMENTOS CON TRAZADORES CUENCA MEDIA



# EXPERIMENTOS CON TRAZADORES CUENCA BAJA

Ens ayo de Trazadore s en el Rio Bogotá, Cuenca Baja  
(Rodamina WT )



# Experimento No. 1 con trazadores

## Río Magdalena

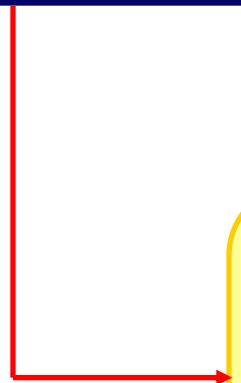
- Determinar longitud de mezcla
- Estimar coeficiente de dispersión transversal y longitudinal
- Estimar fracción dispersiva modelo de tiempo de viaje ADZ-MDLC
- **Modelo de tiempos de viaje en el tramo de estudio**



Inyección rodamina  
WT

# METODOLOGIA PROPUESTA

## 5. PROGRAMACION DE TOMA DE MUESTRAS



**METODOLOGIA  
SITIOS  
DETERMINANTES  
ACUERDOS  
LABORATORIO**



# MEDICIONES DE CAMPO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

- Aforos de caudal, T, pH, conductividad y Oxígeno disuelto, Vel. Viento (40 sitios)
- DBO total y soluble, DQO total y soluble,
- NTK, amonio, nitratos, fósforo total y soluble, alcalinidad,
- Clorofila-*a*
- Coliformes totales, Coliformes fecales
- SST y Análisis de muestras de columna agua-sedimento (Demanda bética)

**Campo**

**Mat. Org.**

**Nutrientes**

**Fito.**

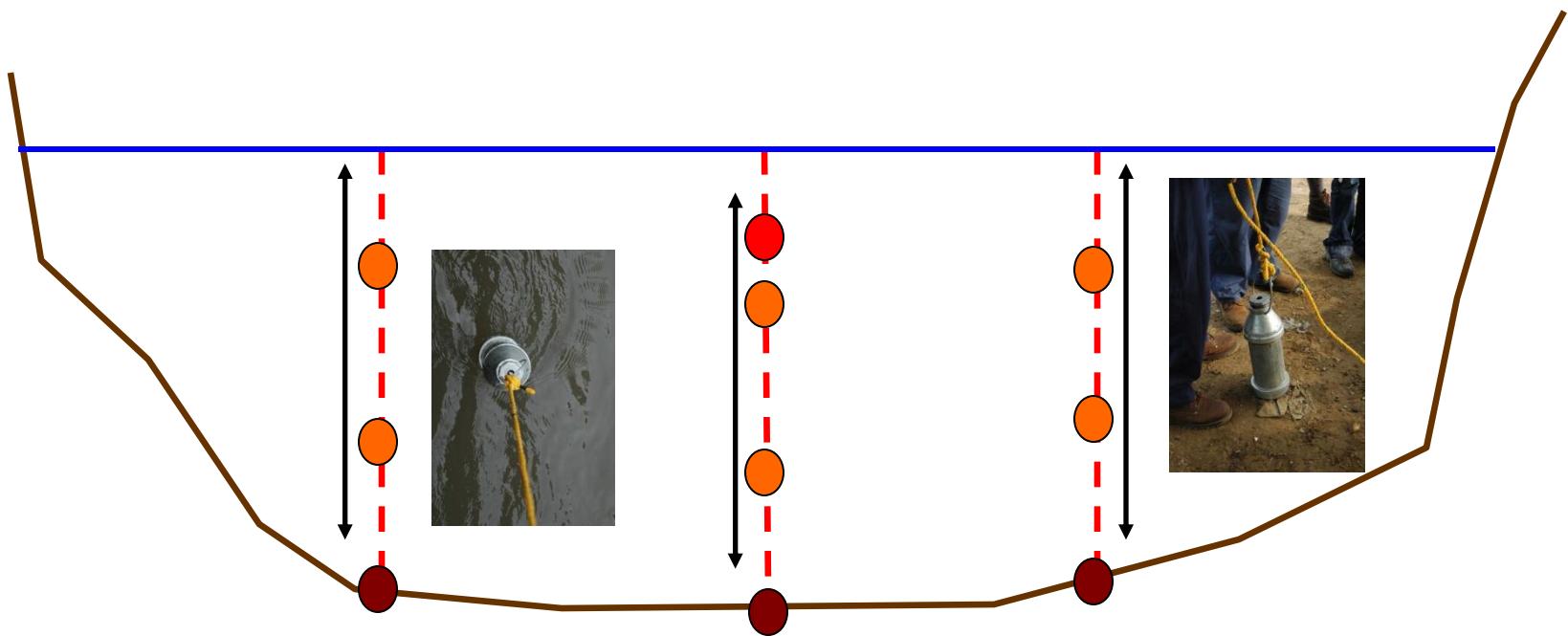
**Patógenos**

**Sedi-  
mentos**



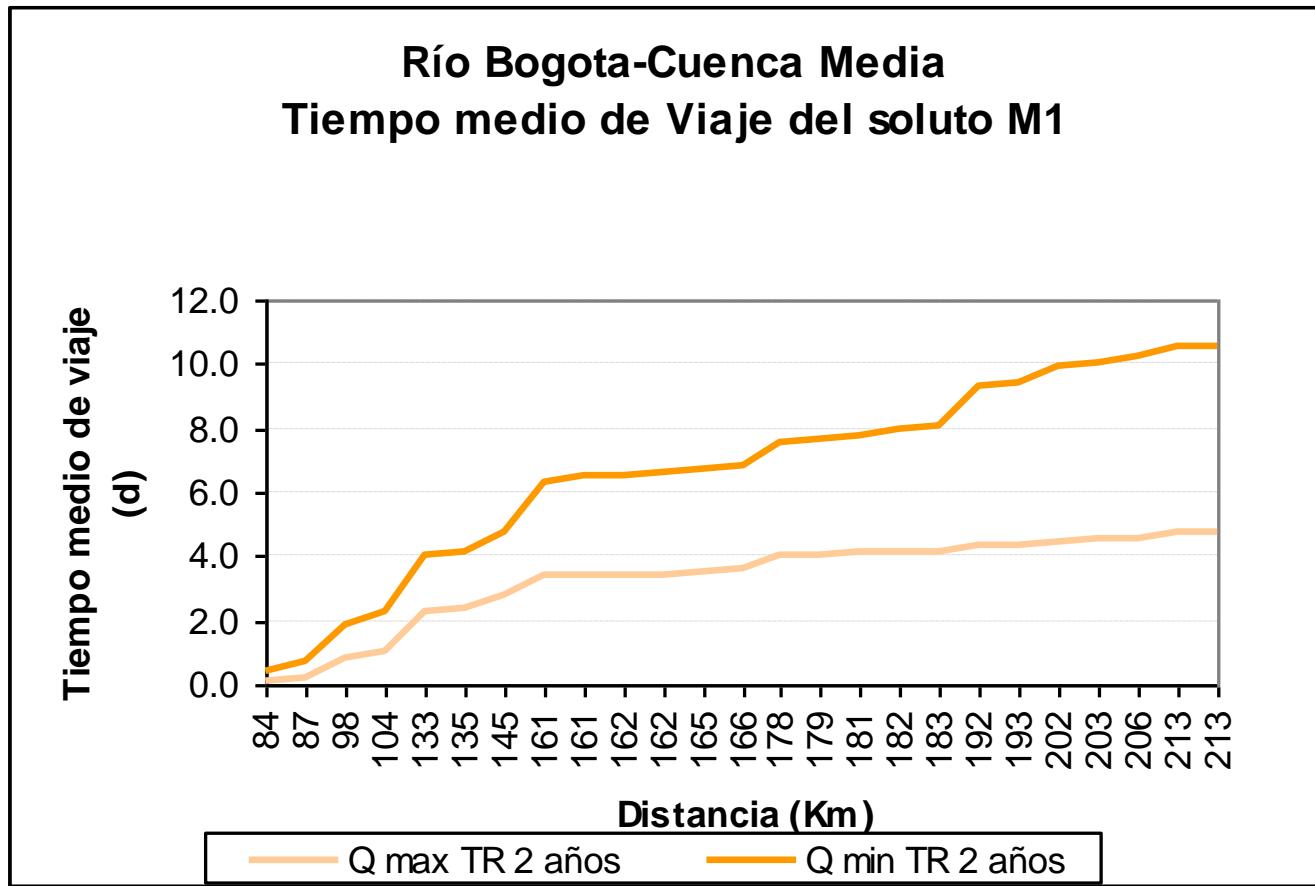
# TOMA DE LA MUESTRA

- Siguiendo la masa de agua
- Integrada en la sección transversal

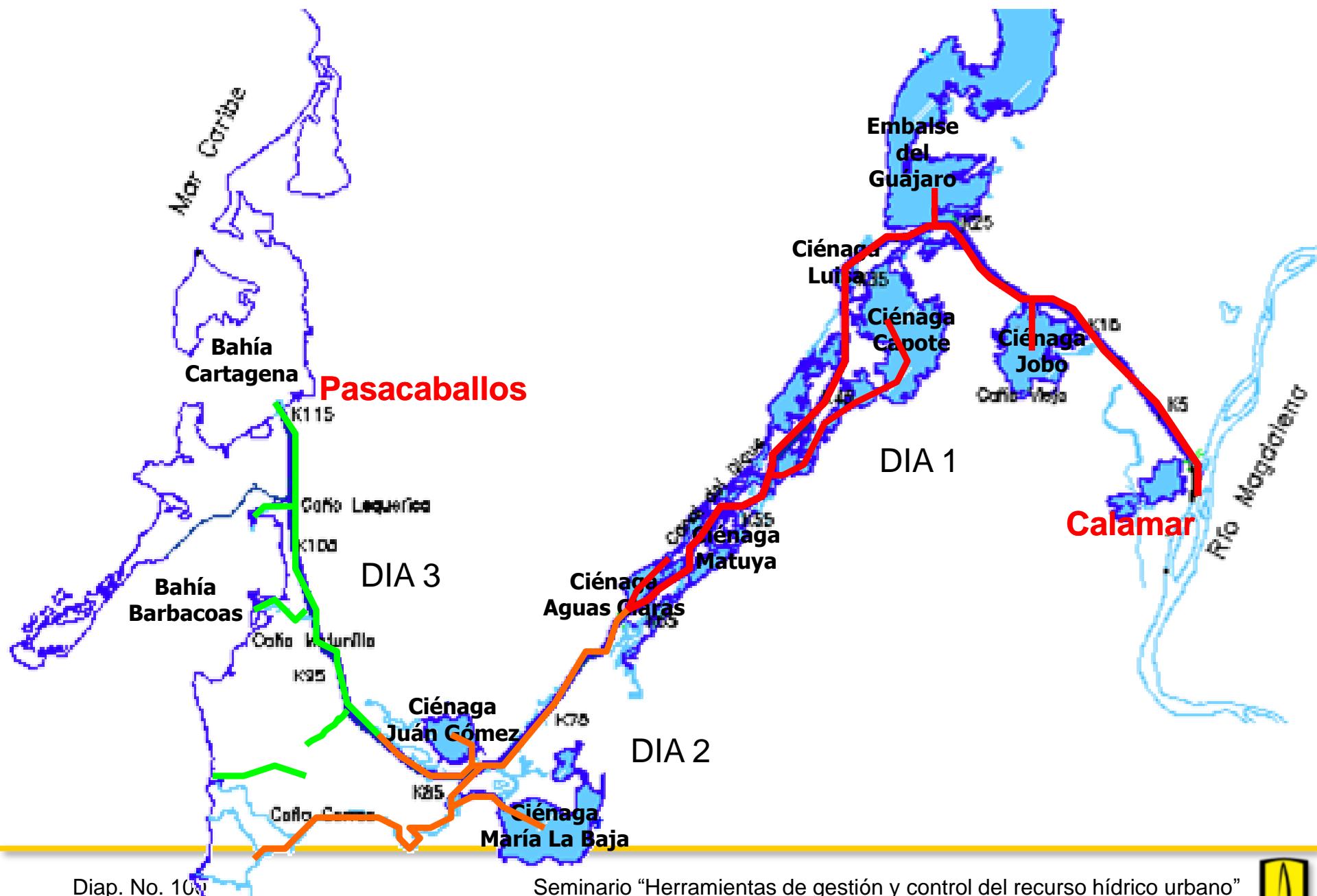


# MODELO DE TRANSPORTE

## Ejemplo TIEMPOS DE VIAJE CUENCA MEDIA



# CAMPAÑA DE MEDICIONES



# AFOROS

Aforos - Uninorte



# TOMA DE MUESTRAS Y EQUIPOS



## Toma de muestras y equipos



# TOMA DE MUESTRAS Y EQUIPOS

## Toma de muestras y equipos



# PERSONAL TÉCNICO

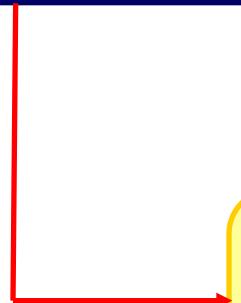


# EQUIPOS



# METODOLOGIA PROPUESTA

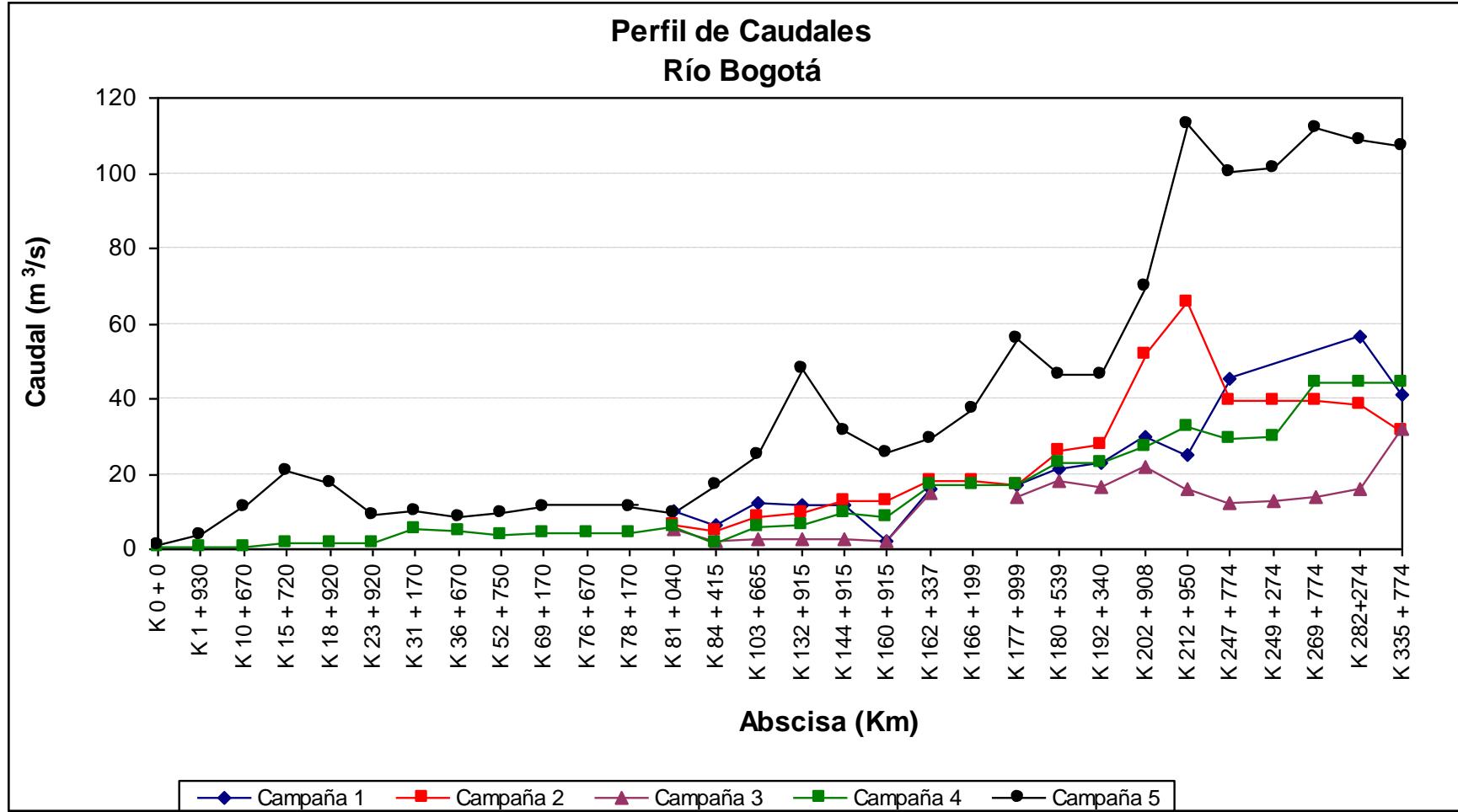
## 6. CAMPAÑAS DE MEDICIONES Y ANÁLISIS DE LABORATORIO



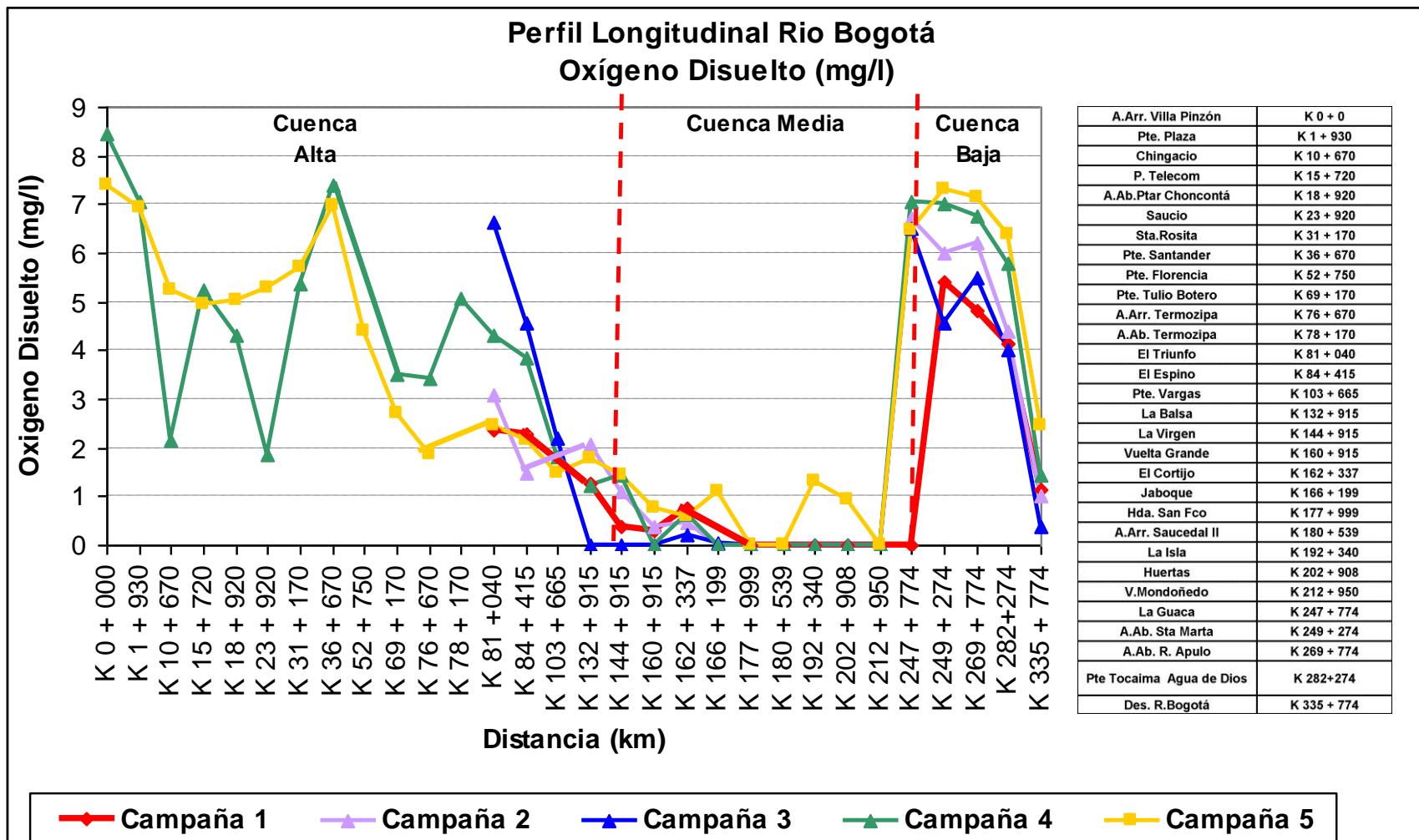
**DATOS PARA  
CALIBRACIÓN DEL  
MODELO**



# CAUDALES CAMPAÑAS 1 - 5

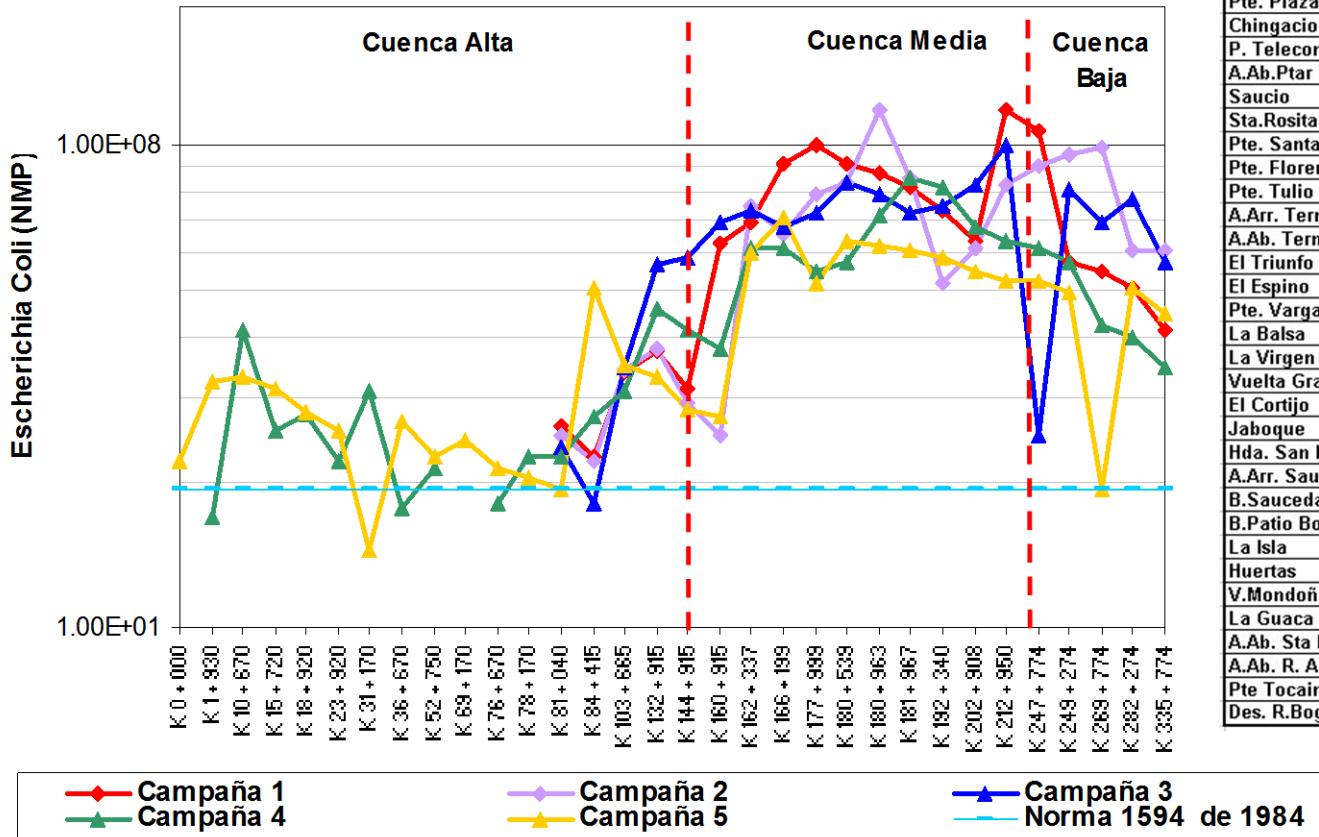


# OXIGENO DISUELTO - CAMPAÑAS 1 - 5



# ESCHERICHIA COLI

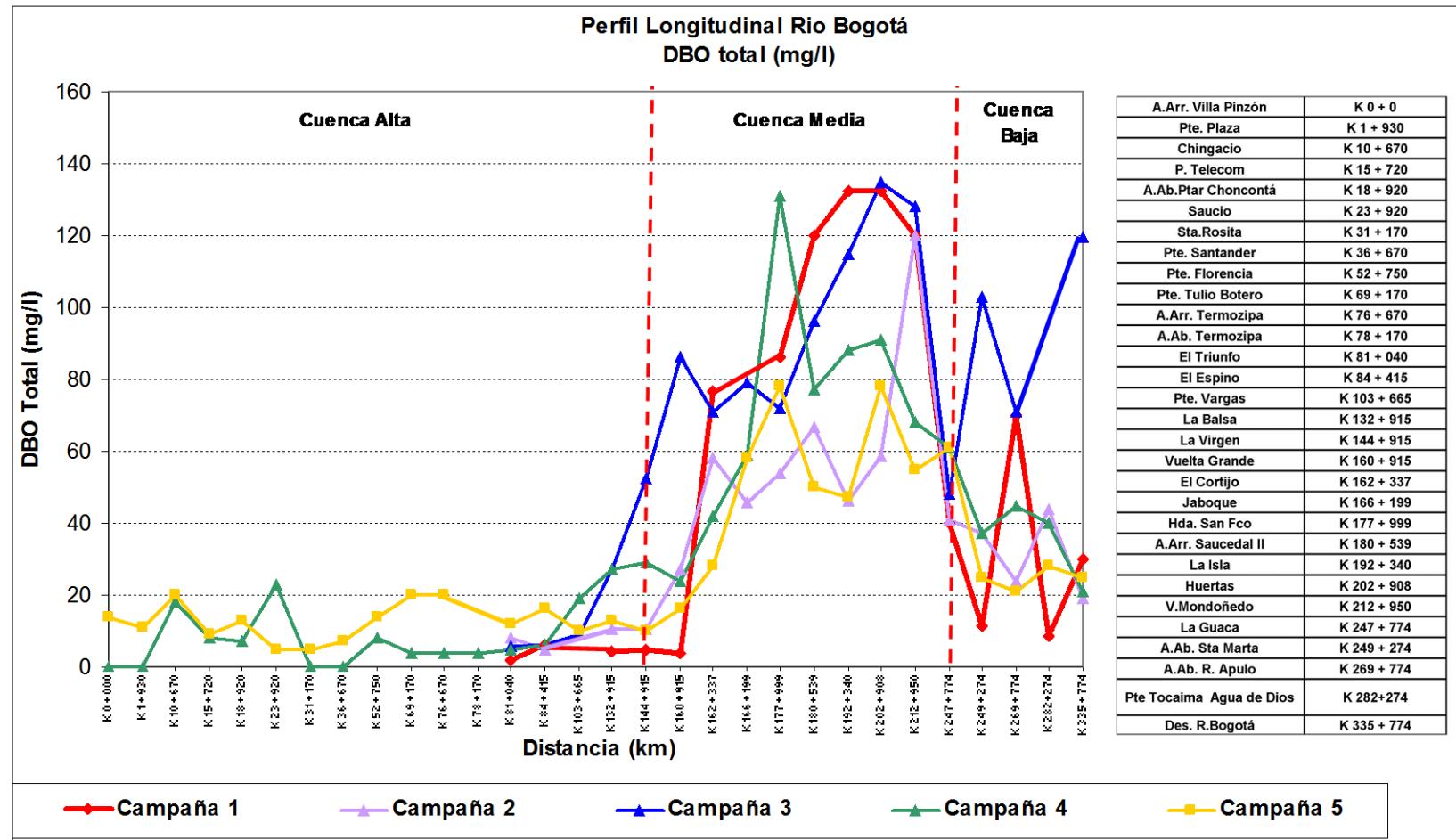
Perfil Longitudinal Río Bogotá  
Escherichia Coli (NMP)



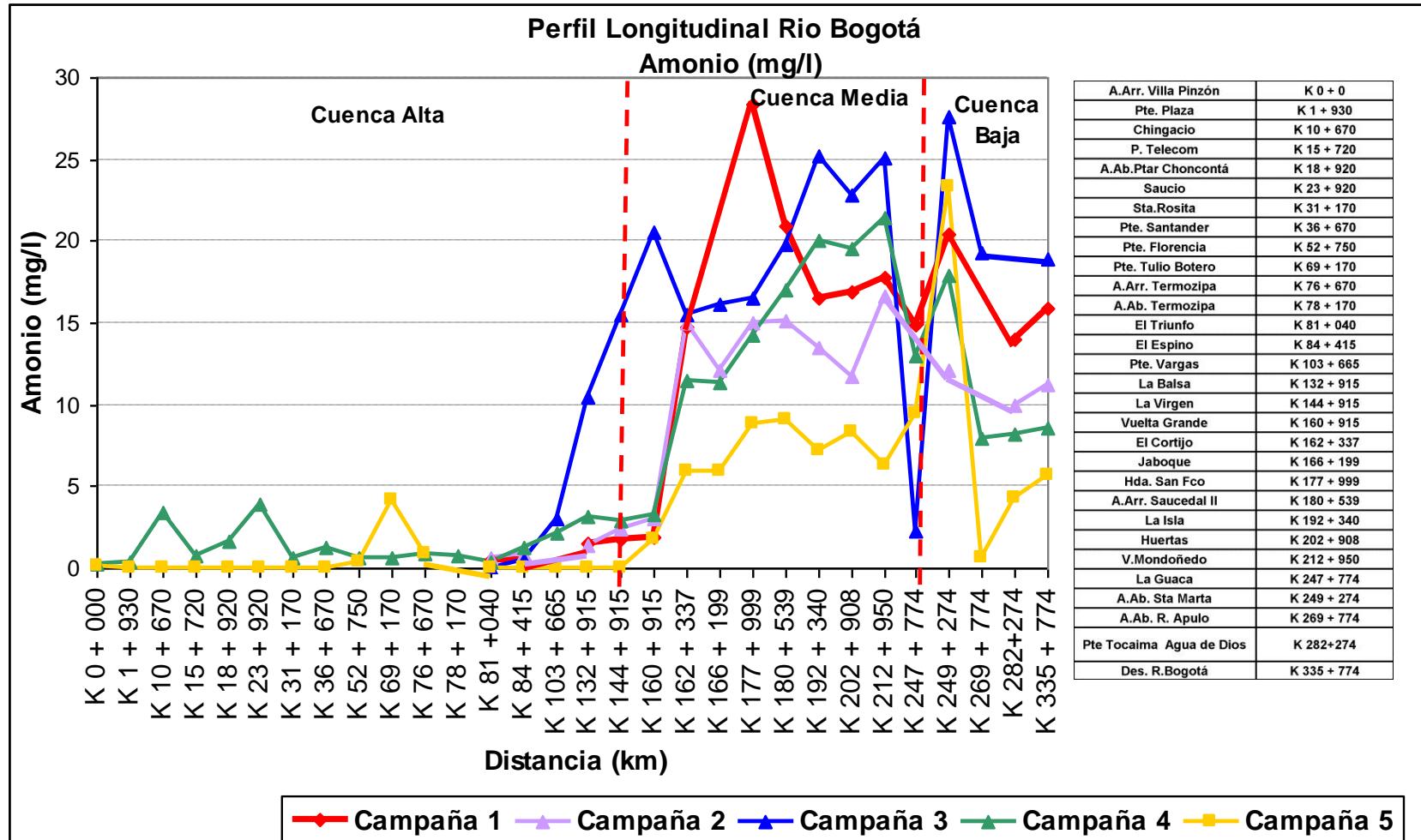
A. Arr. Villa Pinzón	K 0 + 0
Pte. Plaza	K 1 + 930
Chingacio	K 10 + 670
P. Telecom	K 15 + 720
A. Ab. Ptar Choncontá	K 18 + 920
Saucio	K 23 + 920
Sta. Rosita	K 31 + 170
Pte. Santander	K 36 + 670
Pte. Florencia	K 52 + 750
Pte. Tulio Botero	K 69 + 170
A. Arr. Termizipa	K 76 + 670
A. Ab. Termozaipa	K 78 + 170
El Triunfo	K 81 + 40
El Espino	K 84 + 415
Pte. Vargas	K 103 + 665
La Balsa	K 132 + 915
La Virgen	K 162 + 337
Vuelta Grande	K 166 + 199
El Cortijo	K 177 + 999
Jaboque	K 180 + 539
Hda. San Eco	K 181 + 967
A. Arr. Saucedal II	K 182 + 340
B. Saucedal II	K 202 + 908
B. Patio Bonito II	K 212 + 950
La Isla	K 247 + 774
Huertas	K 249 + 274
V. Mondoñedo	K 288 + 774
La Guaca	K 282 + 274
A. Ab. Sta Marta	K 335 + 774
Pte. Tocaima Agua de Día	K 282 + 274
Des. R. Bogotá	K 335 + 774



# DBO<sub>5</sub> TOTAL



# AMONIO



# Campañas 1 y 2 de mediciones de calidad del agua y aforos RM



Parámetros de campo y toma de muestras

Oxígeno Río  
Bogotá



# Campañas No 1 y 2 de mediciones de calidad del agua y aforos



Bogotá



Coello

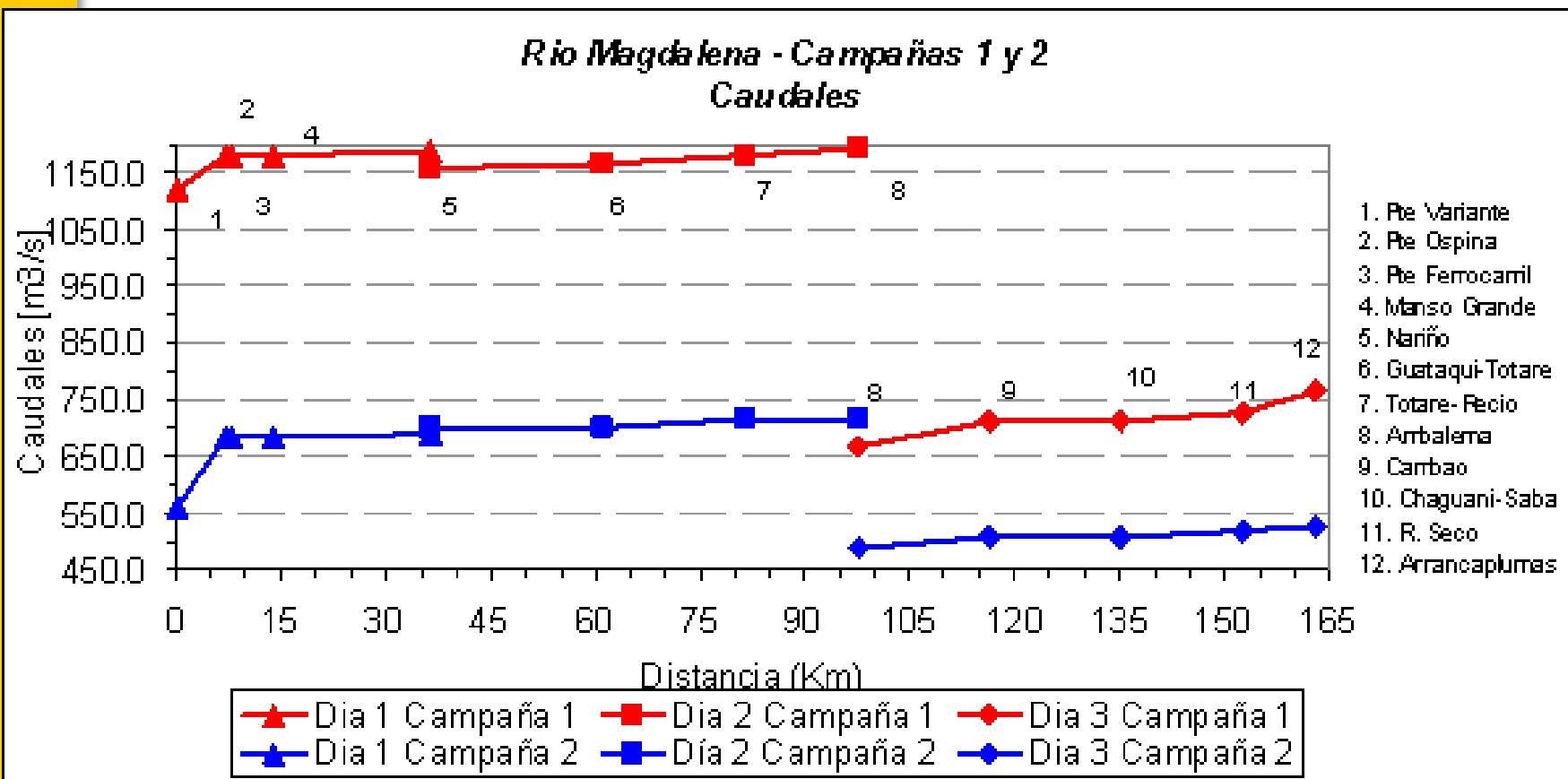
Aforos

Arrancaplumas

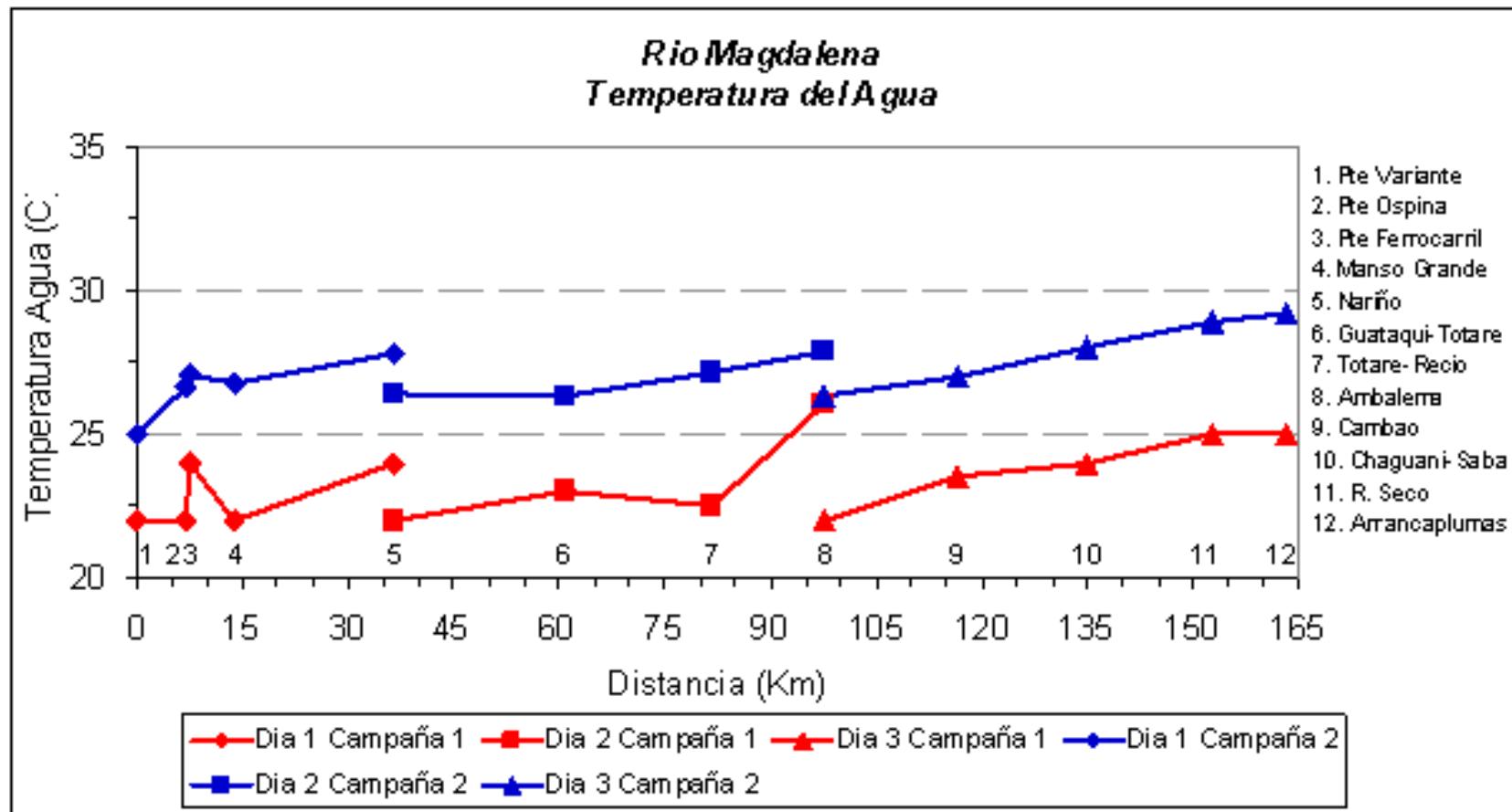


Cambao

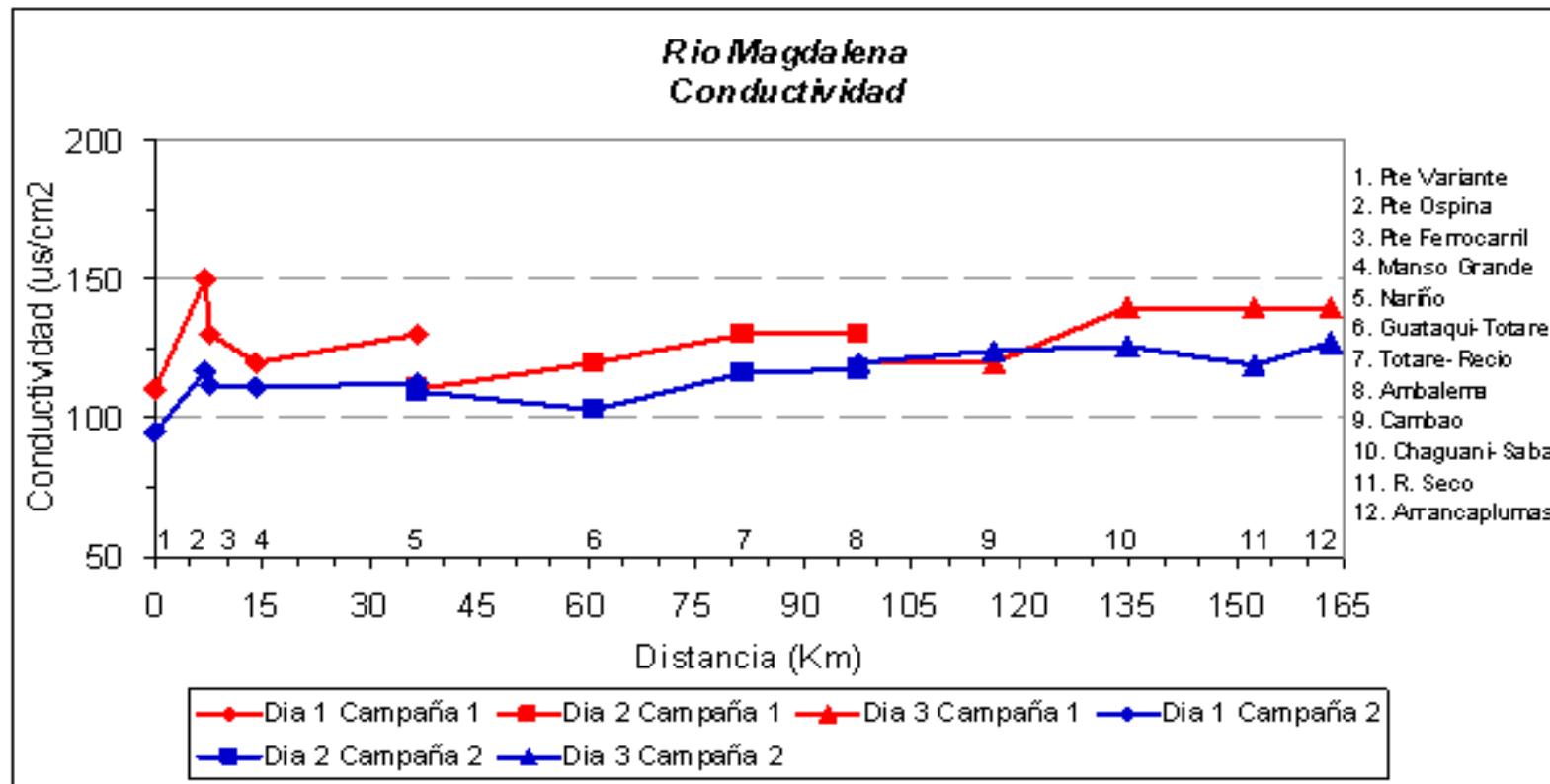
# Campañas No 1 y 2 Caudales



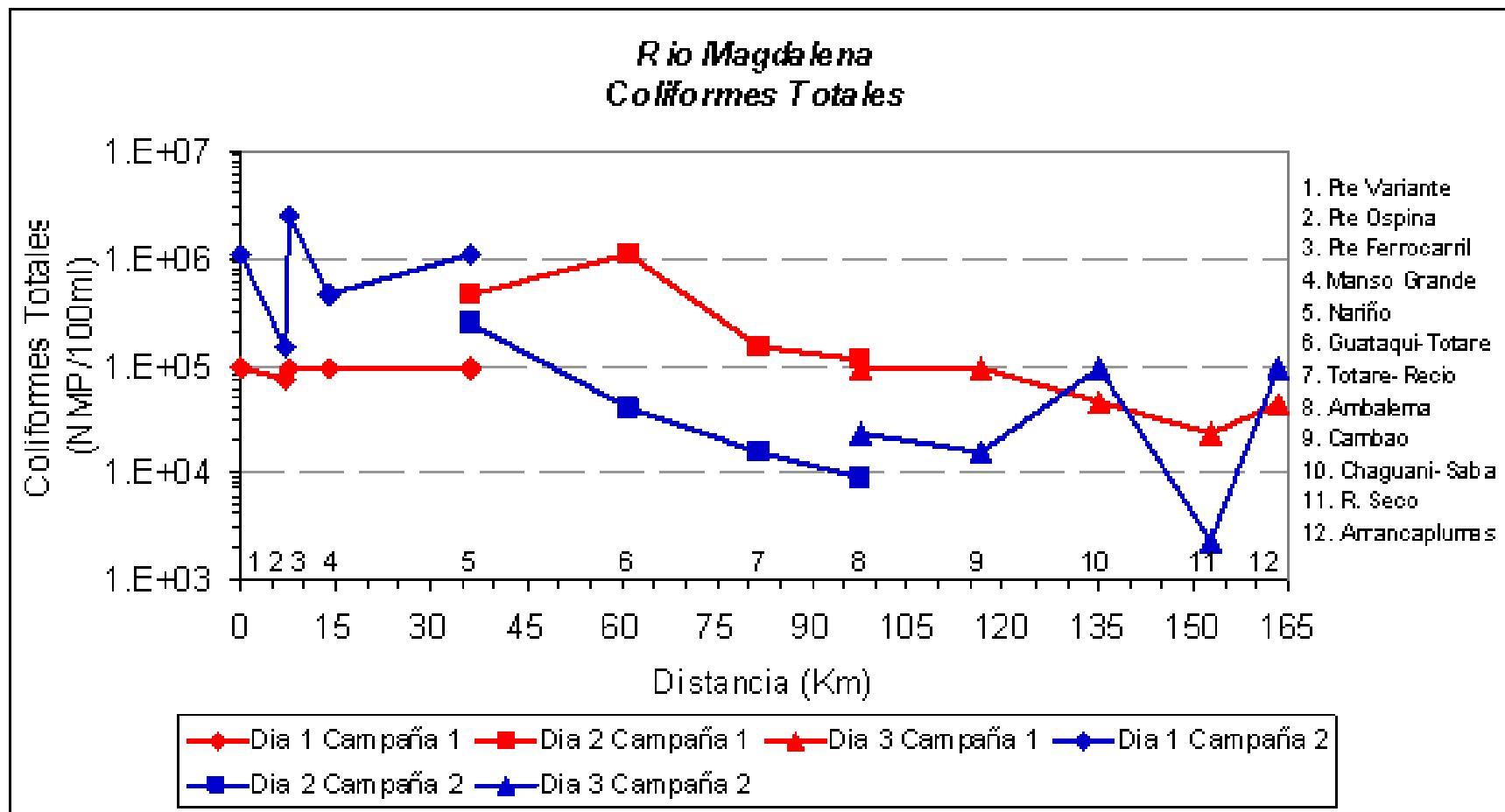
# Campañas 1 y 2 - Temperatura



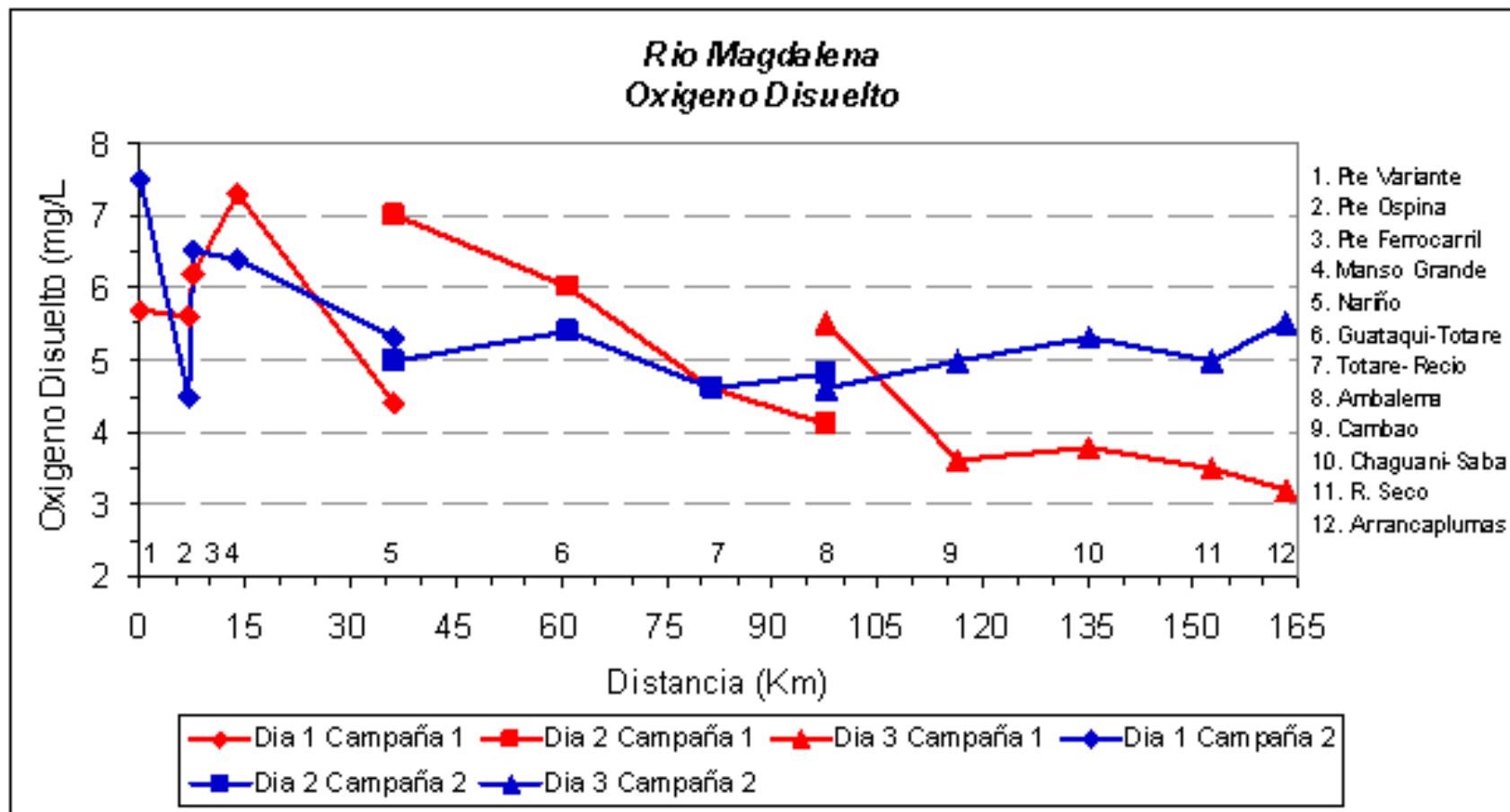
# Campañas 1 y 2 - Conductividad



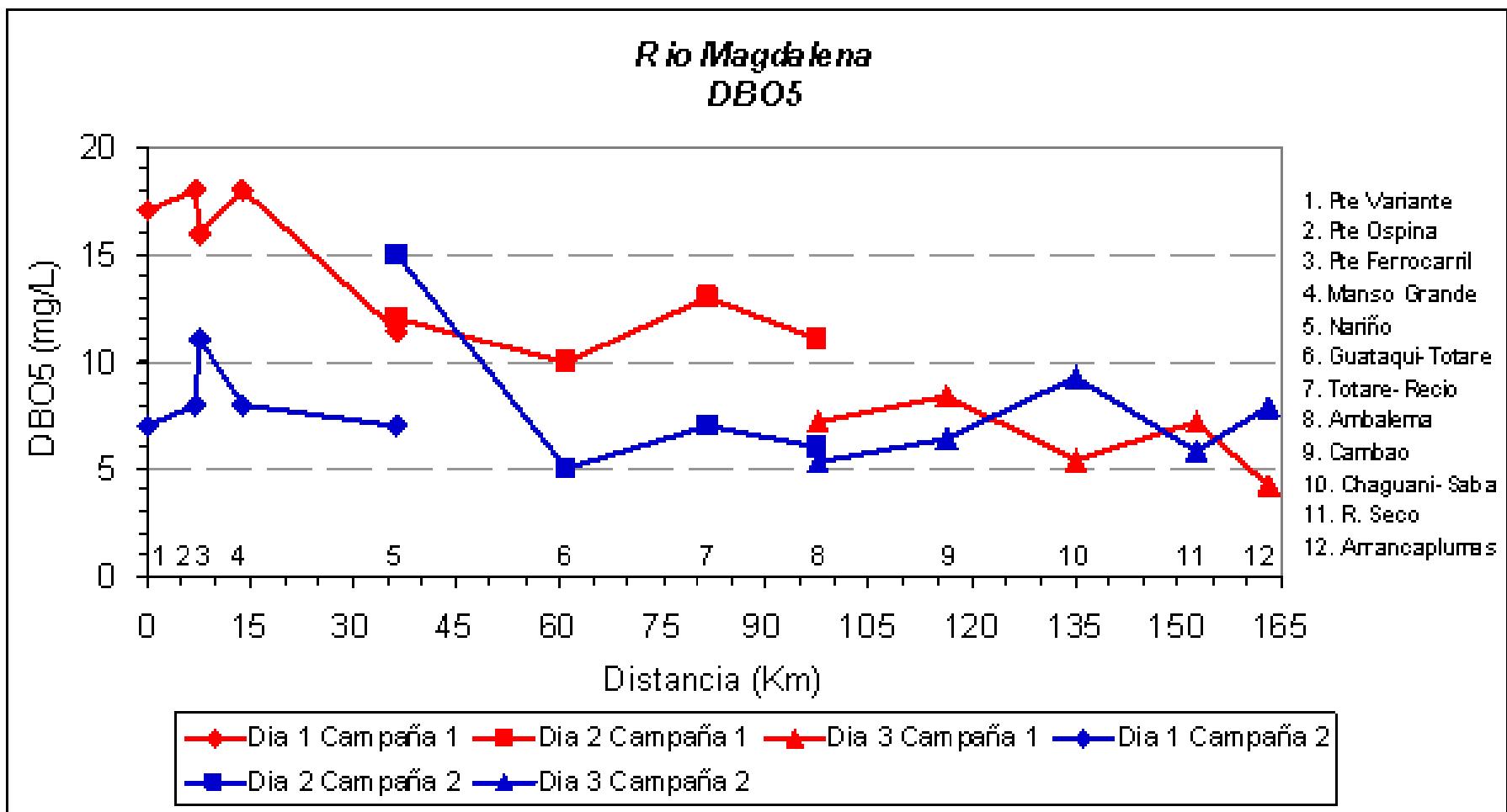
# Campañas 1 y 2 – Coliformes Totales



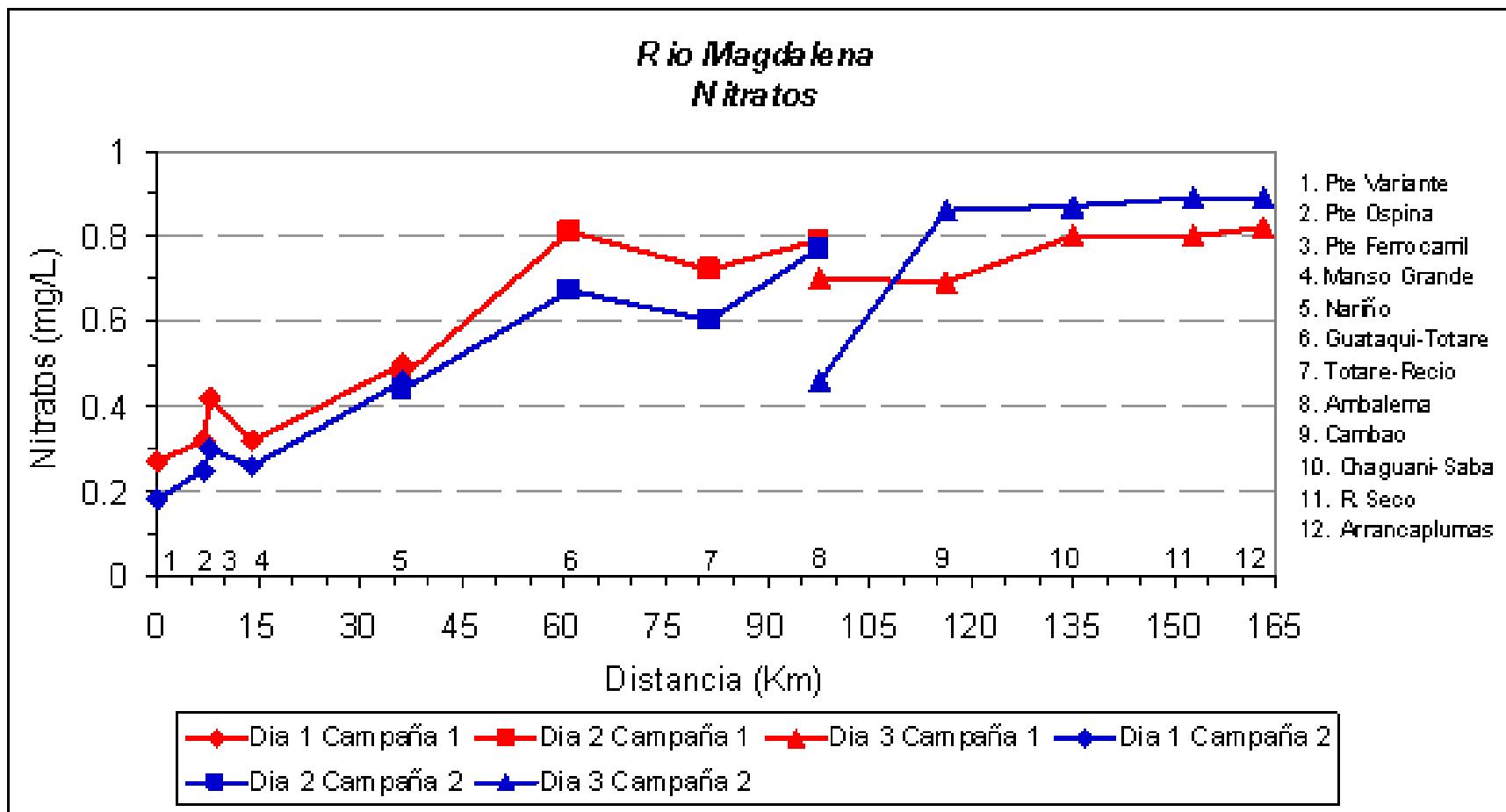
# Campañas 1 y 2 – Oxígeno Disuelto



# Campañas 1 y 2 – DBO

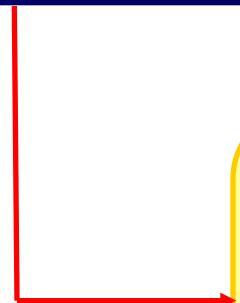


# Campañas 1 y 2 Nitratos



# METODOLOGIA PROPUESTA

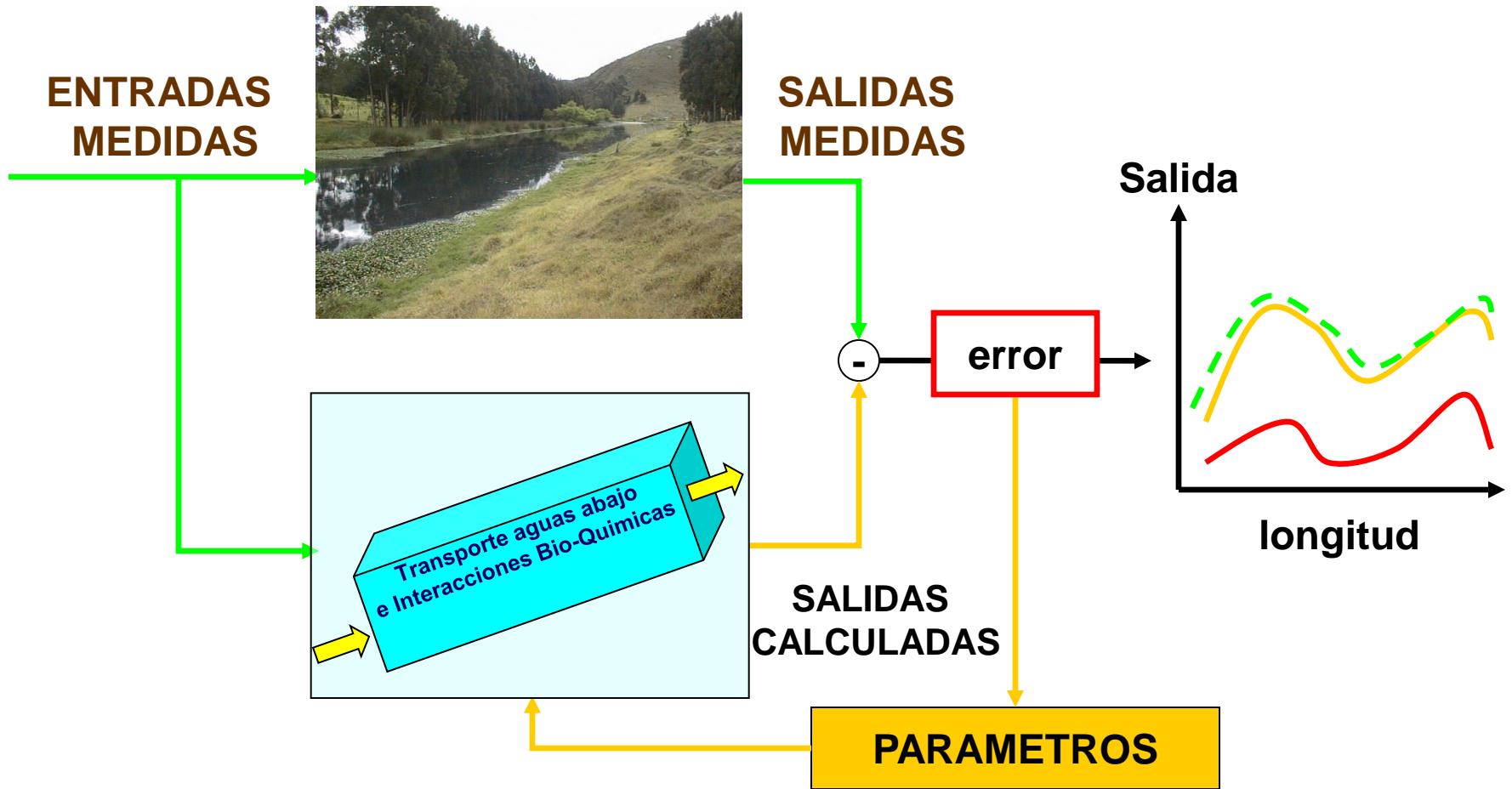
## 7. CALIBRACION Y VERIFICACION DEL MODELO



**MODELO CALIBRADO Y  
VERIFICADO  
PREDICTIVO (LISTO  
PARA REALIZAR  
SIMULACIONES DE  
ESCENARIOS)**



# CALIBRACION



# CALIBRACIÓN

**Son muchos los procesos que interactúan y las heterogeneidades espaciales y temporales que se desconocen**

**Se requiere mayor atención en el proceso de calibración y más cuidado en la proposición de soluciones determinísticas**

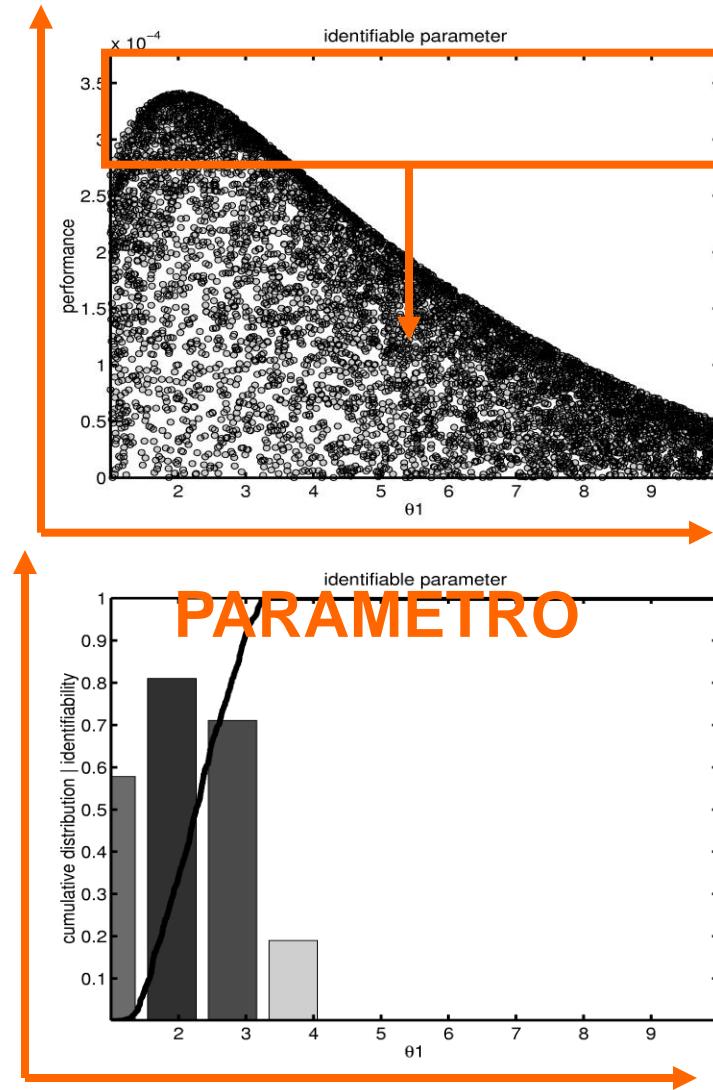
**Se ha vuelto una práctica común incluir límites de confianza con los resultados de los modelos**

**Es necesario y honesto hacer un análisis de incertidumbre**

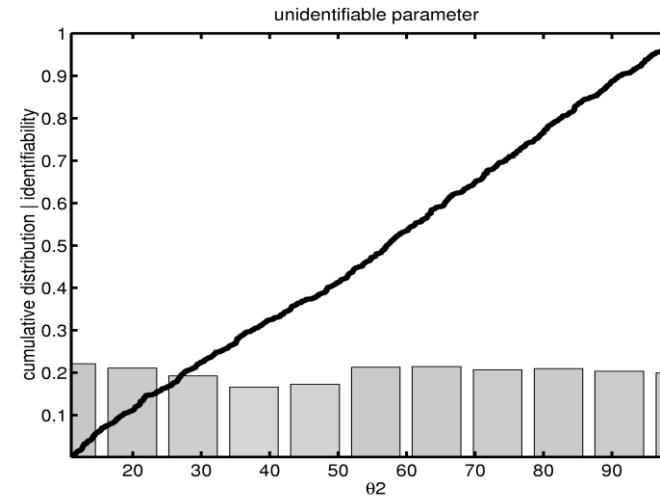
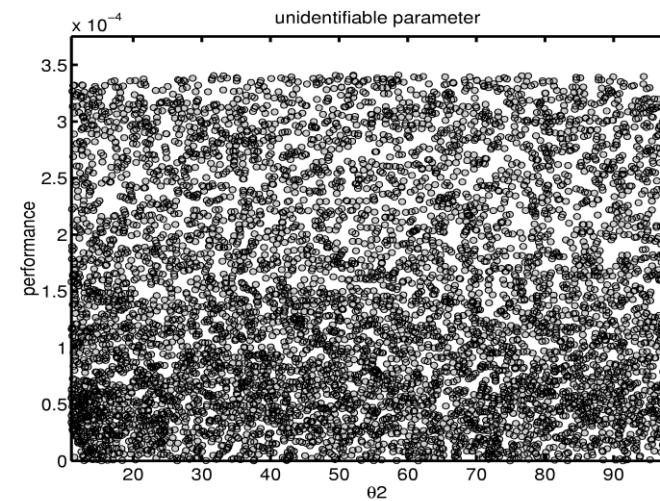
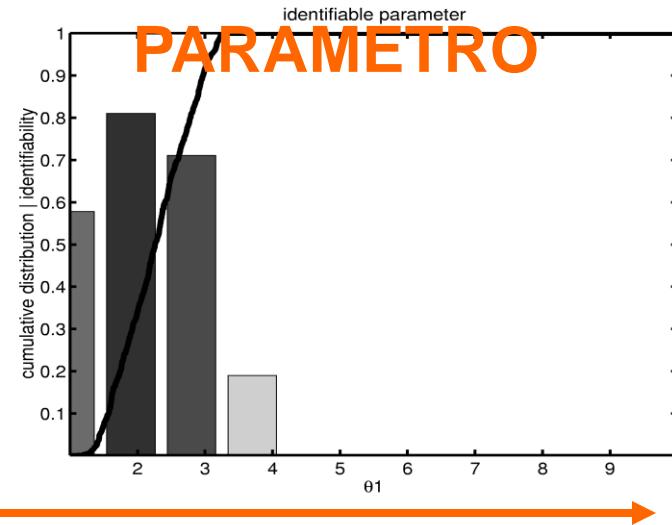


# MEDIDA DE IDENTIFIABILIDAD

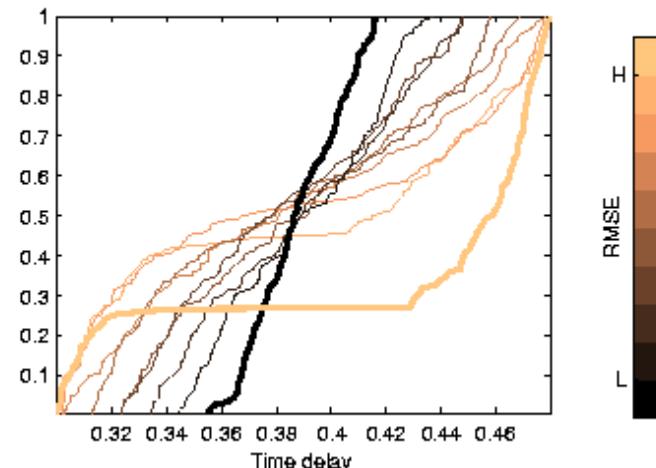
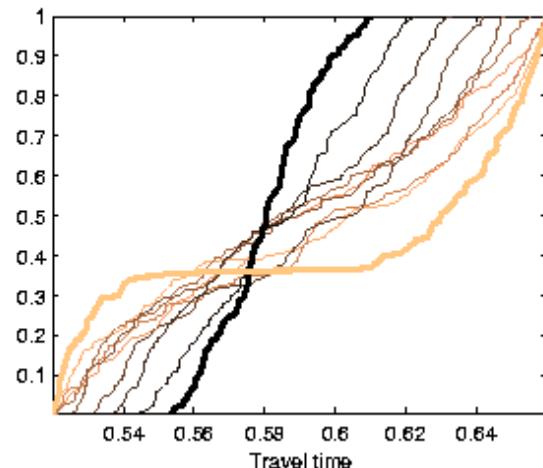
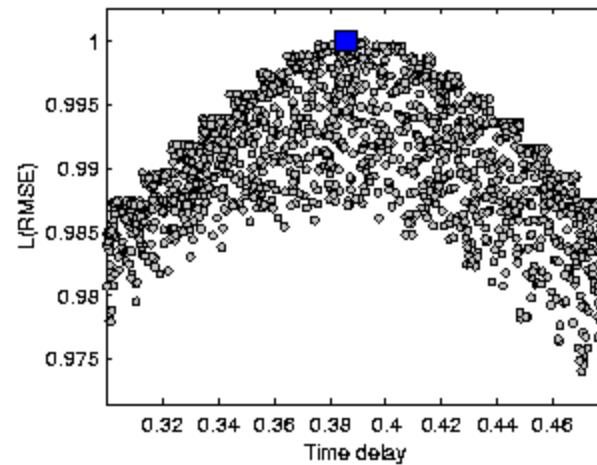
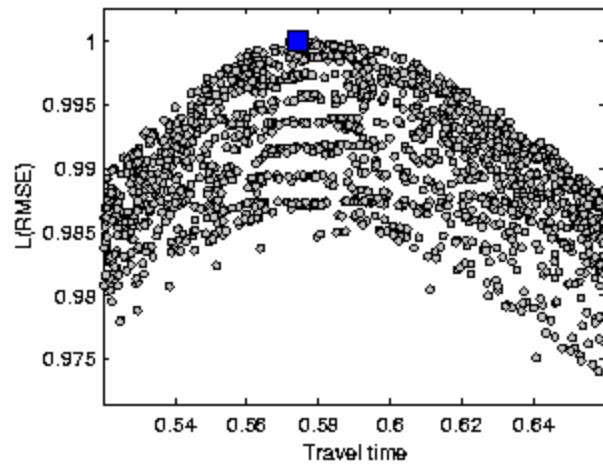
COMPORTAMIENTO  
ACUMULADO



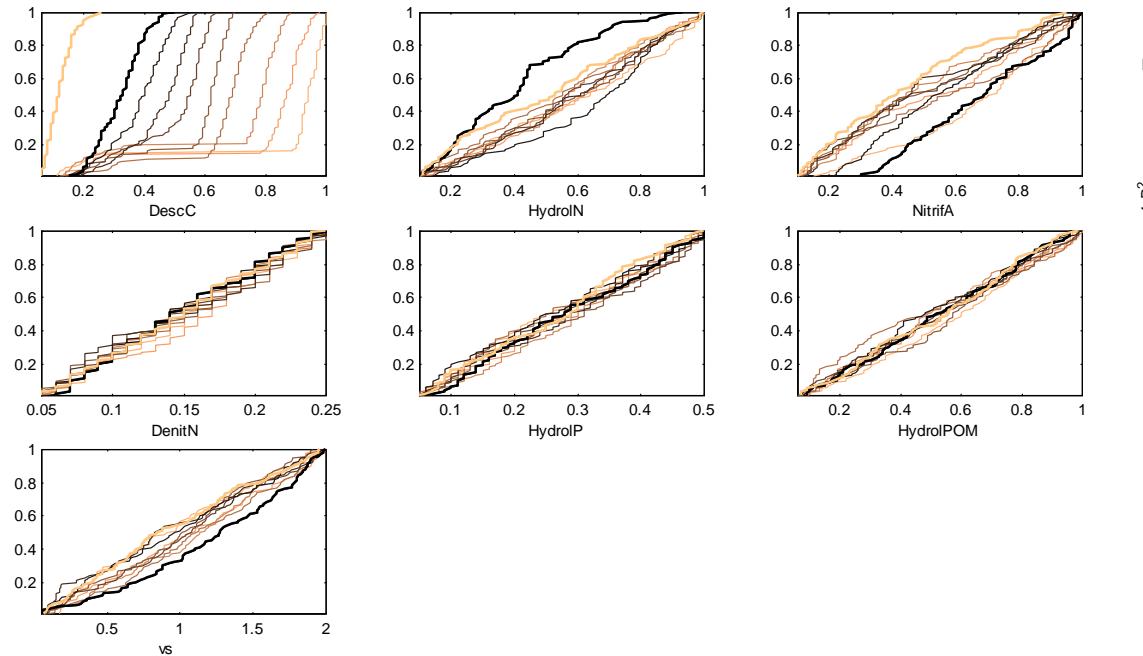
PARAMETRO



# Identificación y sensibilidad modelo de 2 parámetros



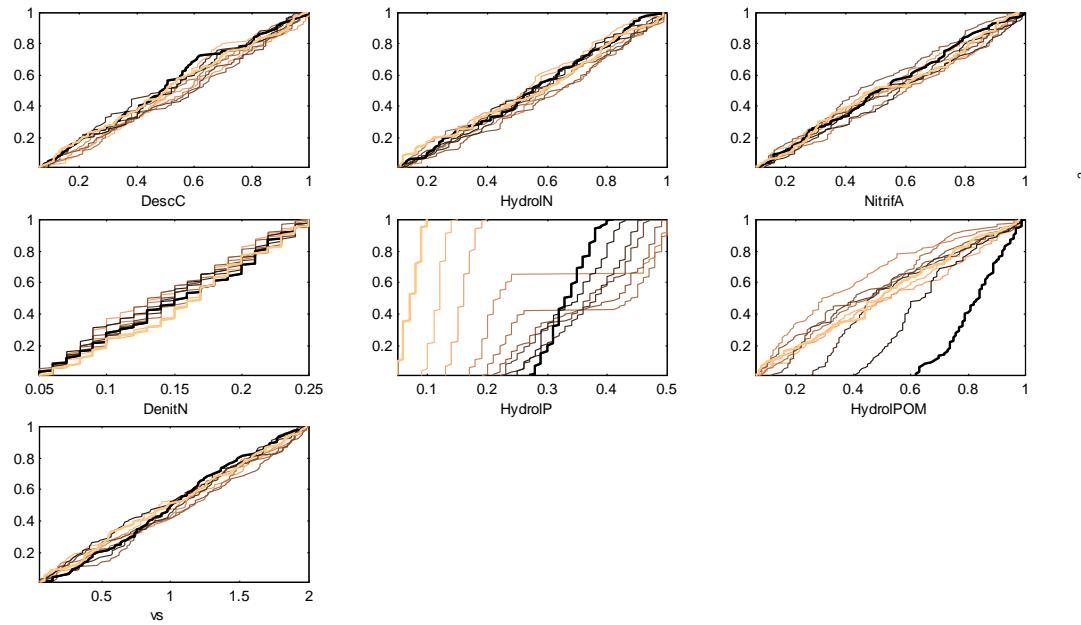
# SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA - GLUE



Función objetivo  
para OD



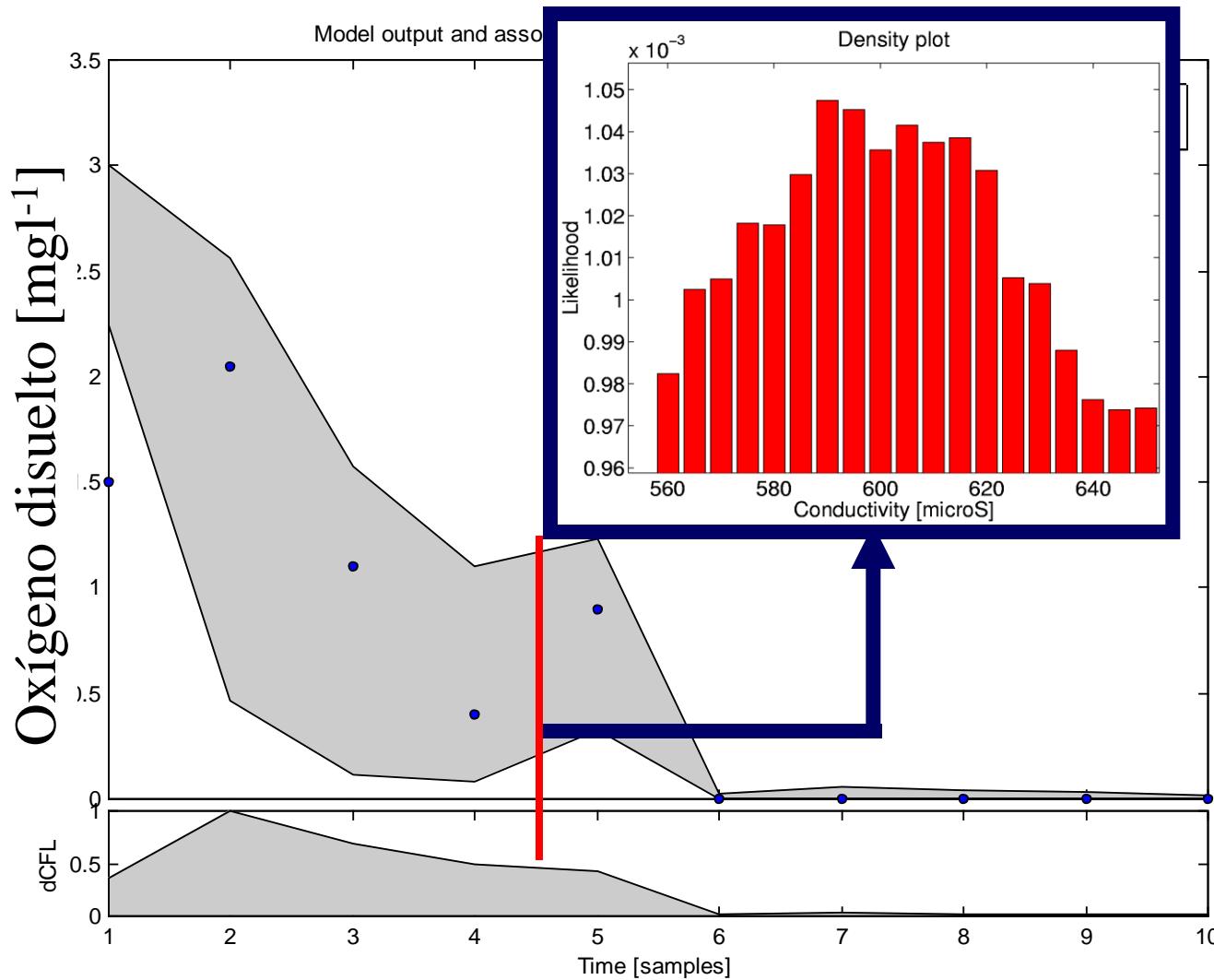
# SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA - GLUE



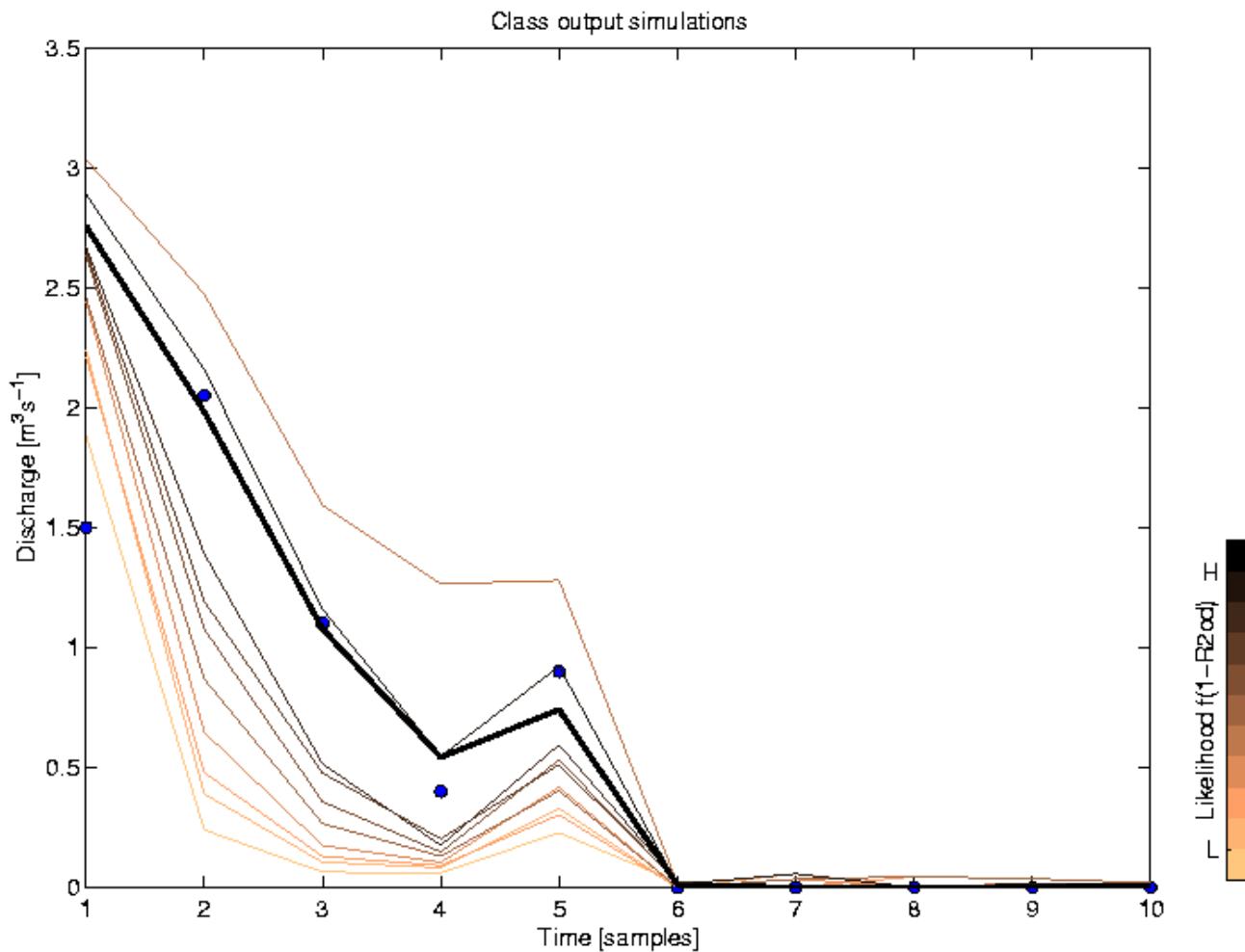
Función objetivo  
para SRP



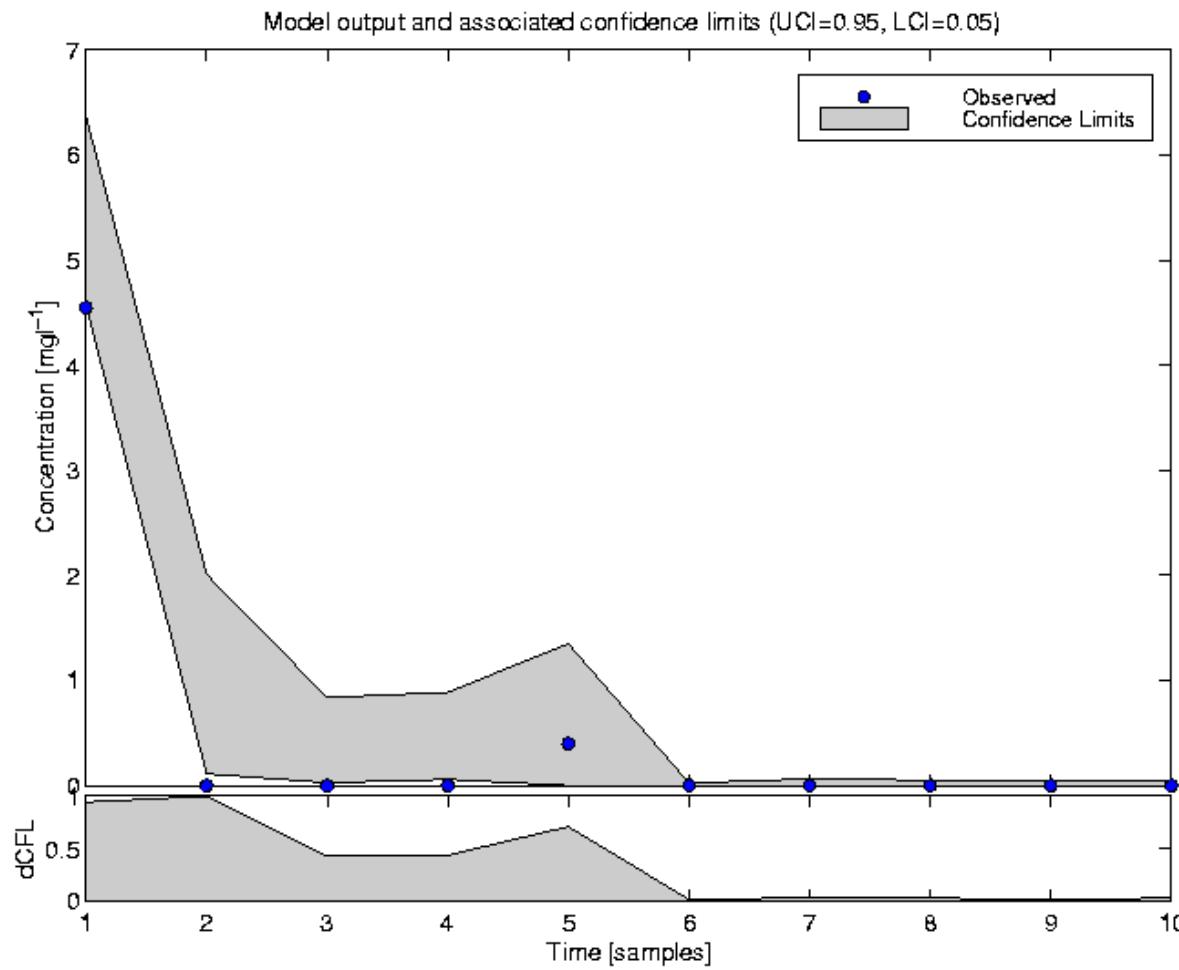
# Banda de incertidumbre GLUE



# CALIBRACIÓN



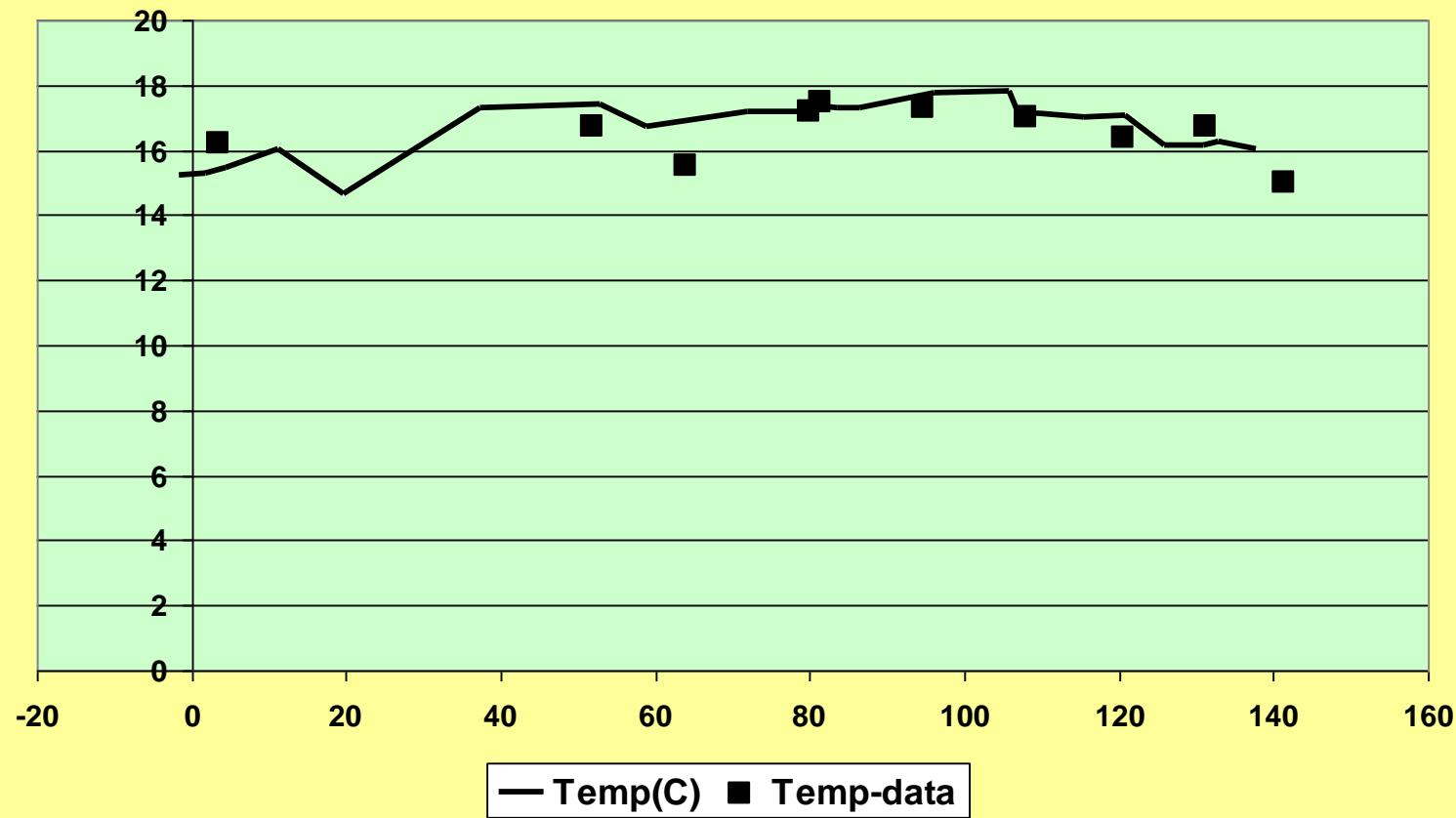
# VERIFICACIÓN



# TEMPERATURA CAMP - 2

Bogotá Tibitoc - Alicachín (8/14/2001)

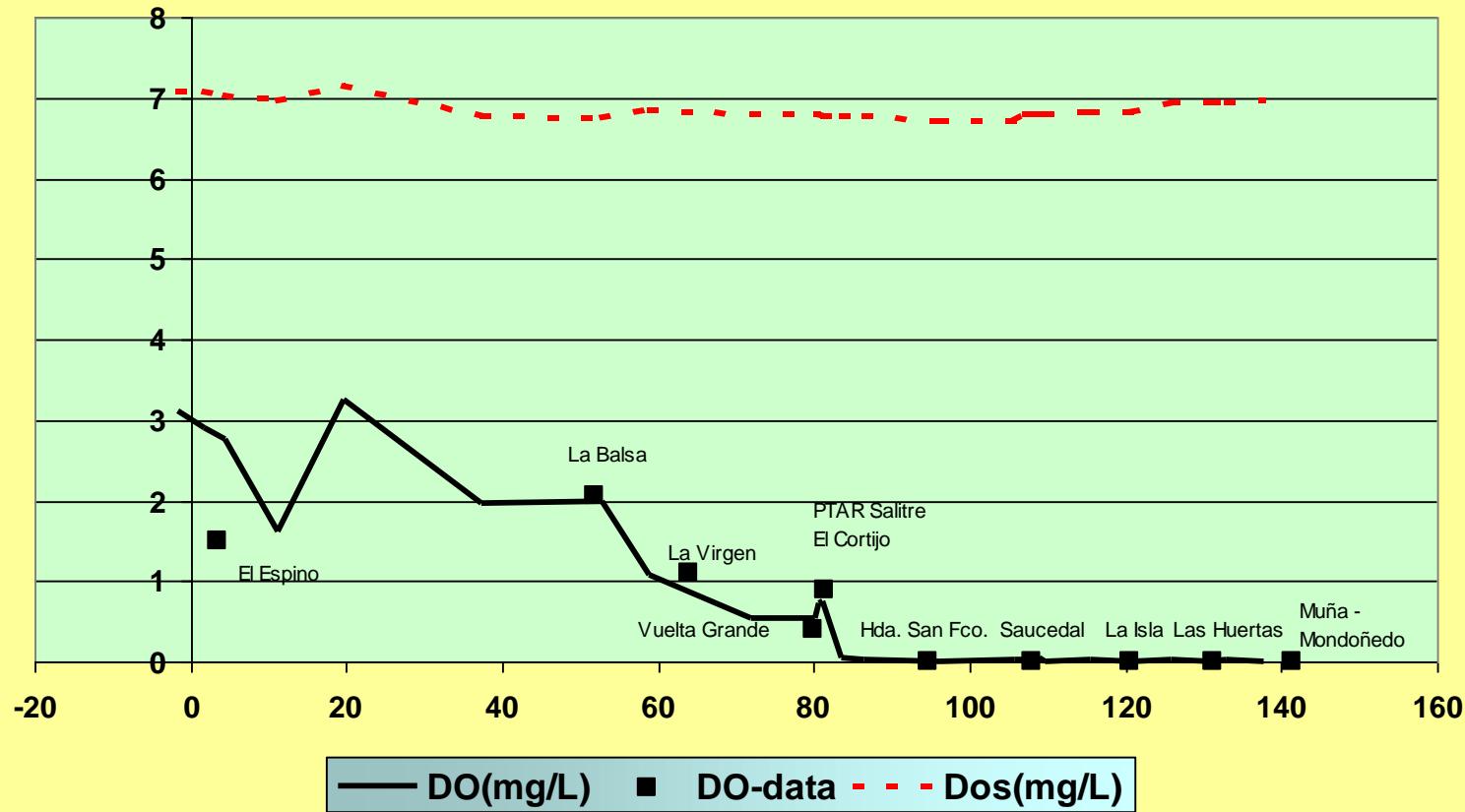
Campaña de Mediciones No. 2



# OXIGENO DISUELTO CAMP - 2

**Bogotá Tibitoc - Alicachín (8/14/2001)**

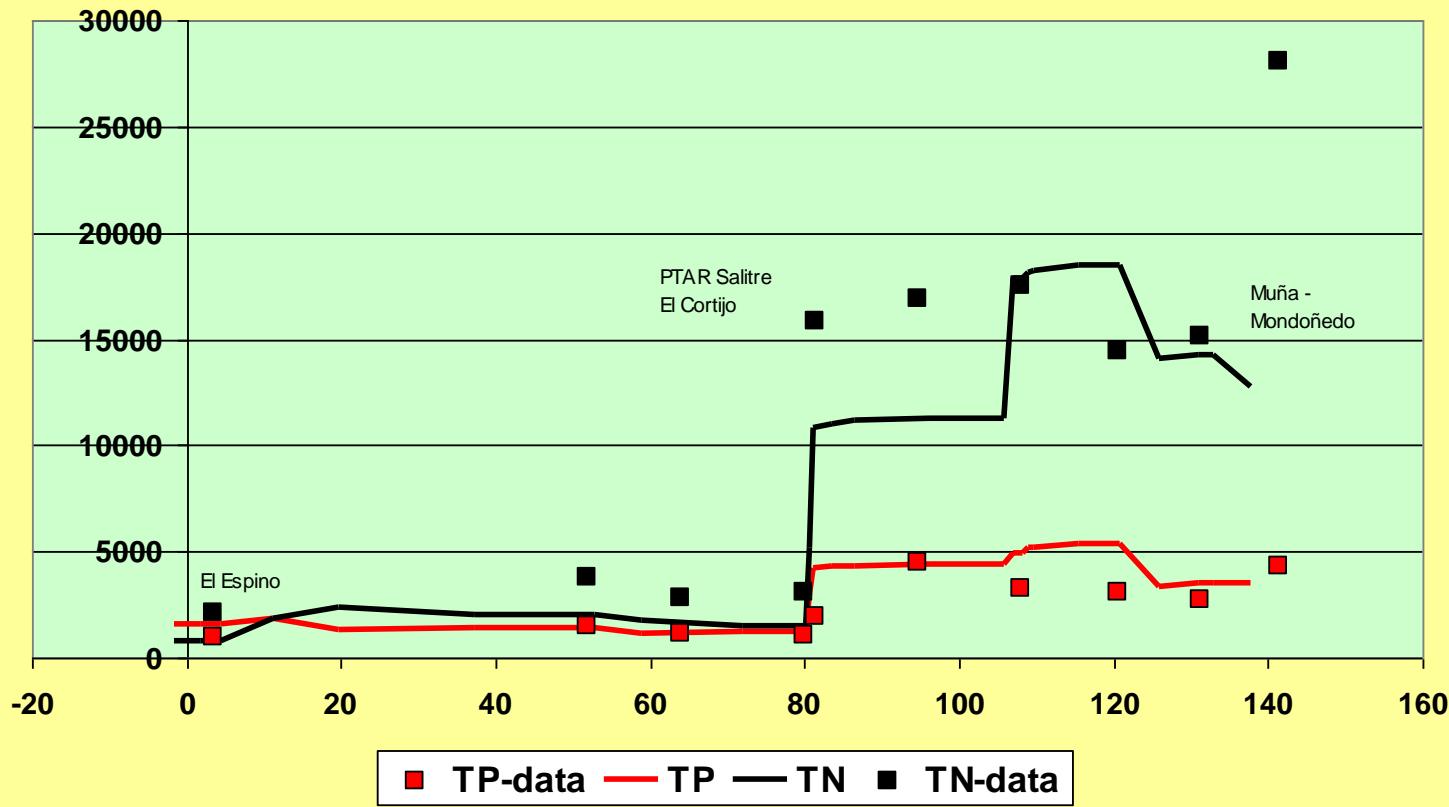
Campaña de Mediciones No. 2



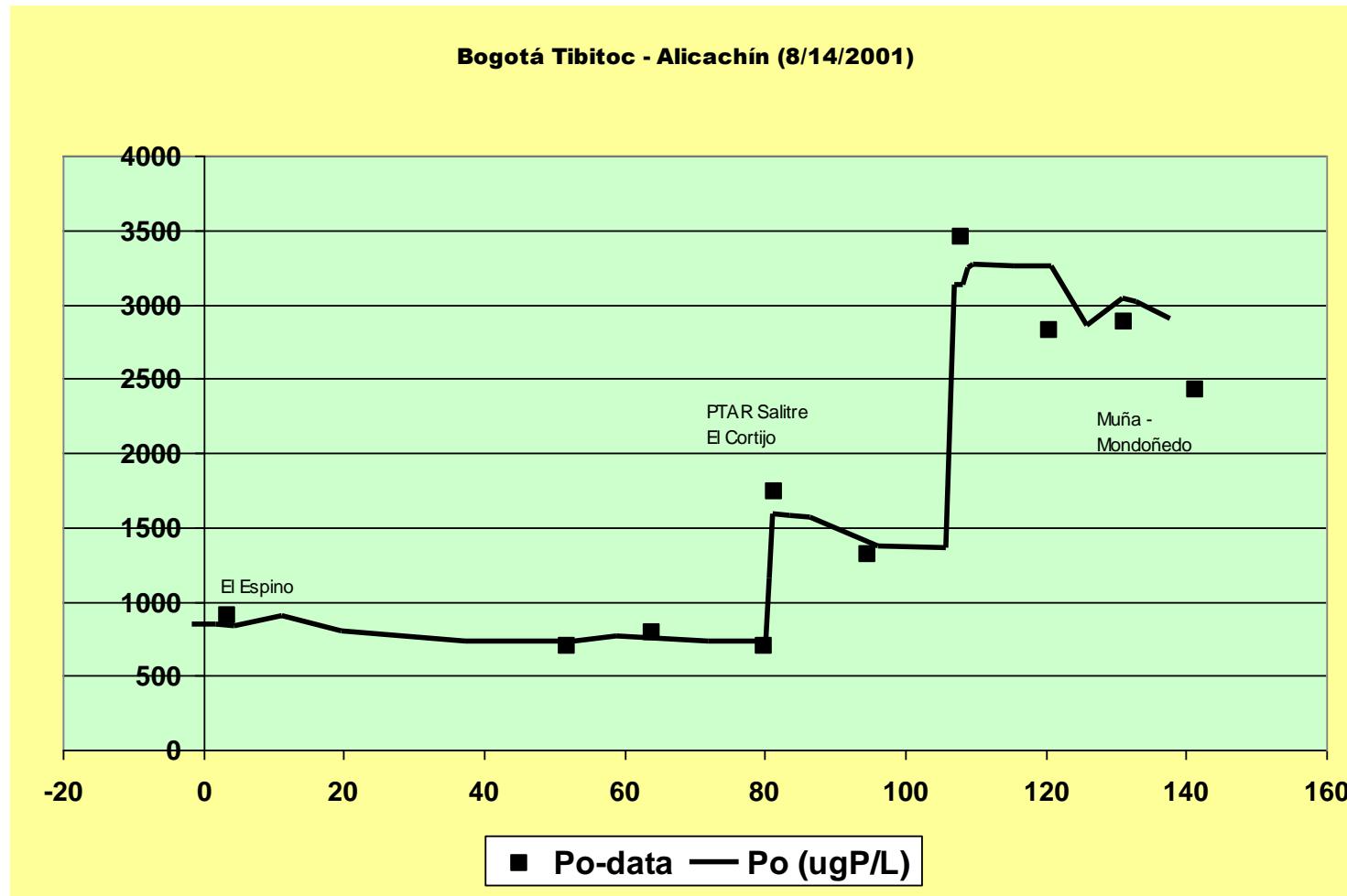
# TN Y TP CAMP - 2

**Bogotá Tibitoc - Alicachín (8/14/2001)**

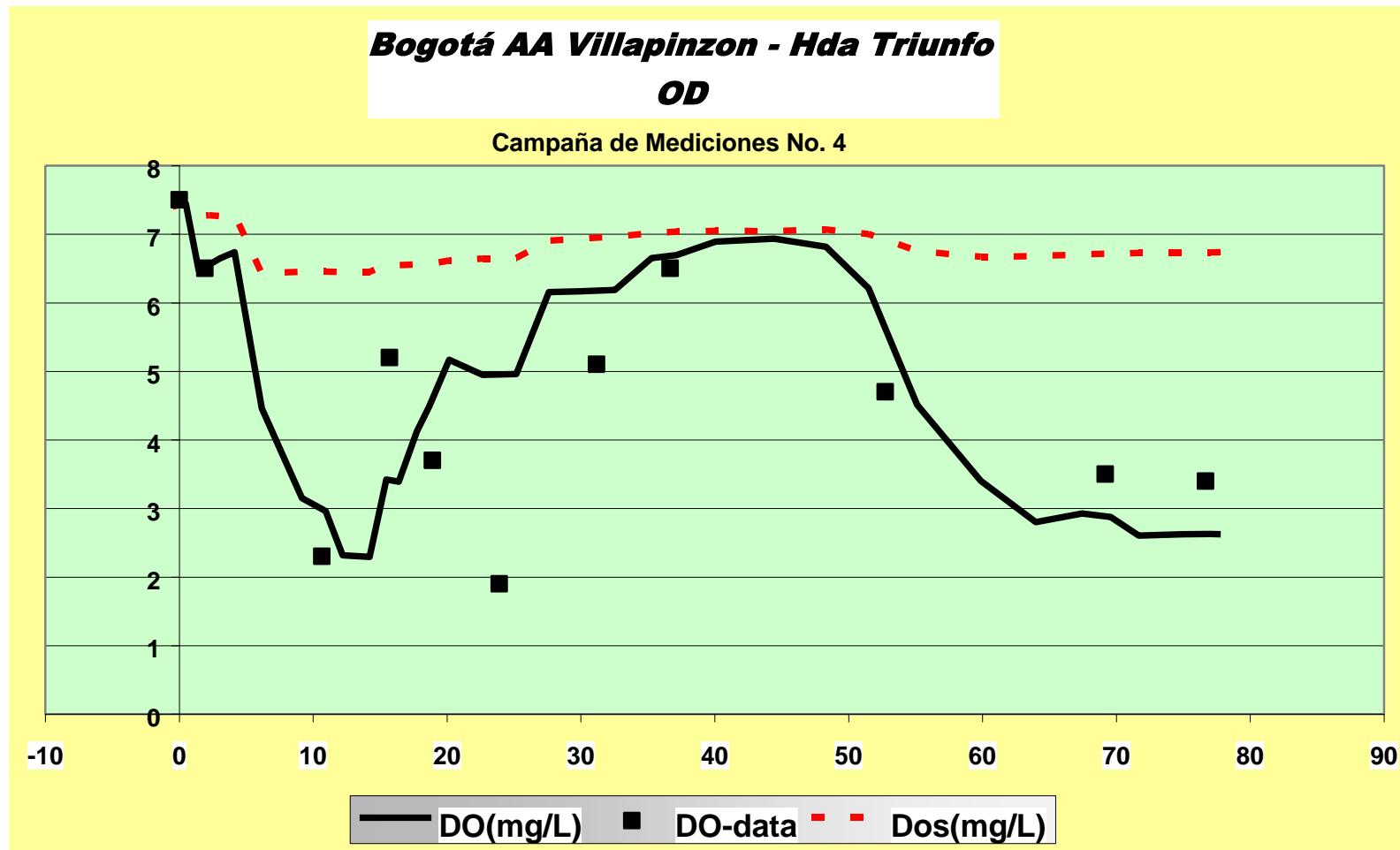
Campaña de Mediciones No. 2



# FOSFORO ORGANICO CAMP - 2

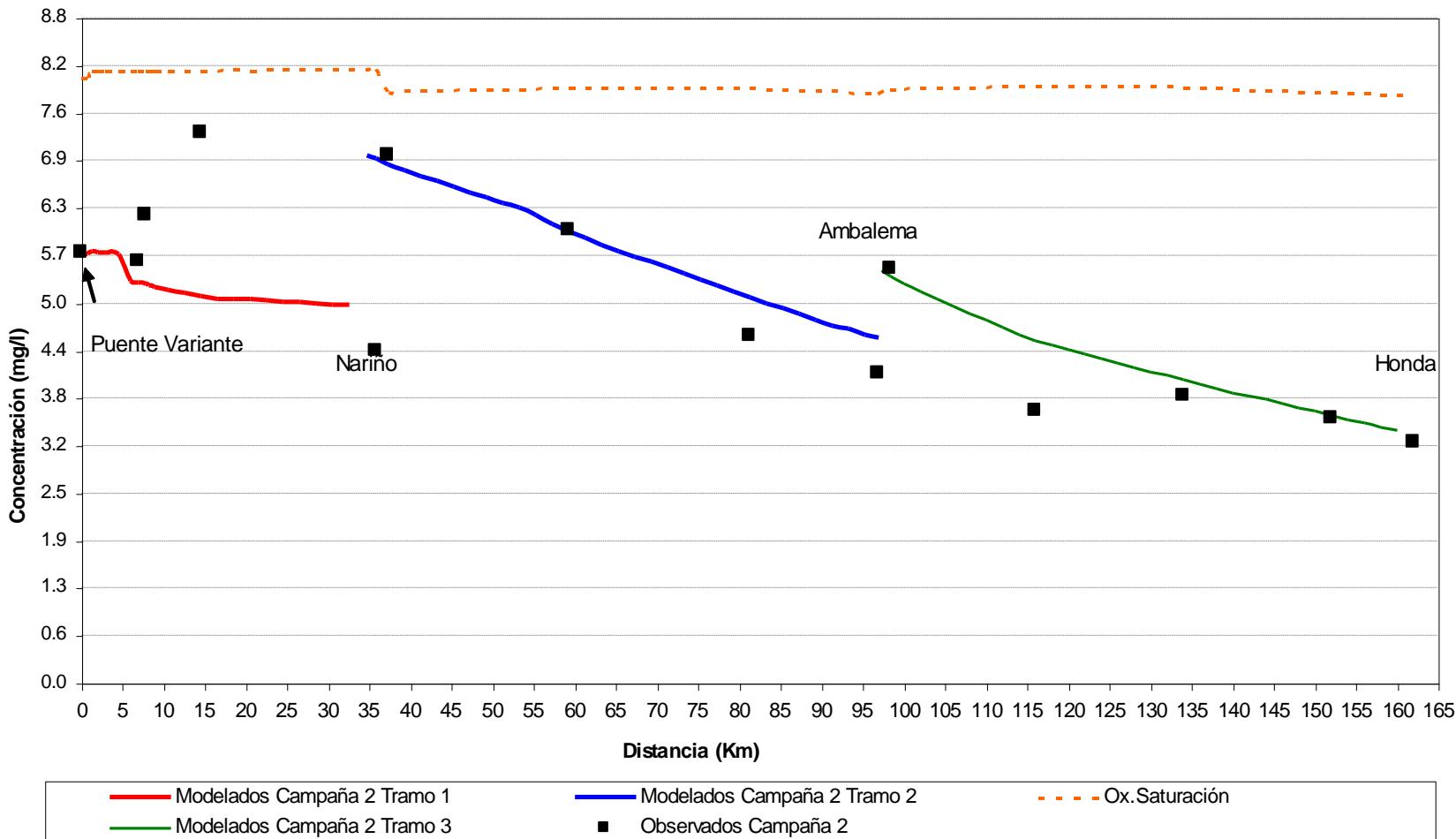


# VERIFICACION CAMPAÑA 4 CUENCA ALTA



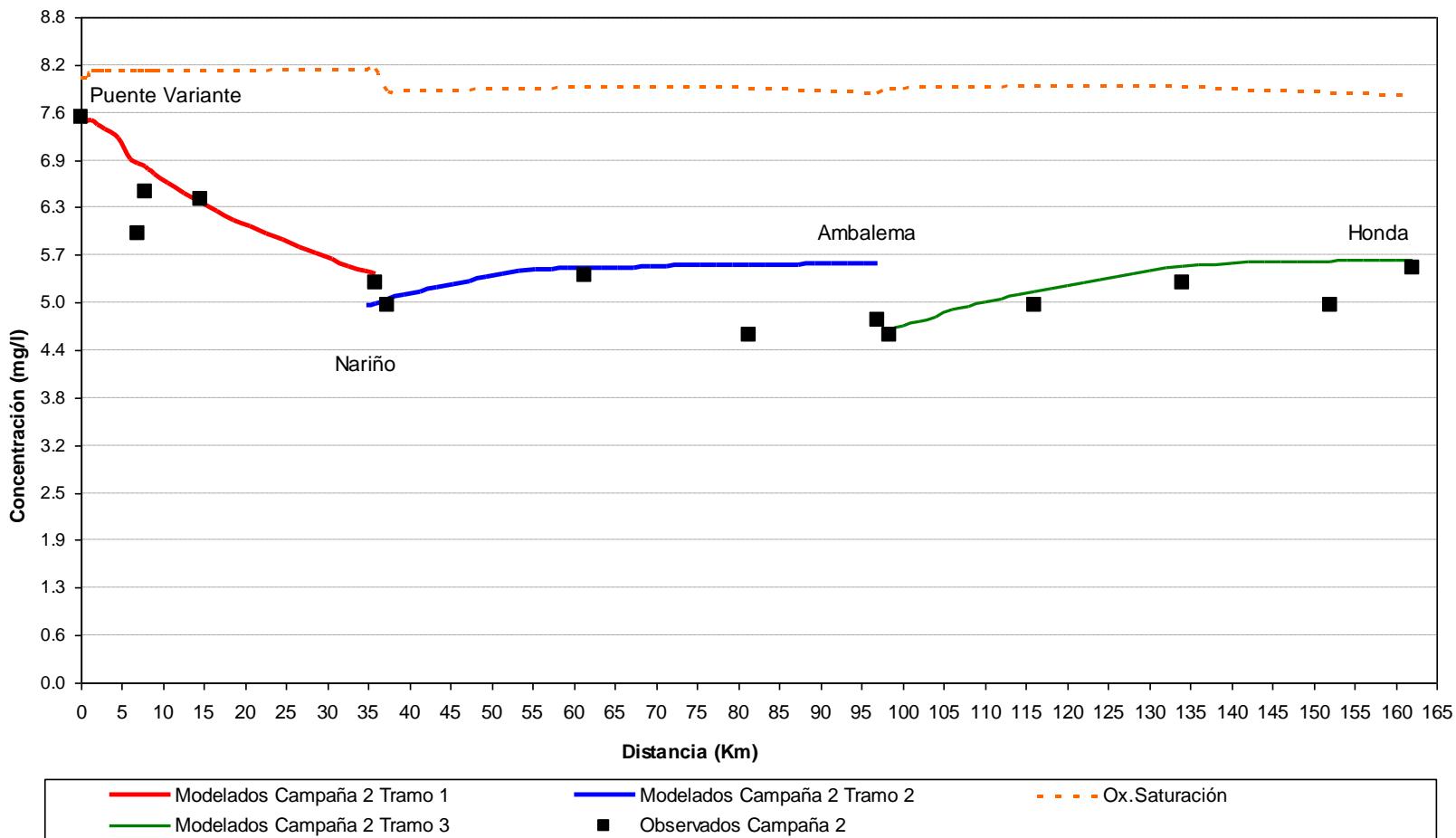
# Oxígeno disuelto C1 RM

## RESULTADOS DE CALIBRACIÓN CAMPAÑA1 Río Magdalena Girardot - Honda Oxígeno Disuelto



# Oxígeno disuelto C2 RM

## RESULTADOS DE CALIBRACIÓN CAMPAÑA 2 Río Magdalena Girardot - Honda Oxígeno Disuelto

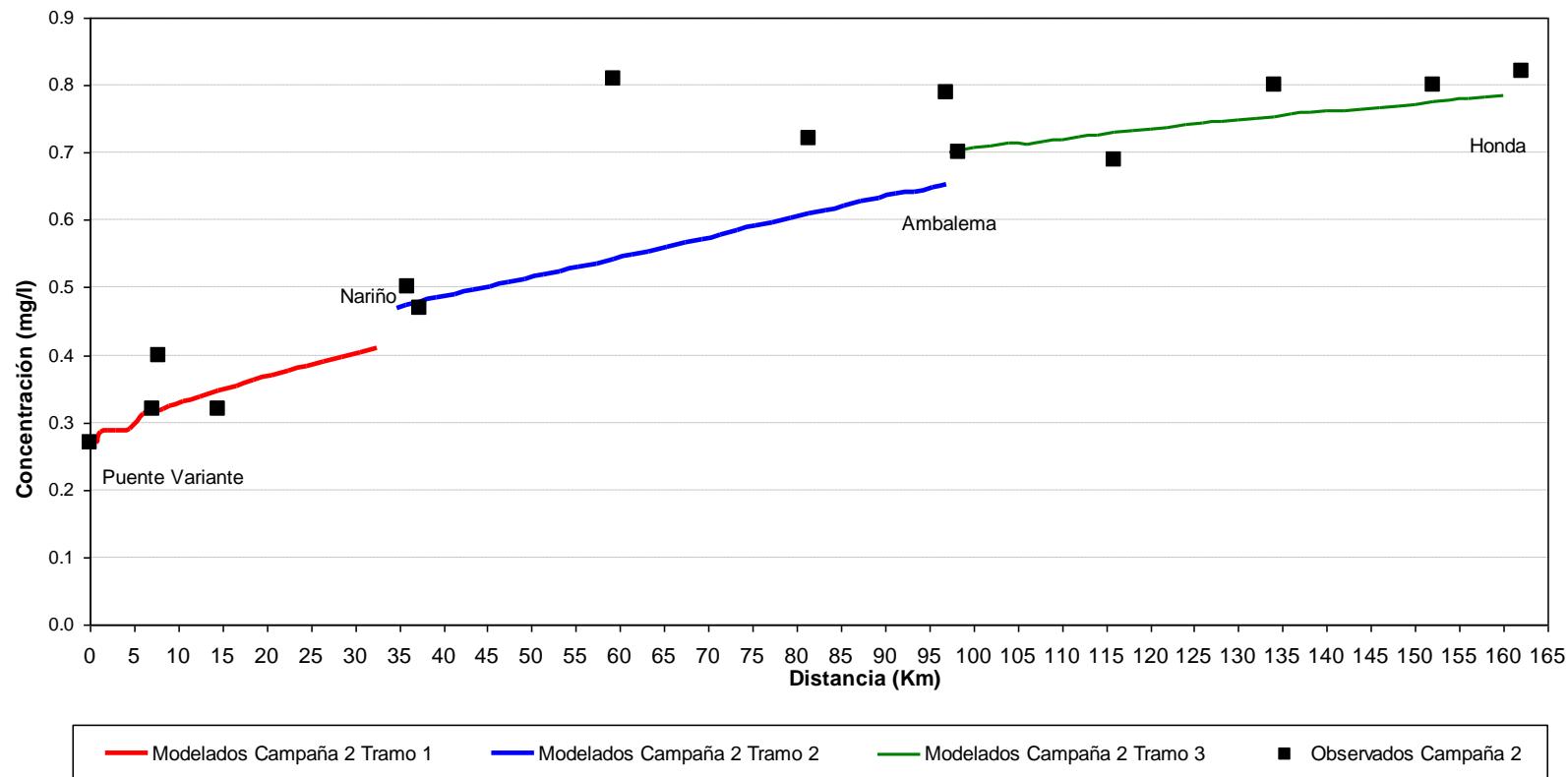


# Nitratos C1 RM

## RESULTADOS CALIBRACIÓN CAMPAÑA 1

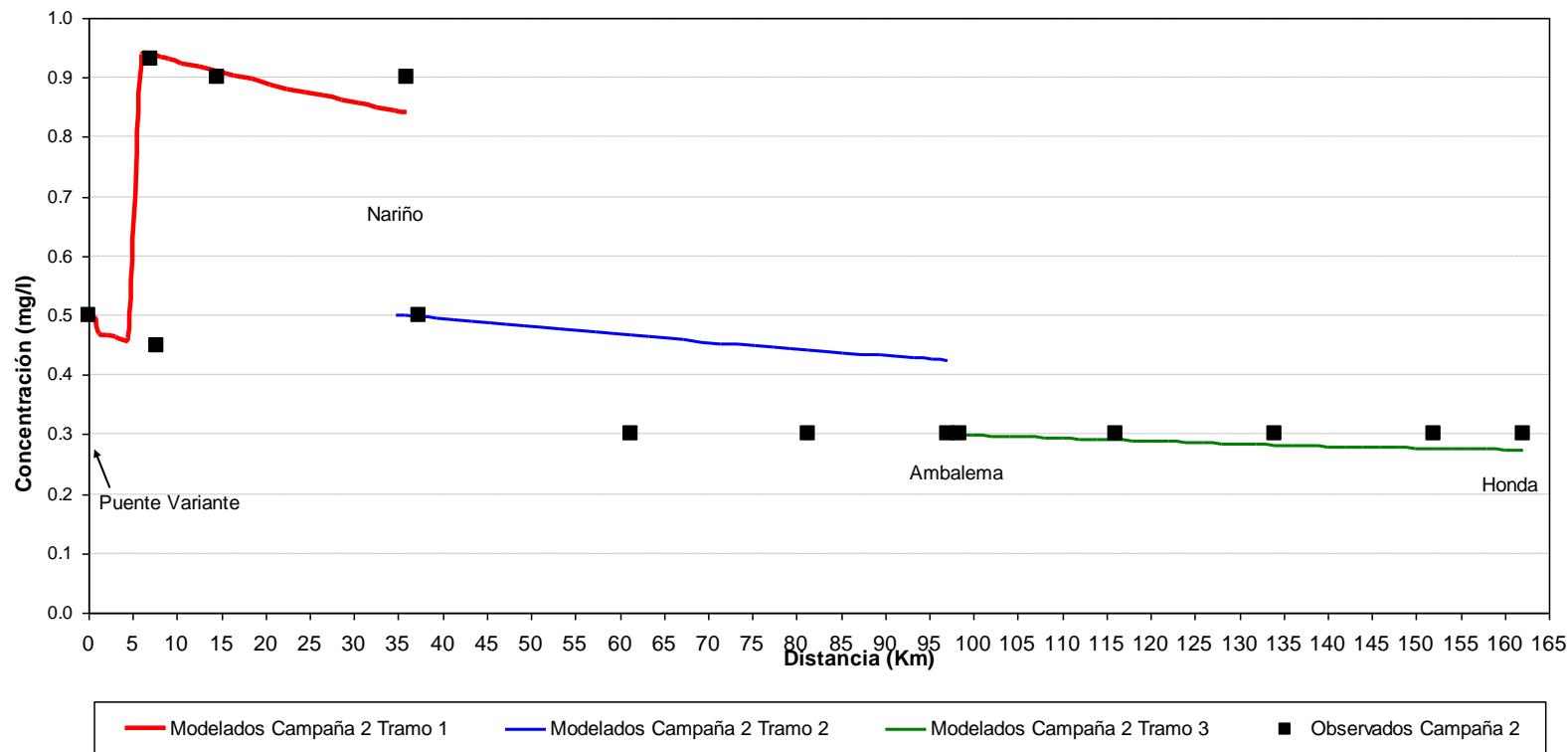
Río Magdalena Girardot - Honda

Nitratos



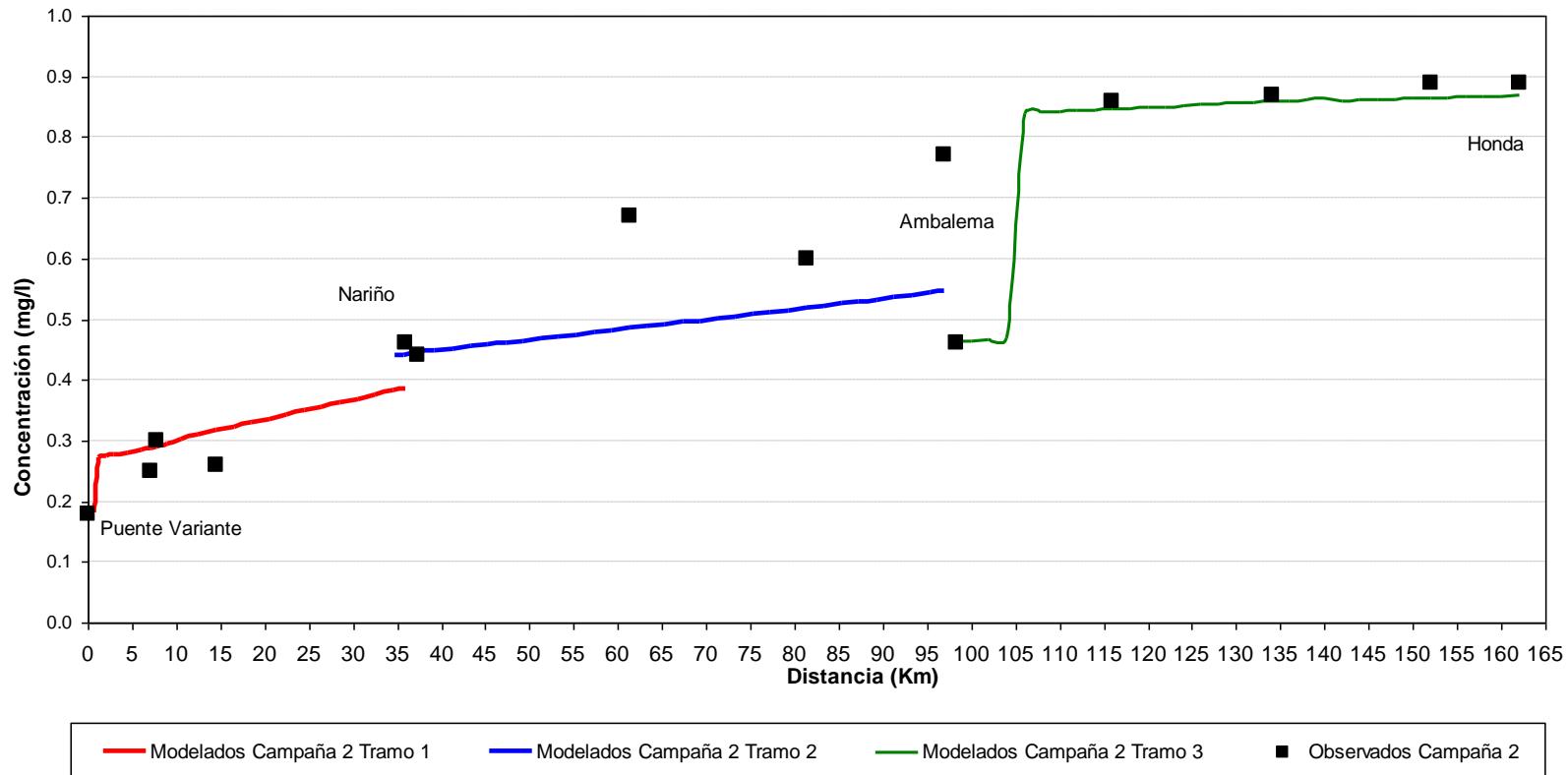
# Amonio C2 RM

## RESULTADOS CALIBRACIÓN CAMPAÑA 2 Río Magdalena Girardot - Honda Amonio



# Nitratos C1 RM

## RESULTADOS CALIBRACIÓN CAMPAÑA 2 Río Magdalena Girardot - Honda Nitratos

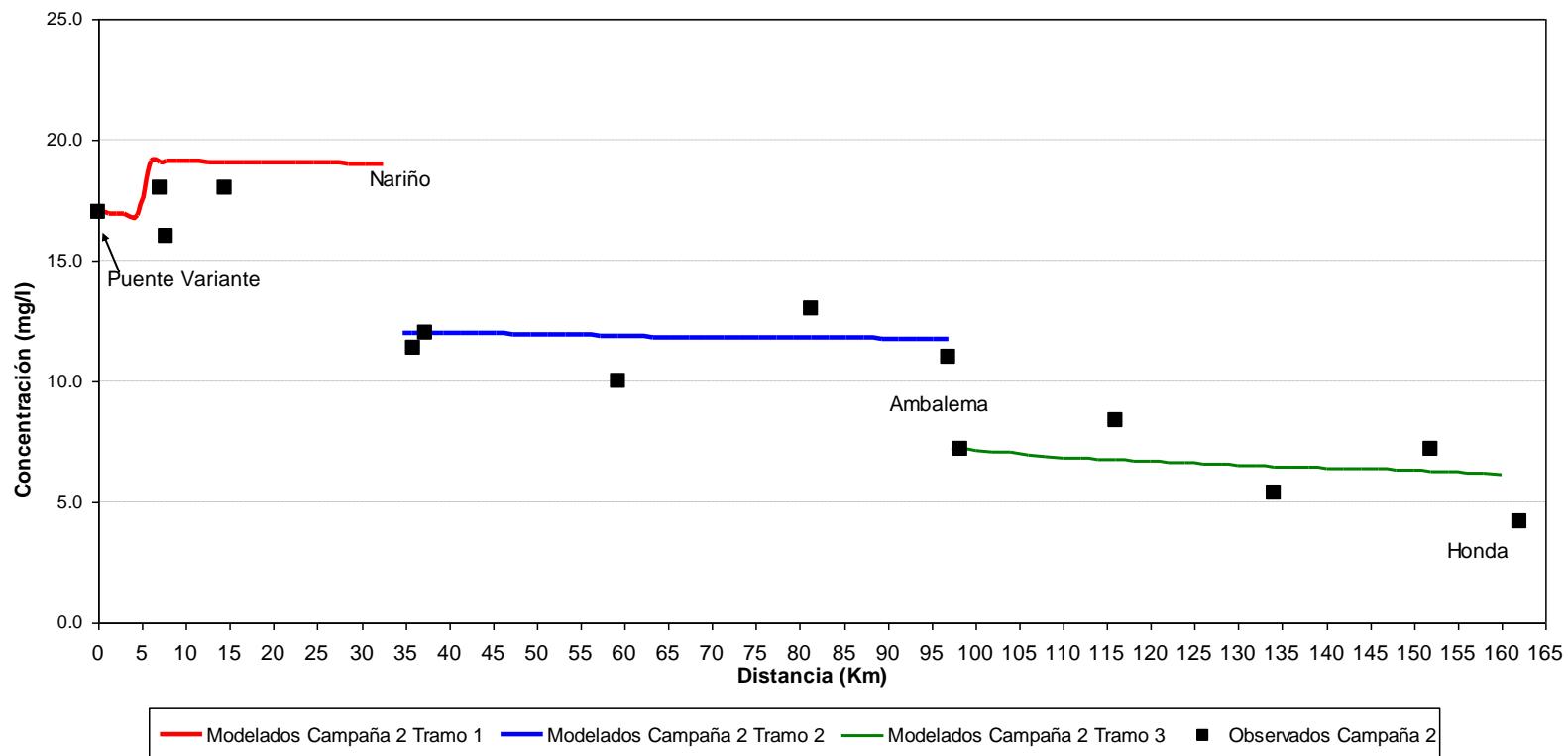


# DBO C1 RM

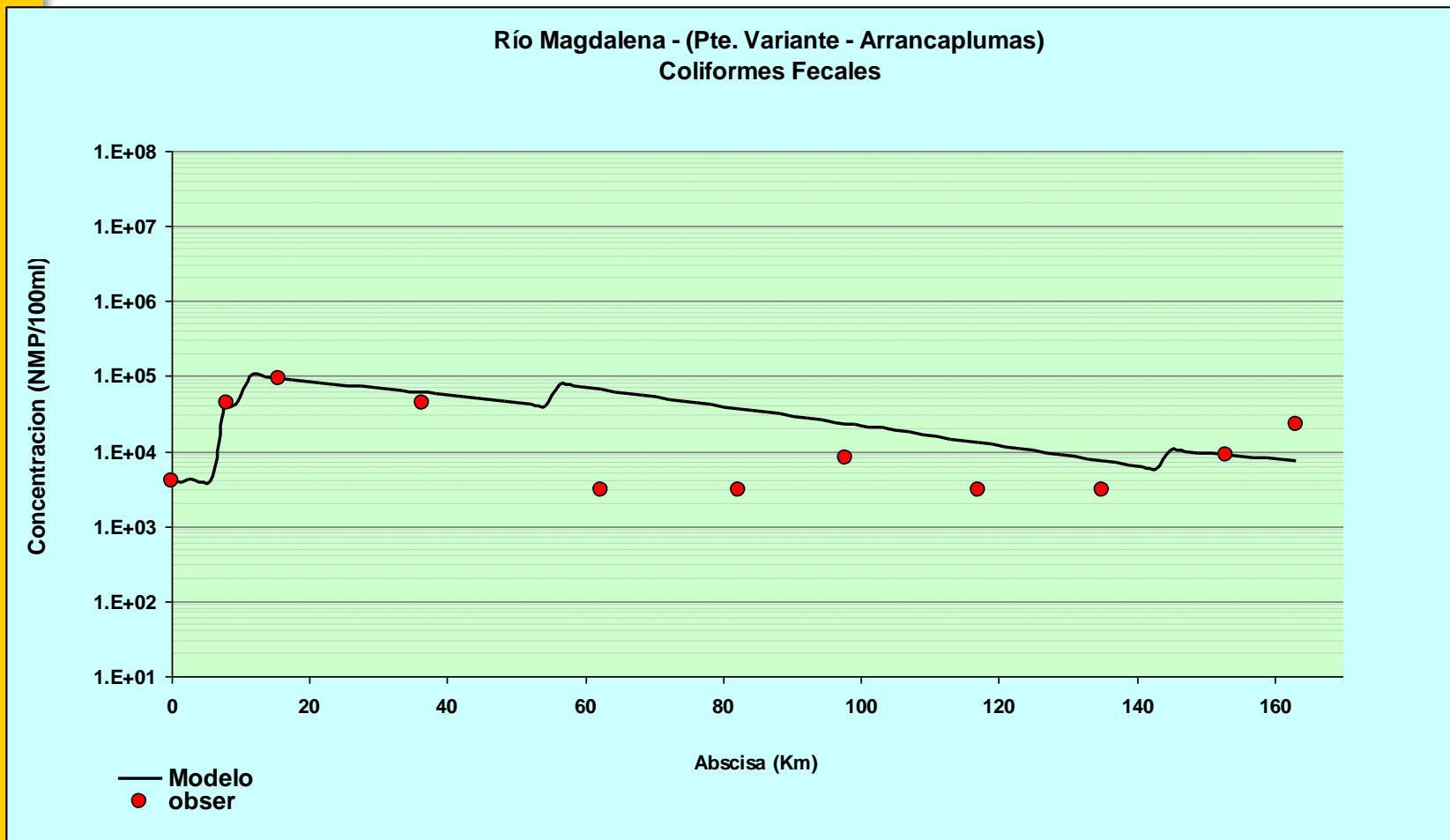
## RESULTADOS DE CALIBRACIÓN CAMPAÑA 1

Río Magdalena Girardot - Honda

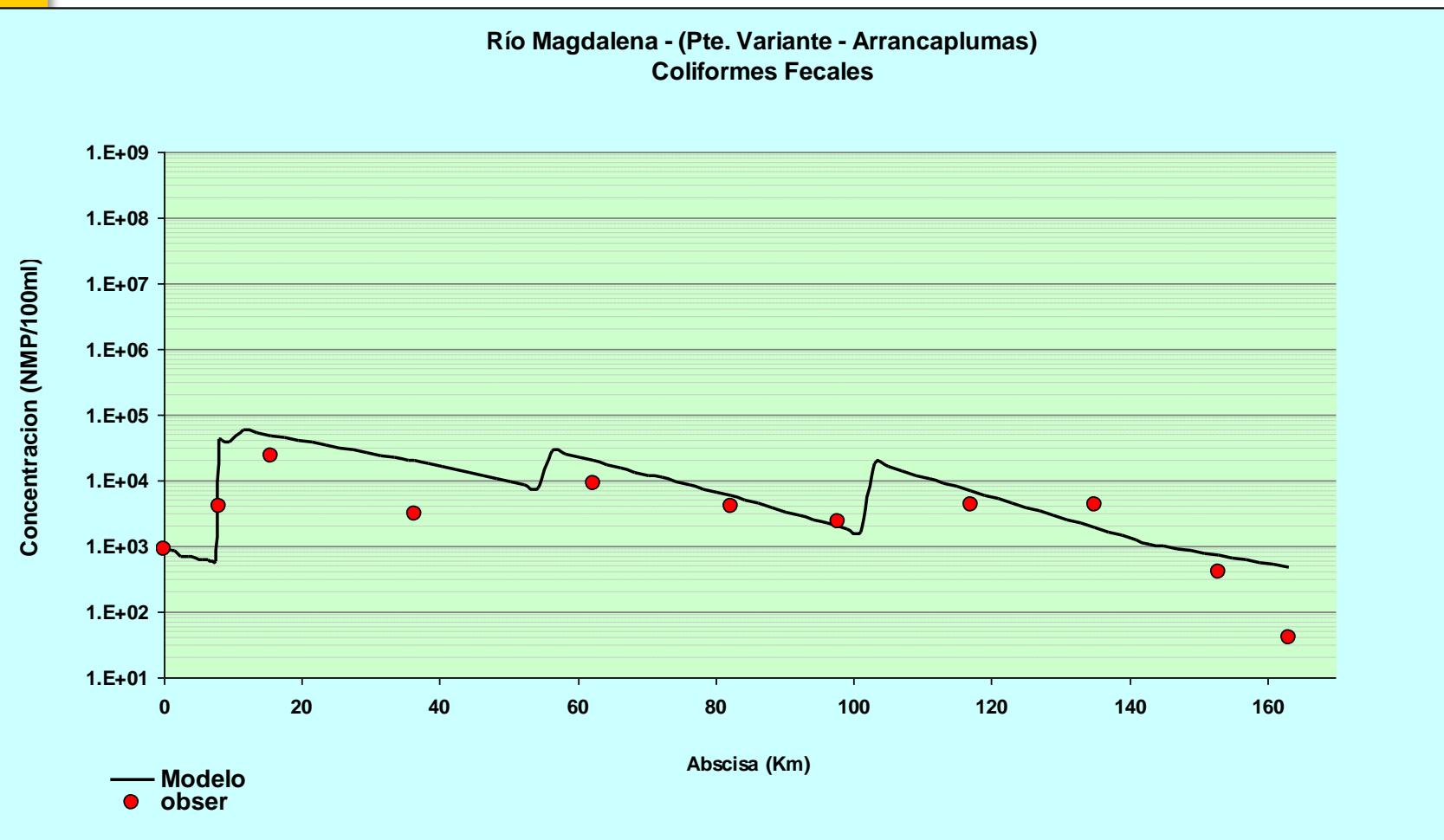
DBO



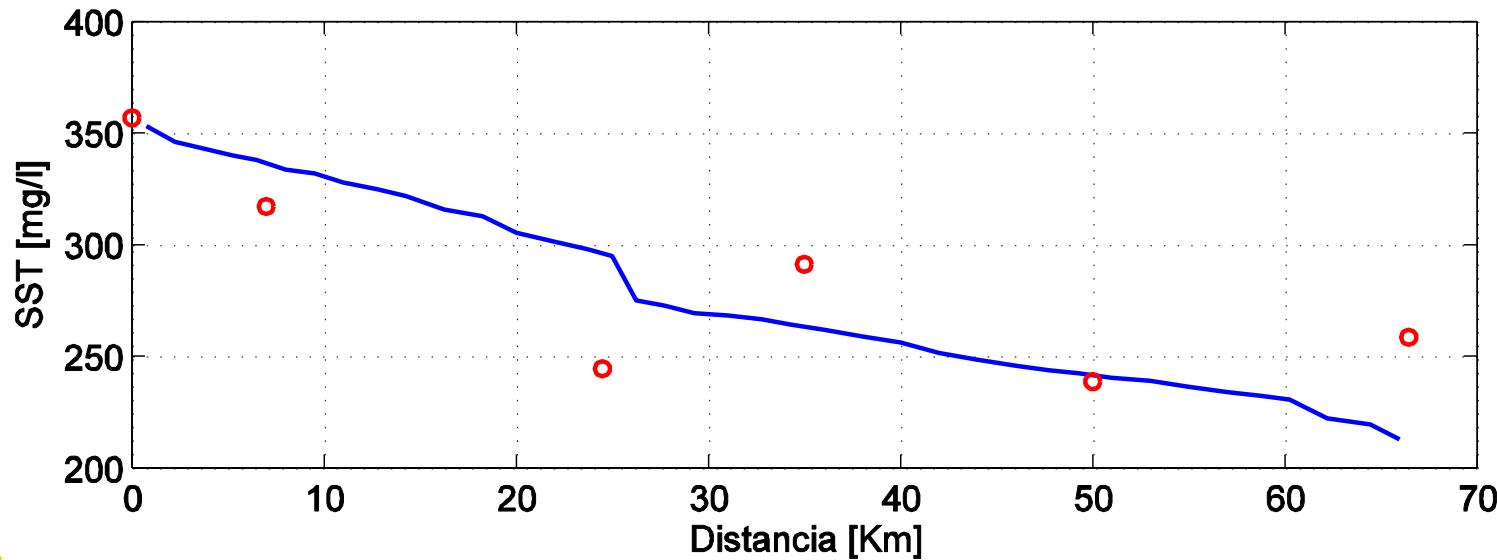
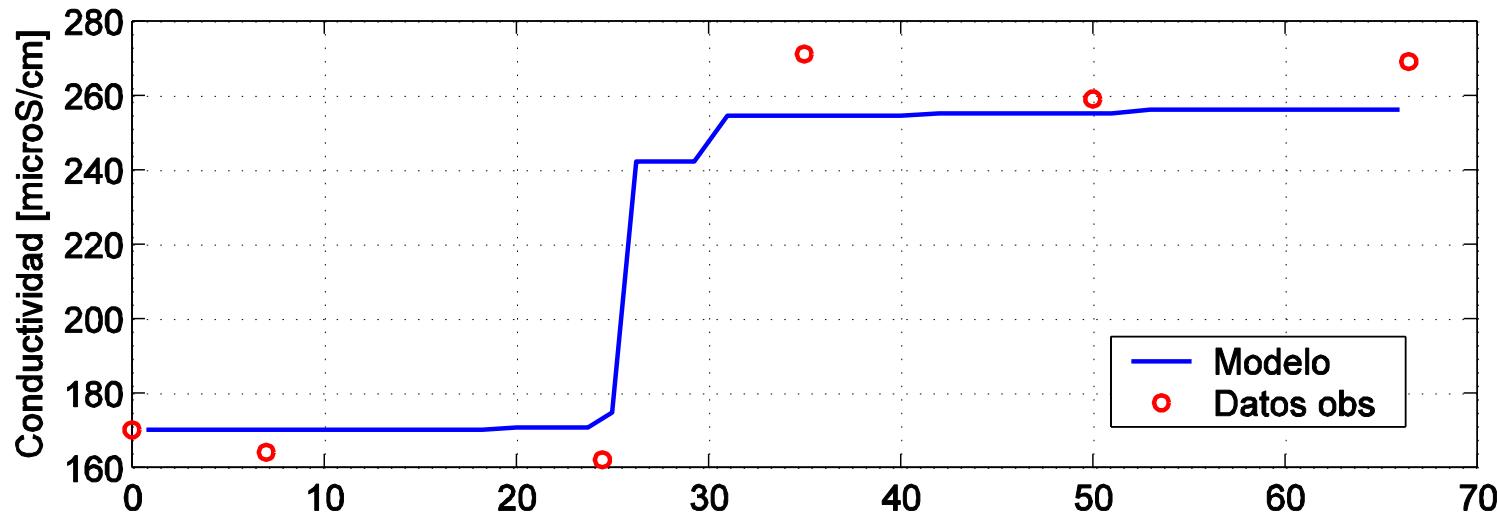
# Coliformes Fecales C1 - RM



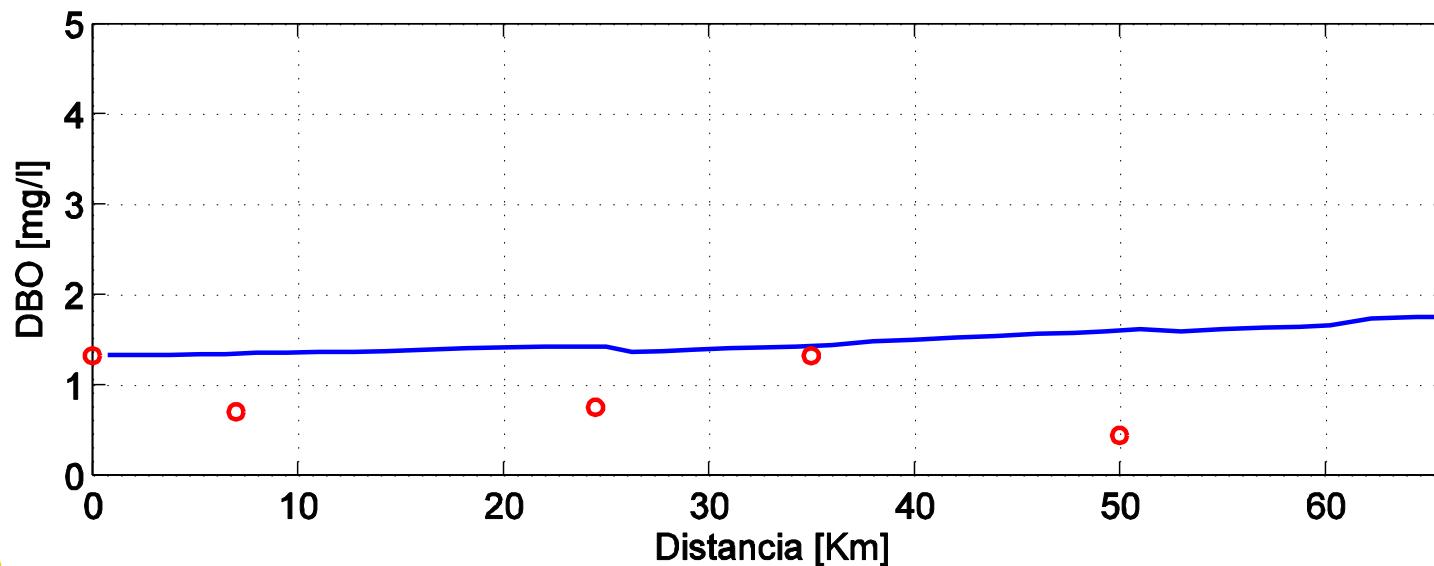
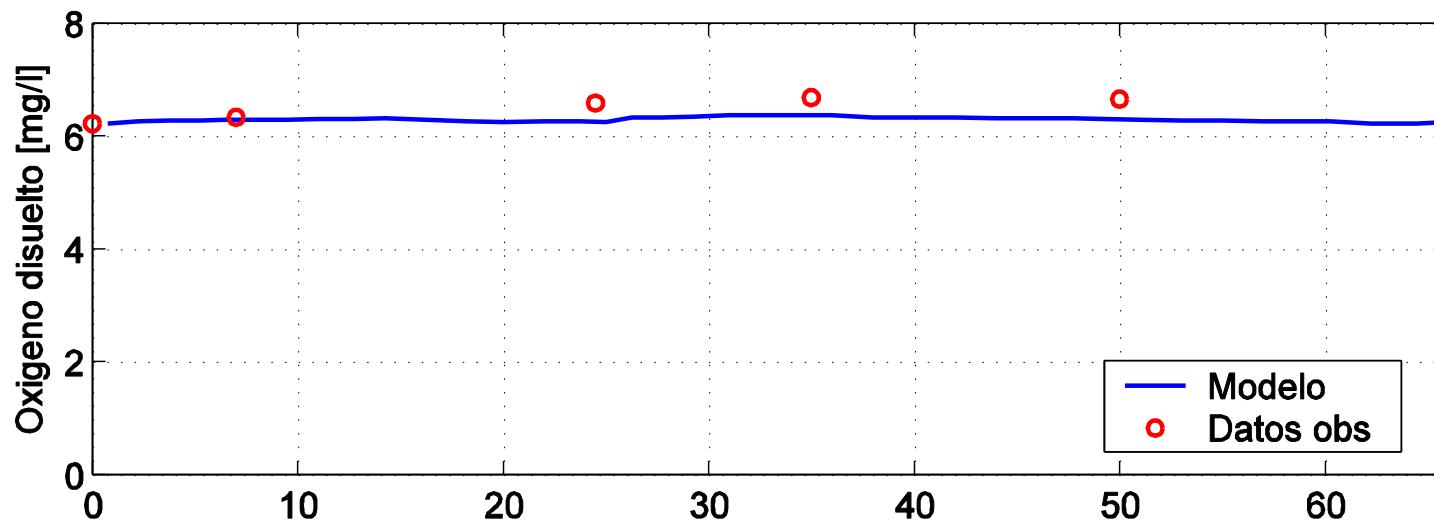
# Coliformes Fecales C2 - RM



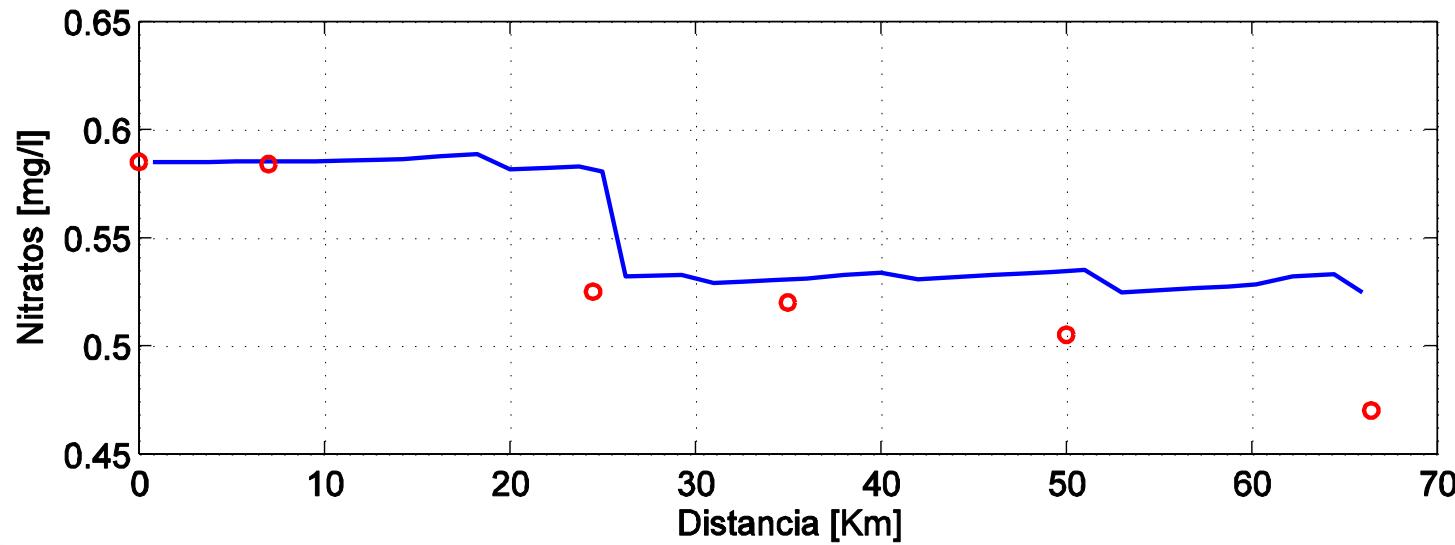
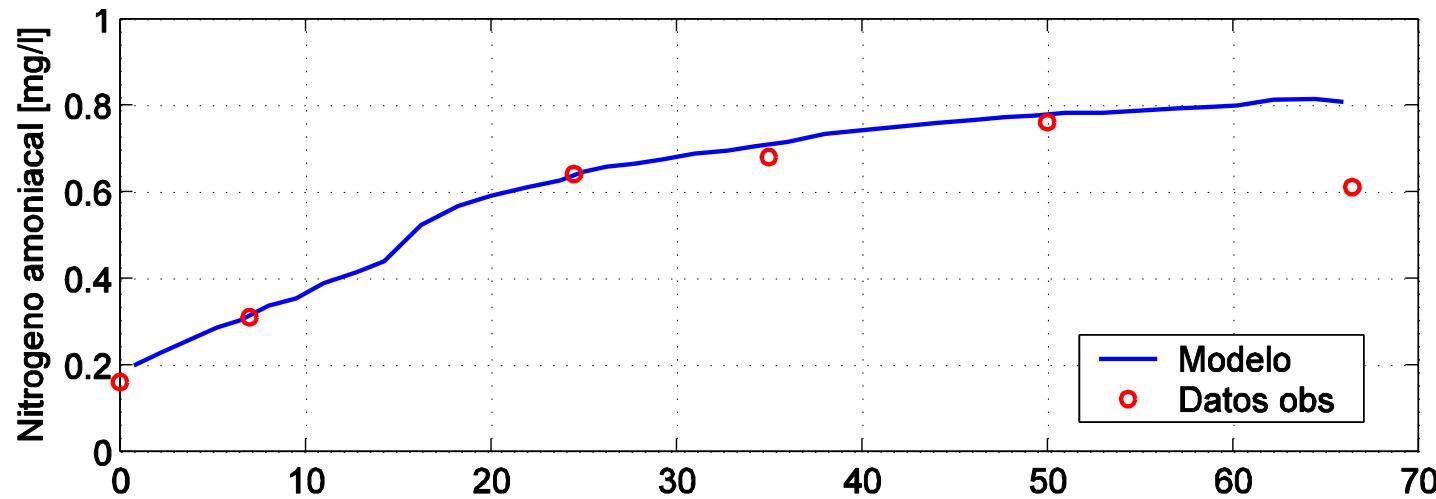
# CALIBRACIÓN CONDUCTIVIDAD Y SST



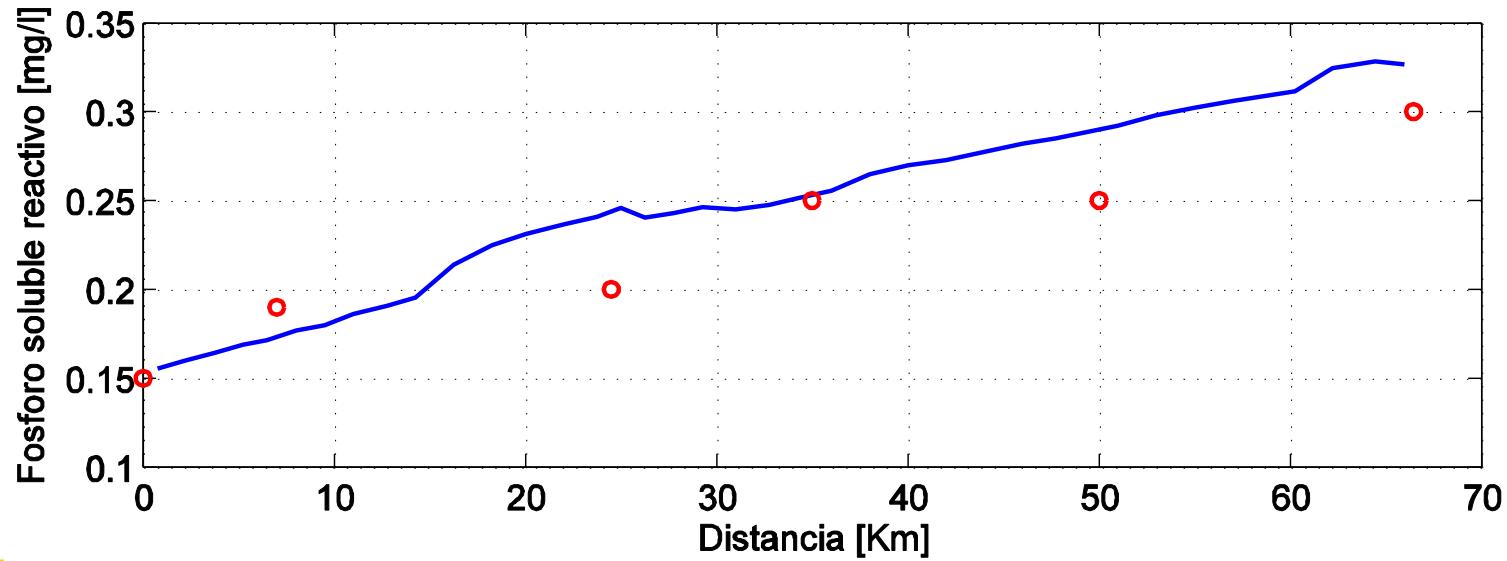
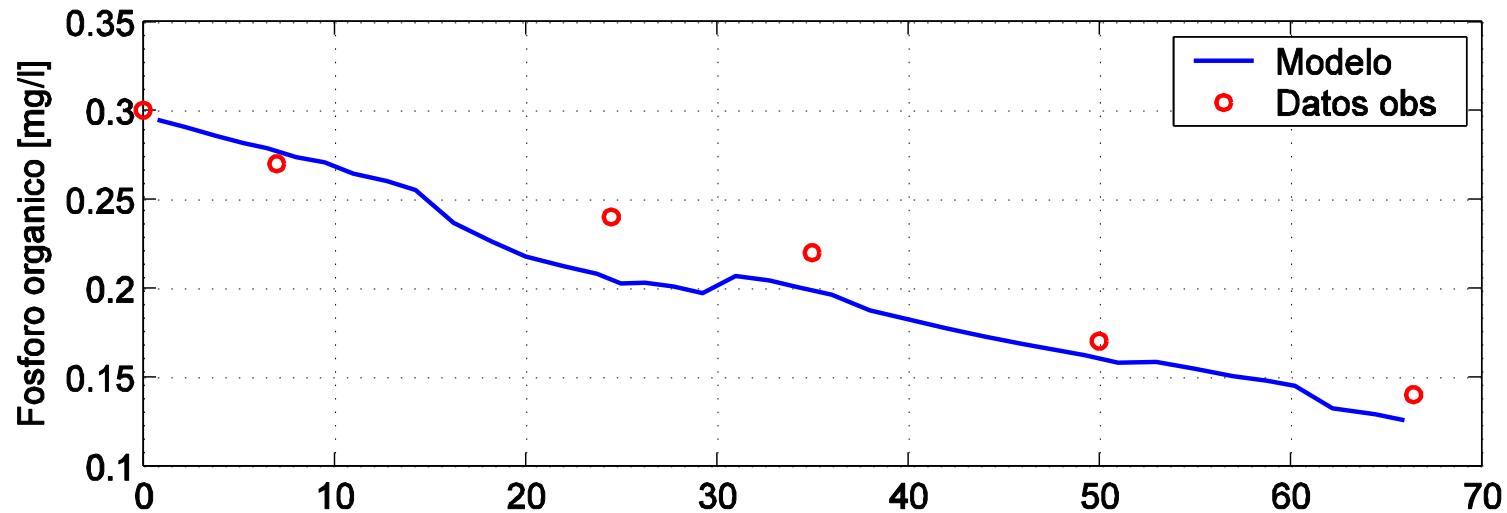
# CALIBRACIÓN OXIGENO DISUELTO Y DBO



# CALIBRACIÓN NUTRIENTES - NITRÓGENO

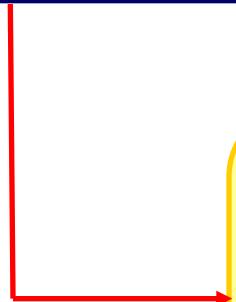


# CALIBRACIÓN NUTRIENTES - FÓSFORO



# METODOLOGIA PROPUESTA

## 7. SIMULACIONES DE ESCENARIOS DE SANEAMIENTO



**ANALISIS Y  
COMPARACION DE  
ALTERNATIVAS –  
SOPORTE PARA  
SELECCIÓN DE  
TECNOLOGÍA**



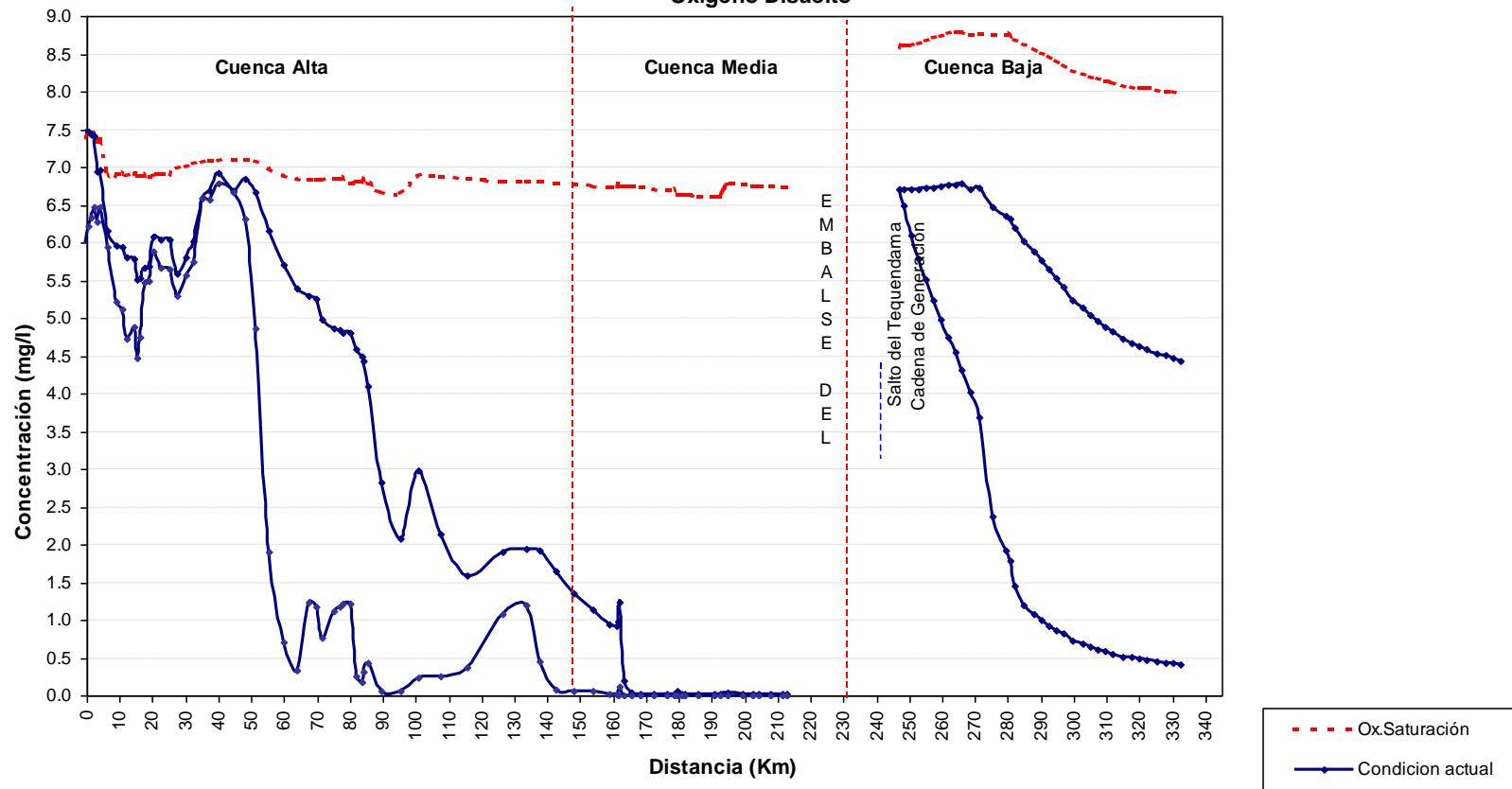
# BANDA DE CONFIANZA SITUACION ACTUAL

## BANDA DE CONFIANZA CONDICIONES ACTUALES INCERTIDUMBRE EN EL CAUDAL

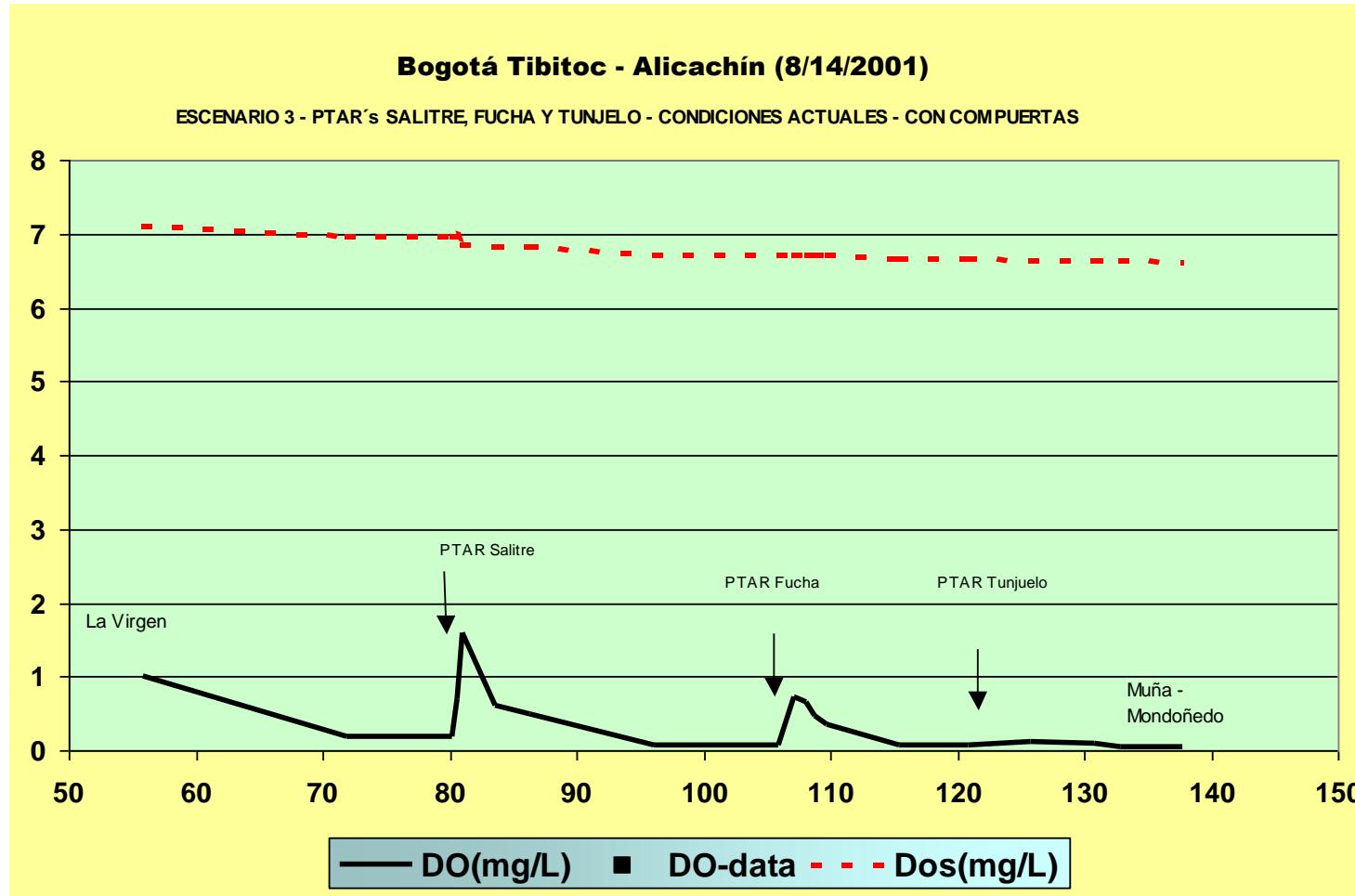
Q min:TR 2 años, Qmax:TR 2 años

R. Bogotá VillaPinzón - Magdalena

Oxígeno Disuelto



# POT ACTUAL – OXÍGENO DISUELTO

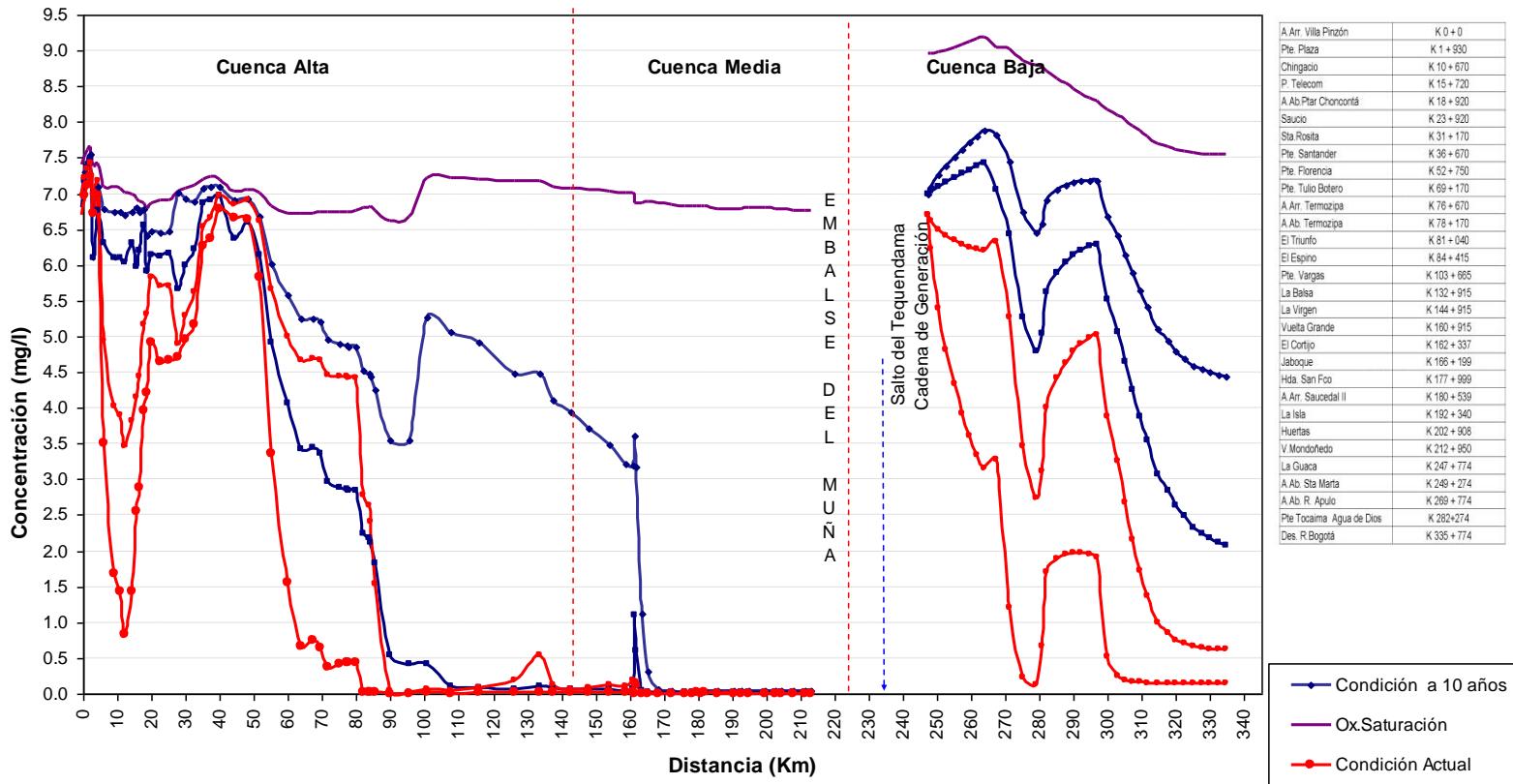


# BANDAS DE INCERTIDUMBRE CONDICION ACTUAL Y PROBABLE

## ESCENARIO PROBABLE A 10 AÑOS Y ESCENARIO ACTUAL

Condiciones Críticas - Caudales Mínimos

Oxígeno Disuelto



# Usos del Agua Cuenca Baja

PRINCIPALES PARAMETROS PARA DETERMINAR EL REUSO DEL AGUA	CALIDAD Y USOS POSIBLES (Por parámetro)						
	SITUACION ACTUAL (AÑO 2002)				SITUACION FUTURA (AÑO 2012)		
	Promedio	Usos	Crítico	Usos	5%	95%	Crítico
Oxígeno disuelto OD (mg/L)	4.4	1_2_3_4_5_6_7. (5)	0.4	1_2_3_4_5_6. (5)	4.9	6.7	1_2_3_4_5_6_7
DBO5 Total (mg/L)	30	1_2_3_4_5_6_7	71	1_2_3_4_5_6_7	22.6	14.3	1_2_3_4_5_6_7
SST (mg/L)	135	1_6_7	220	1_6_7	23.1	18.0	1_2_3_4_5_6_7
PH	7.26	1_2_3_4_5_6_7	7.26	1_2_3_4_5_6_7			1_2_3_4_5_6_7
Flotantes y Espumas	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente	Ausente	1_2_3_4_5_6_7
Grasas y aceites	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente	Ausente	1_2_3_4_5_6_7
Sólidos de fondo	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente	Ausente	1_2_3_4_5_6_7
Olor	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente(7)	1_2_3_4_5_6_7	Ausente	Ausente	1_2_3_4_5_6_7
Comp.Amoniacales (mg/L)	15.89	1_2_3_4_5	27.57	1_2_3_4_5			1_2_3_4_5
Cadmio (mg/L)	0	1_2_3_4_5_6_7	0.011		1		1_2_3_4_5_6_7
Cobre (mg/L)	0.02	1_2_3_4_5_6	0.037	1_2_3_4_5_6			1_2_3_4_5_6
Cromo (mg/L)	0.034	1_2_3_4_5_6	0.095	1_2_3_4_5			1_2_3_4_5_6
Niquel (mg/L)	0.027	1_2_3_4_5_6	0.035	1_2_3_4_5_6			1_2_3_4_5_6
Plomo (mg/L)	0.036	1_2_3_4_5_6_7	0.044	1_2_3_4_5_6_7			1_2_3_4_5_6_7
Coliformes totales NPM/100ml	9.50E+07	1_2	3.10E+08	1_2			1_2
Coliformes fecales NMP/100 ml)	1.48E+07	1	9.30E+07	1			1

(5): El valor adoptado es tomado del decreto 1594/84

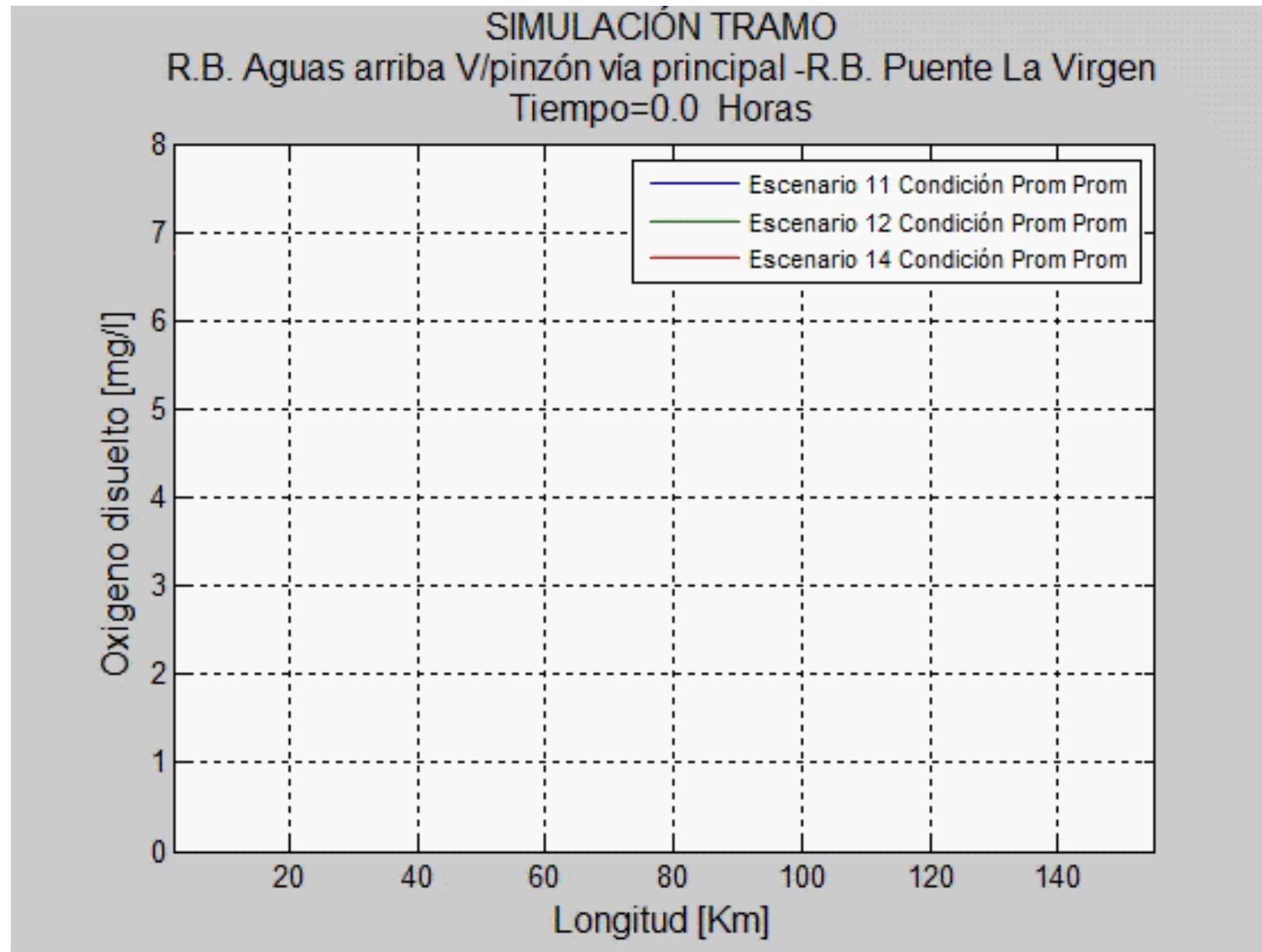
(7): Valor tomado a partir del conocimiento de los expertos a partir de observaciones

## MODELO



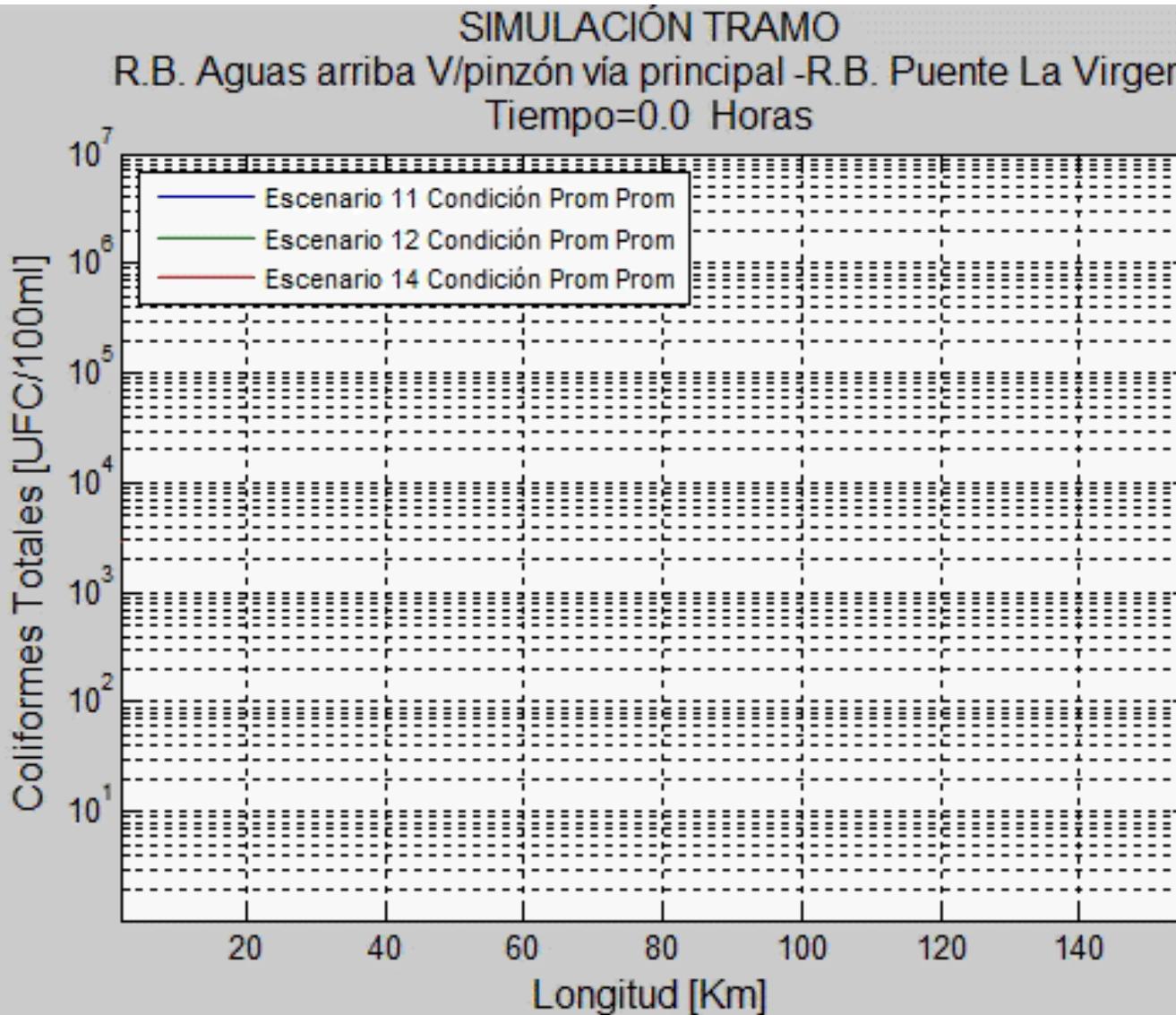
# Ejemplo Simulación Escenarios

## Simulación de escenarios



# Ejemplo Simulación Escenarios

## Simulación de escenarios



# Marco de modelación propuesto

## Resultado de proyectos e investigaciones previas:

- Universidad de los Andes – **EAAB** (2003) “Modelación de la calidad del agua del Río Bogotá”, Informe Final
- Universidad de los Andes – **Acuagyr** (2005), “Modelación de la calidad del río Magdalena y caracterización de las aguas lluvias y residuales de Girardot”, Informe Final
- Universidad Nacional de Colombia – **EAAB** (2010) “Modelación dinámica de la calidad del agua de Río Bogotá”, Productos 1 a 7.
- Camacho, L.A. y Díaz-Granados (2003) “Metodología para la Obtención de un Modelo Predictivo de Transporte de Solutos y Calidad del Agua en Ríos – Caso Río Bogotá” Agua 2003, Cartagena.
- Camacho, L.A., Rodríguez, E.A., Hernández, S. (2012) Metodología y resultados de la modelación dinámica del Río Bogotá. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José de Costa Rica, Sep. 9-12.





**Gracias por su atención**



[la.camacho@uniandes.edu.co](mailto:la.camacho@uniandes.edu.co)