

Navegabilidad del Río Magdalena y Río Meta

Condiciones hidromorfodinámicas y Retos



Humberto Avila, PhD

Director

Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA

Universidad del Norte

2016

IDEHA

Instituto de Estudios
Hidráulicos y Ambientales



Introducción

- Exponer condiciones hidromorfodinámicas características de los ríos Magdalena y Meta en Colombia y algunos retos y necesidades por investigar.
- La mayor parte de los trabajos presentados han sido realizados por el Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA de la Universidad del Norte

Proyectos destacados del IDEHA en Ingeniería y Navegación en ríos de Colombia

Río Magdalena K0 – K120
(2014 – Actual. Gob. Atlántico,
Colciencias, Uninorte

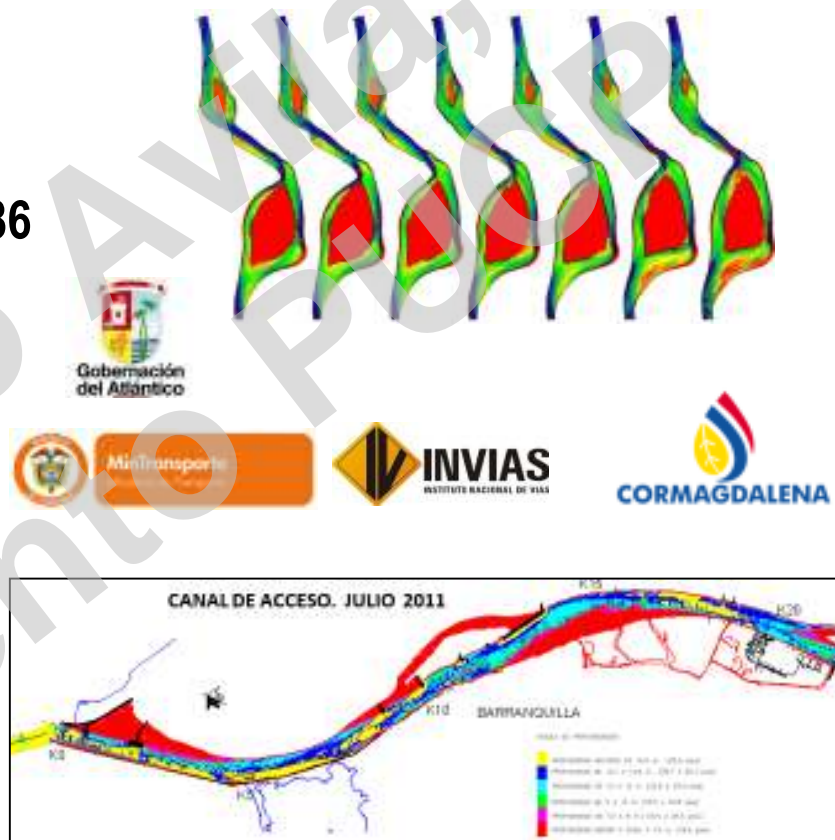
Río Magdalena y Canal de Acceso (1986
- 2014). CORMAGDALENA

Canal del Dique (1986 – 2012)
CORMAGDALENA

Río Cauca (2012) .180 Km INVIAS

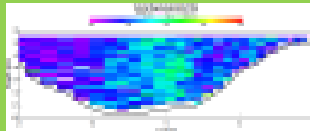
Río Meta (2013). 800 Km INVIAS

Plan Maestro Fluvial – Diagnóstico
DNP (2014)



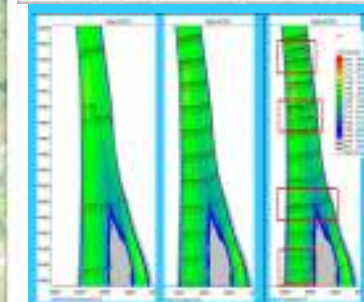
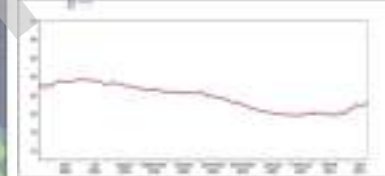
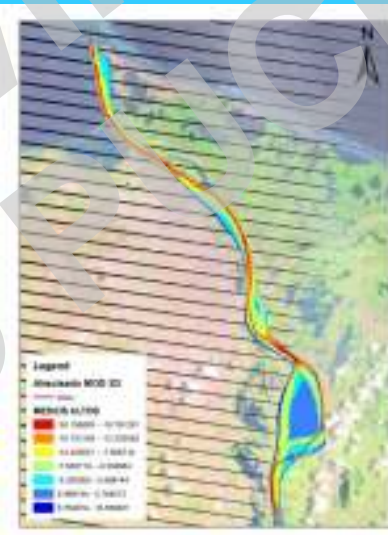
Enfoque IDEHA: Modelación numérica robusta

Mediciones de campo



- Comportamiento y evolución real del río
- Base para la calibración y validación de modelos numéricos

Modelación numérica



- Condiciones hidromorfodinámicas pasadas, actuales y futuras
- Requiere calibración y validación con mediciones de campo

Cuencas para análisis de transporte fluvial



Ríos Principales	Longitud total (km)	Longitud navegable (km)	Navegación mayor permanente (km)
Intendencia del Magdalena			
Magdalena	1.550	1.092	631
Cauca	1.024	818	184
Canal del Dique	117	117	117
San Jorge	400	193	110
Sinu	340	270	pasajeros
Total cuenca	4.258	2.770	1.188
Intendencia del Atrato			
Atrato	720	560	508
San Juan	410	350	63
Baudó	180	150	80
León	135	50	50
Total cuenca	4.435	3.077	1.175
Intendencia del Orinoco			
Orinoco	290	163	127
Meta	885	866	800
Arauca	440	296	296
Guaviare	947	947	774
Inirida	919	448	30
Vichada	668	580	149
Total cuenca	8.897	6.736	1.955
Intendencia del Amazonas			
Amazonas	116	116	116
Putumayo	1.717	1.600	1.272
Vaupés	1.000	660	600
Ortegaza		149	
Caquetá	1.360	1.200	857
Caguan		360	
Apaporis		370	
Patía	450	350	250
Mira		150	
Total cuenca	7.135	5.636	2.245
Total País	24.725	18.225	7.063

Integración de Infraestructura Regional Suramericana IIRSA (2000)

CONEXIÓN PACIFICO - ATLANTICO



Orientar la navegabilidad fluvial

DESARROLLO AUTÓNOMO DE RÍOS



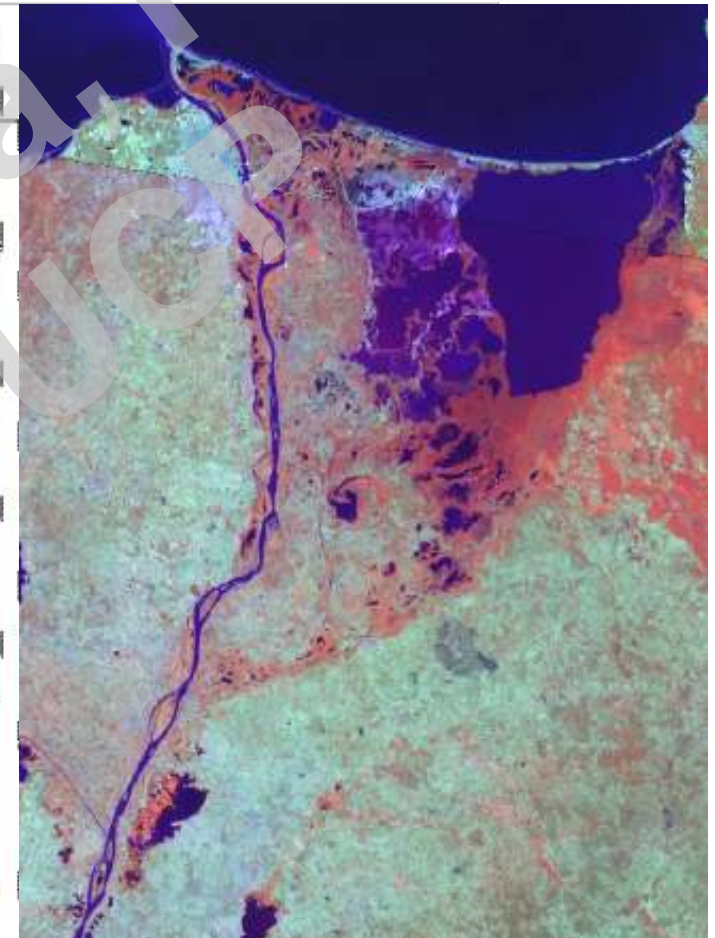
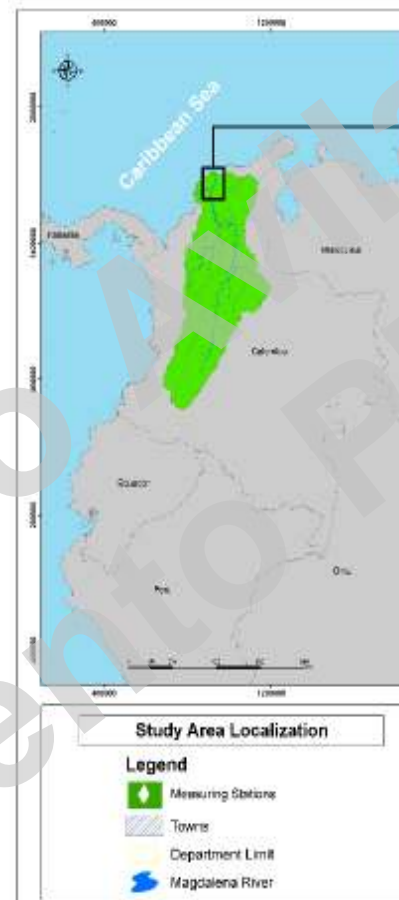
ENFOQUE DE INVESTIGACIONES

- Diseño de hidrovías orientado al desarrollo autónomo de ríos: obras flexibles y dragados inteligentes.
- Diseño de hidrovías orientado a obras rígidas y dragados de mantenimiento.
- Criterios de diseño híbridos
- Diseños eficientes Beneficio/Costo

RIO MAGDALENA

Área de estudio

- **Localización:** Conecta el centro del país con la costa Caribe.
- **Área de Cuenca:** 257,440Km²
- **Longitud Total:** 1550Km
- **Sectores de estudio:** 115 Km



Casos de estudio: río Magdalena y río Meta



Río Magdalena

Conecta el Centro y Norte de Colombia

Área de la cuenca: 257,440 km²

Longitud total: 1,550 km

Desemboca: Mar Caribe

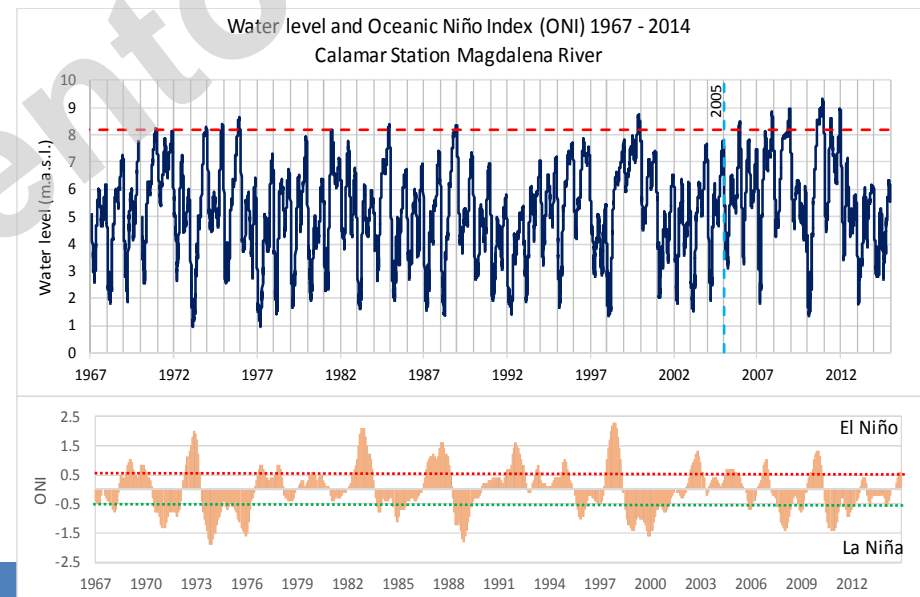
Cuenca ocupa el 24% del territorio donde vive el 80% de la población y se genera el 85% del PIB Nacional

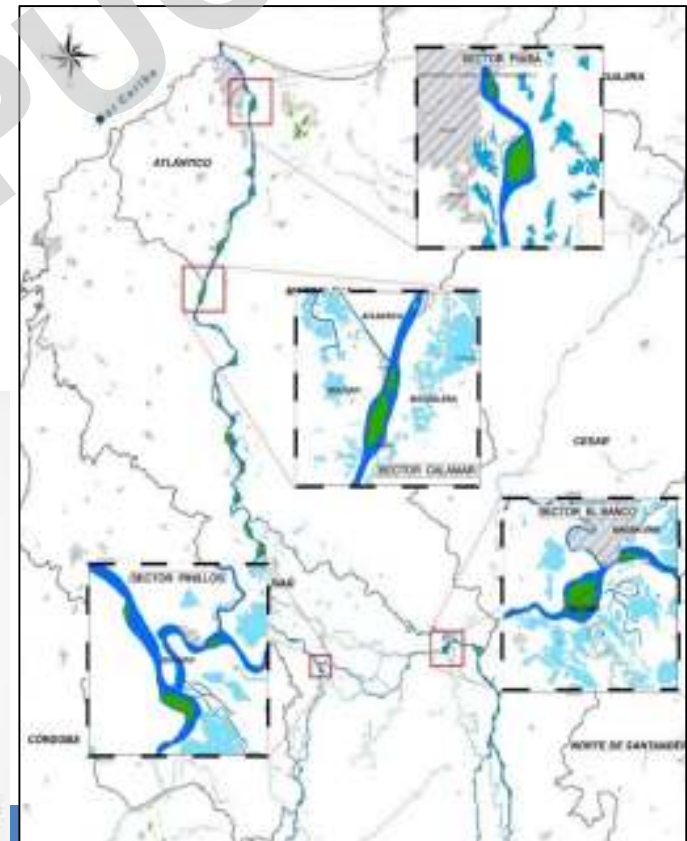
Moviliza el 50% de la carga fluvial nacional (2 millones toneladas / año)

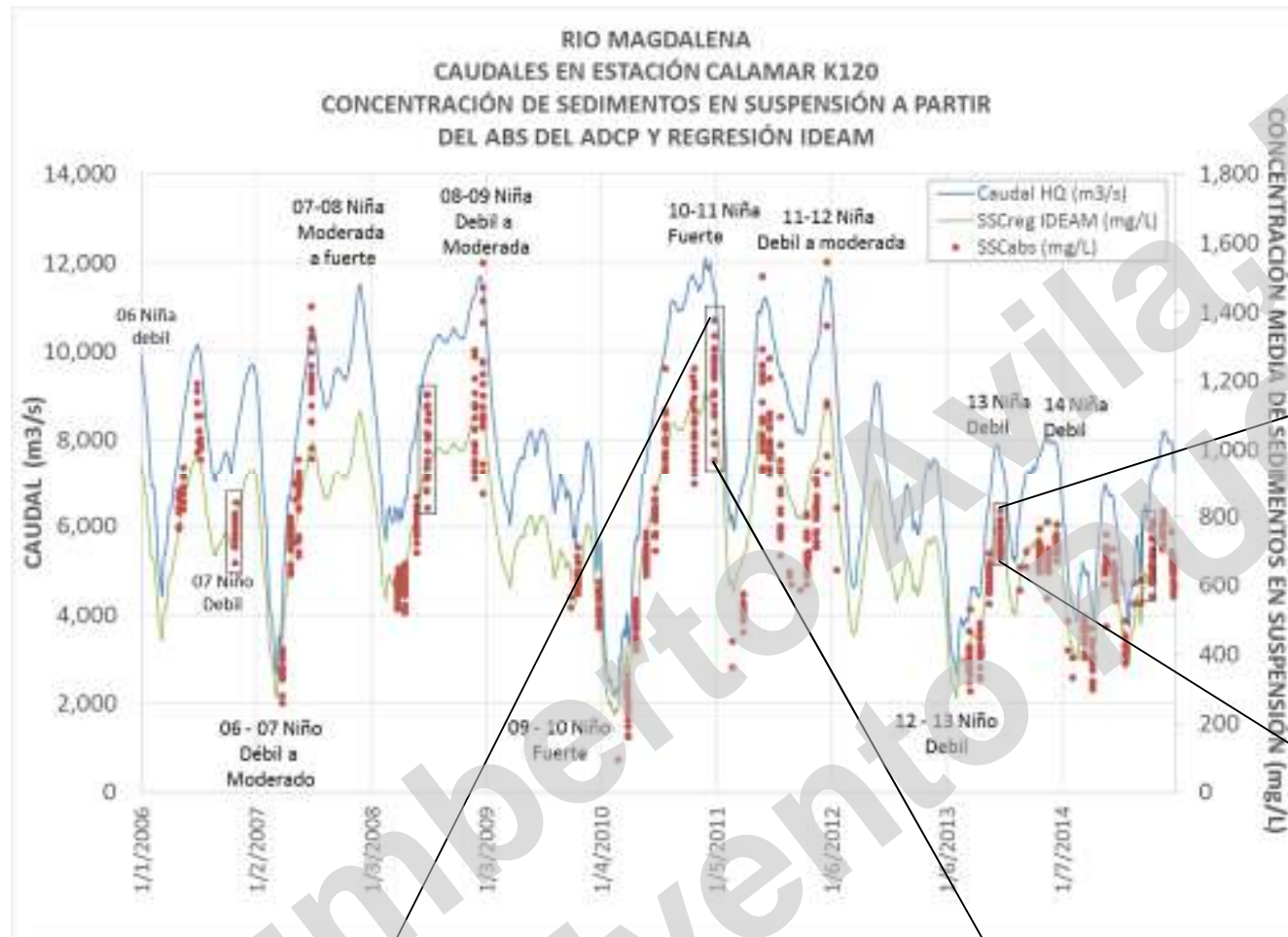
Sin embargo, eso equivale solo al 1% de la carga nacional total.

Hidrología

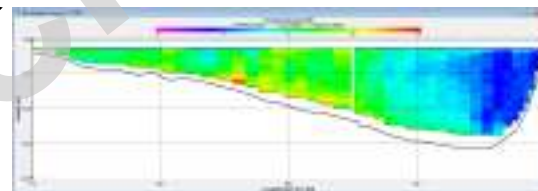
- Hidrograma Bimodal
- Q_{Min} : 2,100 m³/s
- Q_{Avg} : 7,050 m³/s
- Q_{Max} : 18,300 m³/s
- Q_{SST} = 135 - 200 Mll ton/año
- $D_{50\text{-BED}}$ = 250 μ m



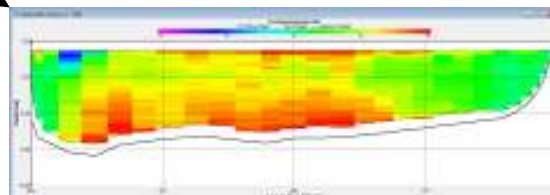




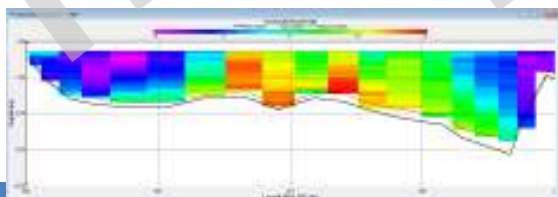
Sección K16 → 25 Jun 2013 → $Q = 7.910 \text{ m}^3/\text{s}$
 ABSprom=91.60 dB → SSC=816 mg/L
 $Q_{st}=557.764 \text{ Ton/día}$



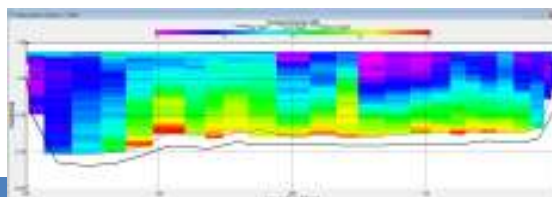
Sección K11 → 25 Jun 2013 → $Q = 7.248 \text{ m}^3/\text{s}$
 ABSprom = 89.90 dB → SSC=684 mg/L
 $Q_{st}=428.363 \text{ Ton/día}$



Sección K13 → 29 Dic 2010 → $Q = 11.281 \text{ m}^3/\text{s}$
 ABSprom=96.92 dB → SSC=1.375 mg/L
 $Q_{st}=1'340.458 \text{ Ton/día}$



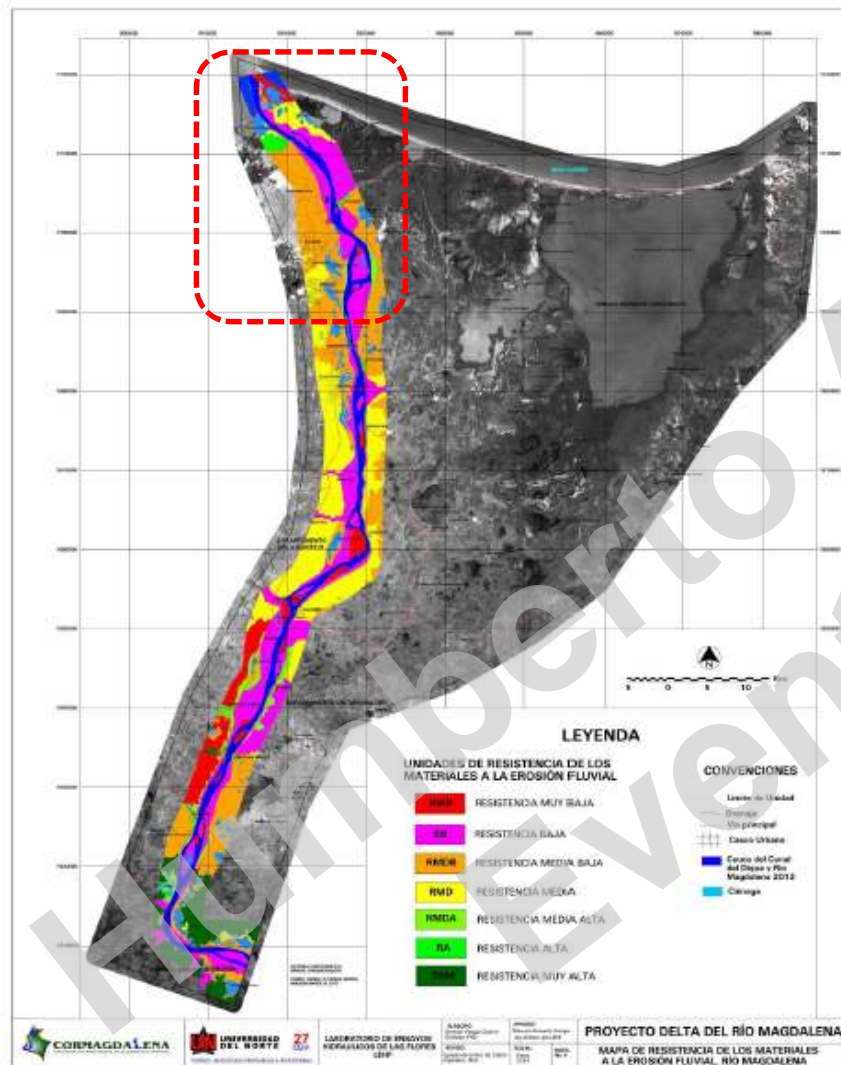
Sección K19 → 29 Dic 2010 → $Q = 12.226 \text{ m}^3/\text{s}$
 ABSprom=93.35 dB → SSC=969 mg/L
 $Q_{st}=1'023.548 \text{ Ton/día}$



Uninorte, Diaz, Avila (2015)

Geología/Geomorfología

Río Magdalena



Uninorte, Vargas, G. (2014)

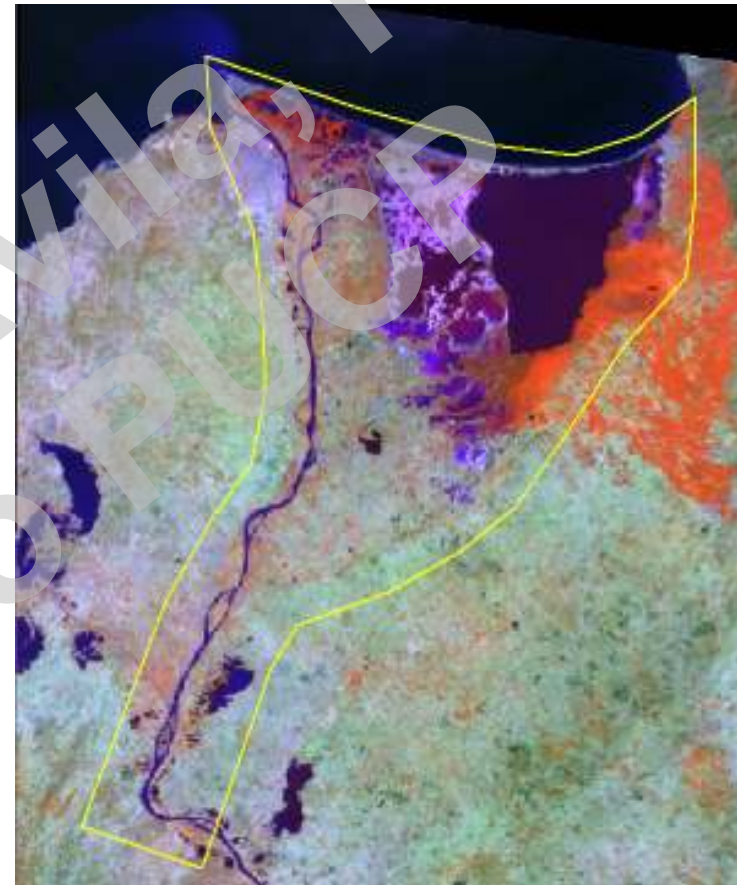


Uninorte, Avila, Acuña, Vargas. (2015)

Delta del río Magdalena con El Niño y La Niña

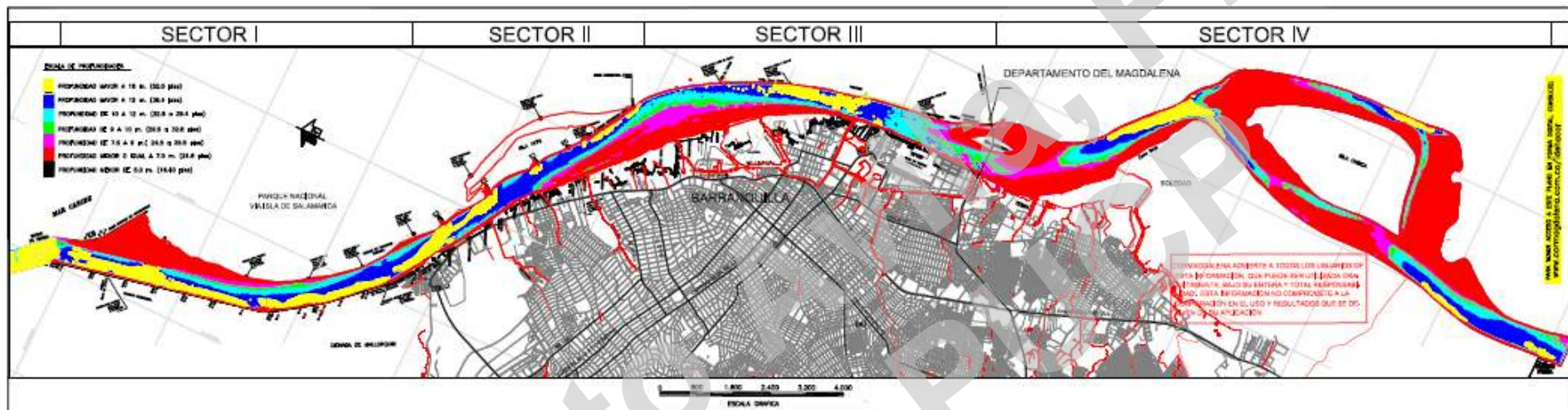


Landsat TM de 1984
“La Niña”



Landsat TM de 1998
“El Niño”

CANAL DE ACCESO PUERTO DE BARRANQUILLA (1938 - 2015)



Profundidad de diseño:

- 12.20m (40ft) entre K0 (Bocas de Ceniza) y – K22 (Puente Pumarejo)
- 2.13m (7ft) entre K22 (Puente Pumarejo) y Calamar (K115)

Fuente: Plan Maestro Portuario (Rotterdam Maritime Group, 2012)

Proyecto de recuperación de Navegabilidad



NAVELENA
APP Fluvial

El Proyecto

Cuatro Unidades Funcionales de Navegación en 906 Km



Fuente: Navelena

Fuente: La República

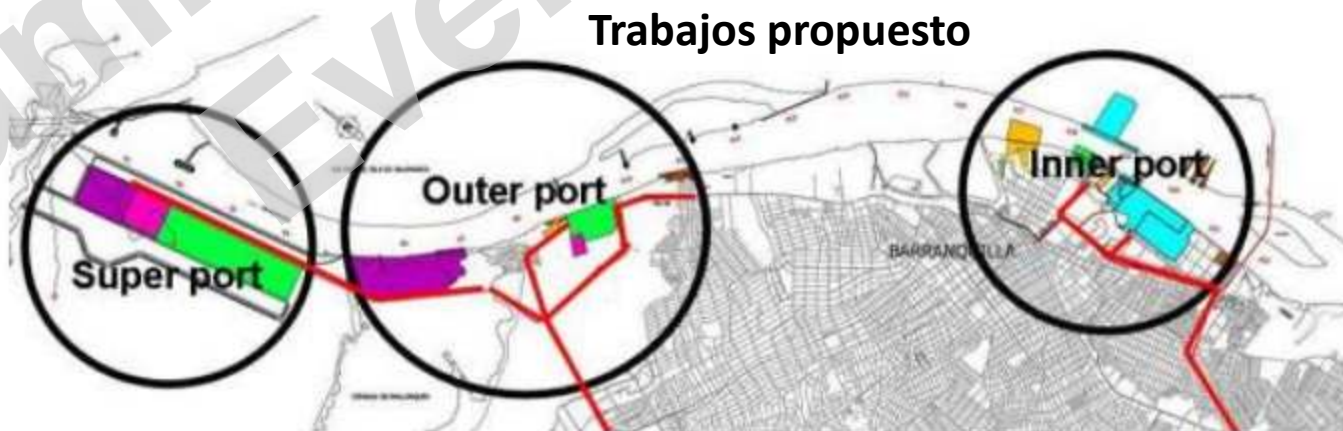
Plan Maestro Portuario

Objetivos:

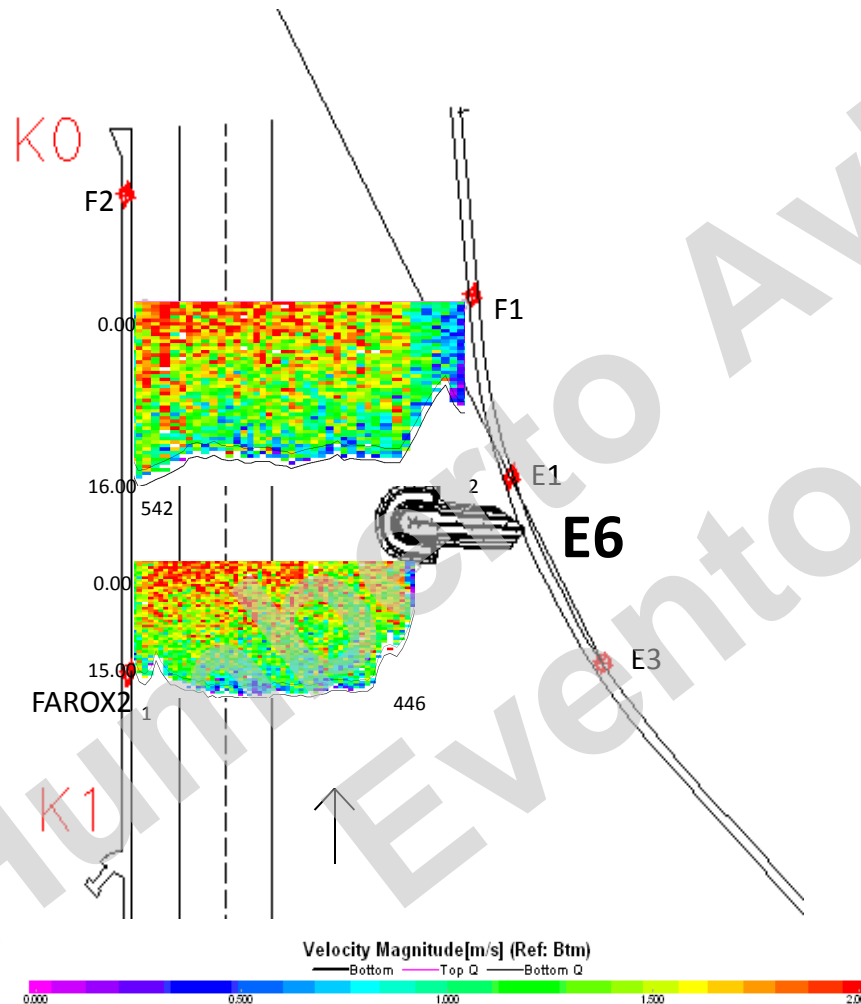
- Proveer suficiente profundidad
 - Super Port: 19m
 - Outer Port: 14m
 - Inner Port: 12.2m
- Conectividad dentro de e la región

Phase	Years	Cargo mobilization (mton/year)	port capacity (mton/year)
1	2012-2013	8.5	16.1
2	2013-2015	15.2	33.1
3	2015-2018	39.1	81.2
4	2018-2023	66.3	92.1
5	2023-2030	96.9	123.5

Trabajos propuesto



Retos: Manejo de hidrodinámica en condiciones máximas



Mayo 27, 2008

$Q=7,788 \text{ m}^3/\text{s}$

$V_{\text{avg}} = 2 \text{ m/s}$

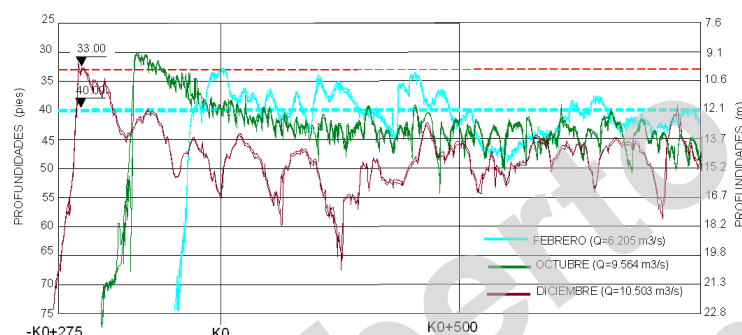
Diciembre 20 2010

$Q=15,000 \text{ m}^3/\text{s}$

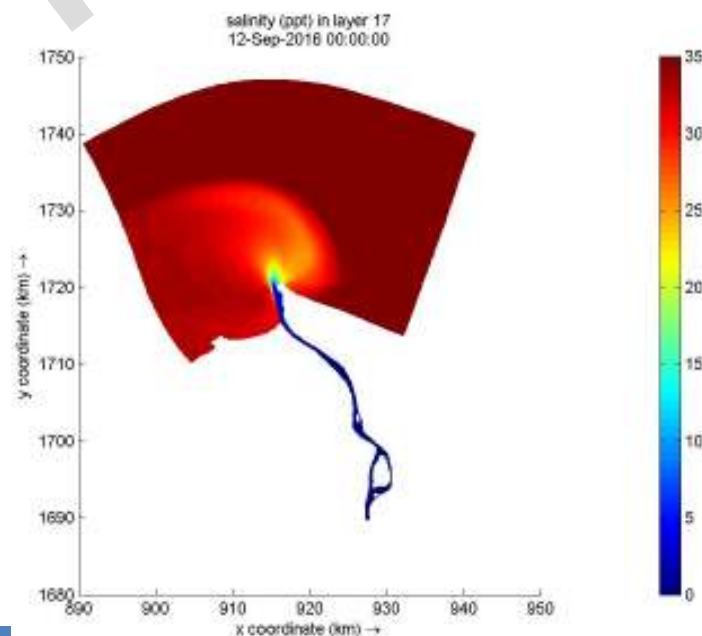
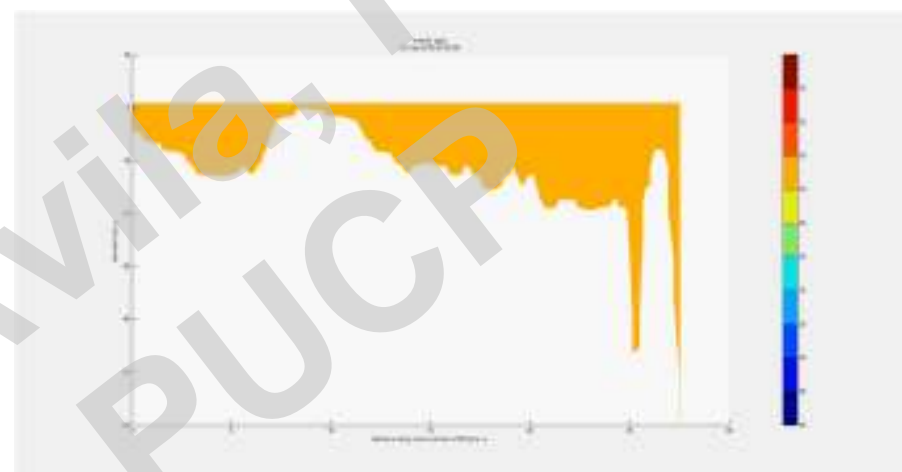
$V_{\text{avg}} = 3 \text{ m/s}$

Retos: Efectos de la cuña salina

Condiciones hidrosedimentológicas y morfológicas de operación el sector de Bocas de Ceniza: fluvial y marino



IDEHA-Uninorte, 2014 - 2016

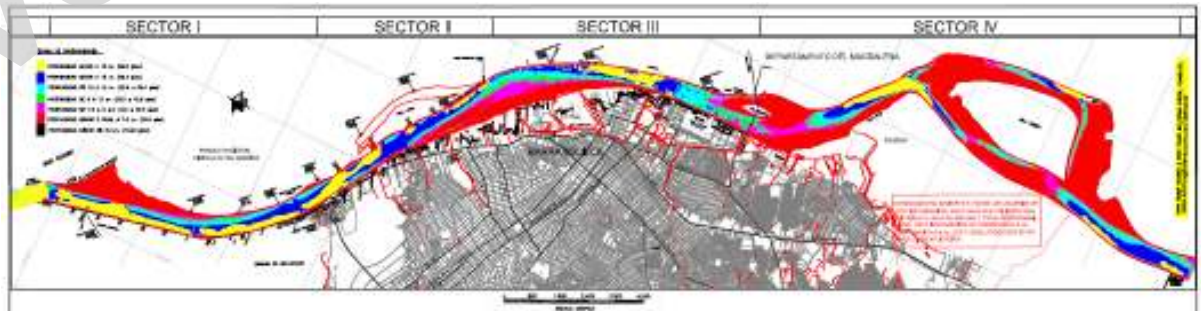


Retos: Propuesta de ampliación de profundidad

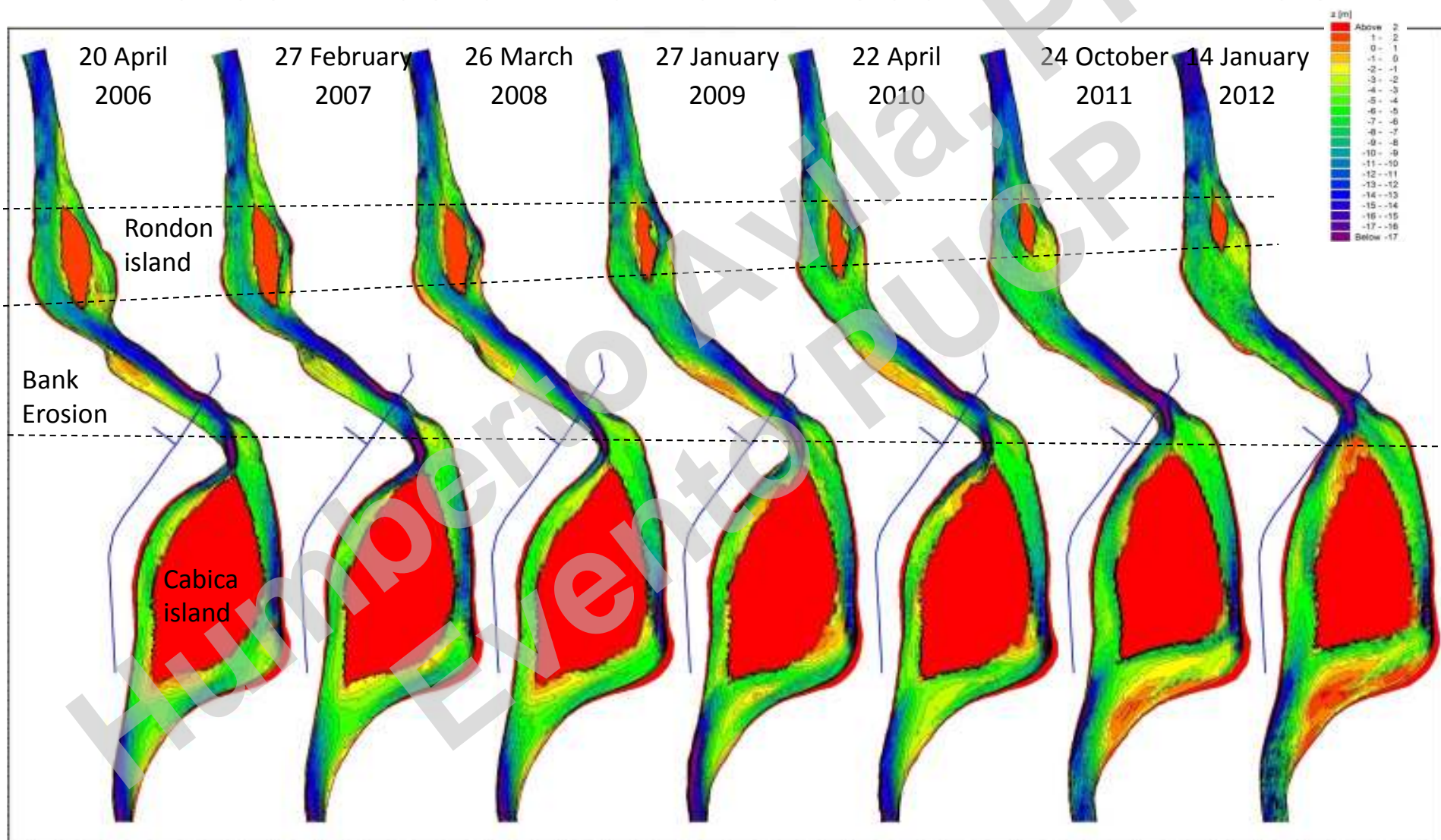
- Ampliación de calado para embarcaciones de mayor capacidad.
- Evaluar límite máximo de profundización: estructural, hidráulico, cuña salina, operacional
- Evaluar relación beneficio/costo



Fuente: stevensmaritime.com

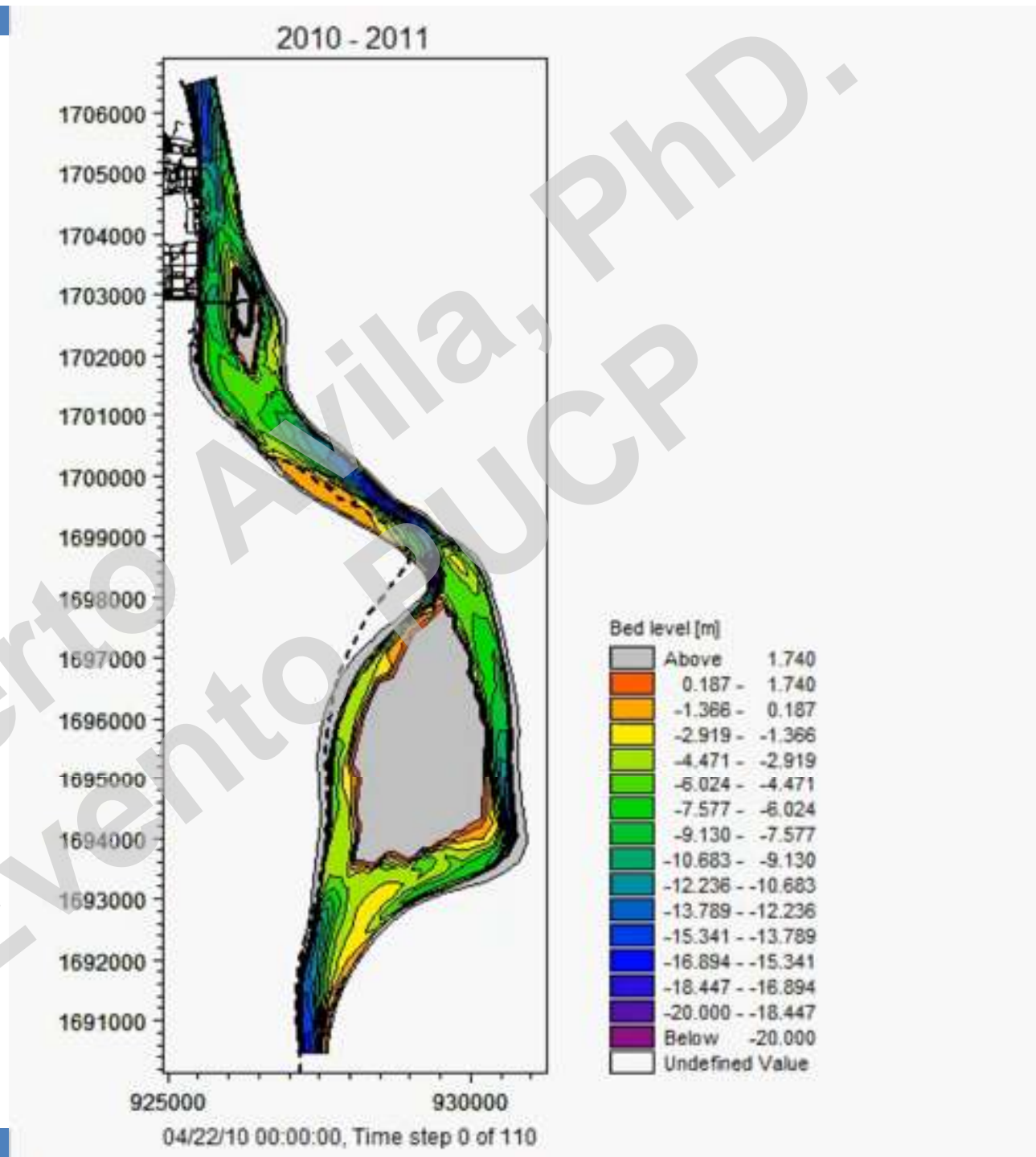


Retos: Erosión fluvial en sector K22 – K38



MIKE 21C

IDEHA-Uninorte: 2013



RIO META

Casos de estudio: río Meta



Río Meta

Conecta el Centro y Este de Colombia

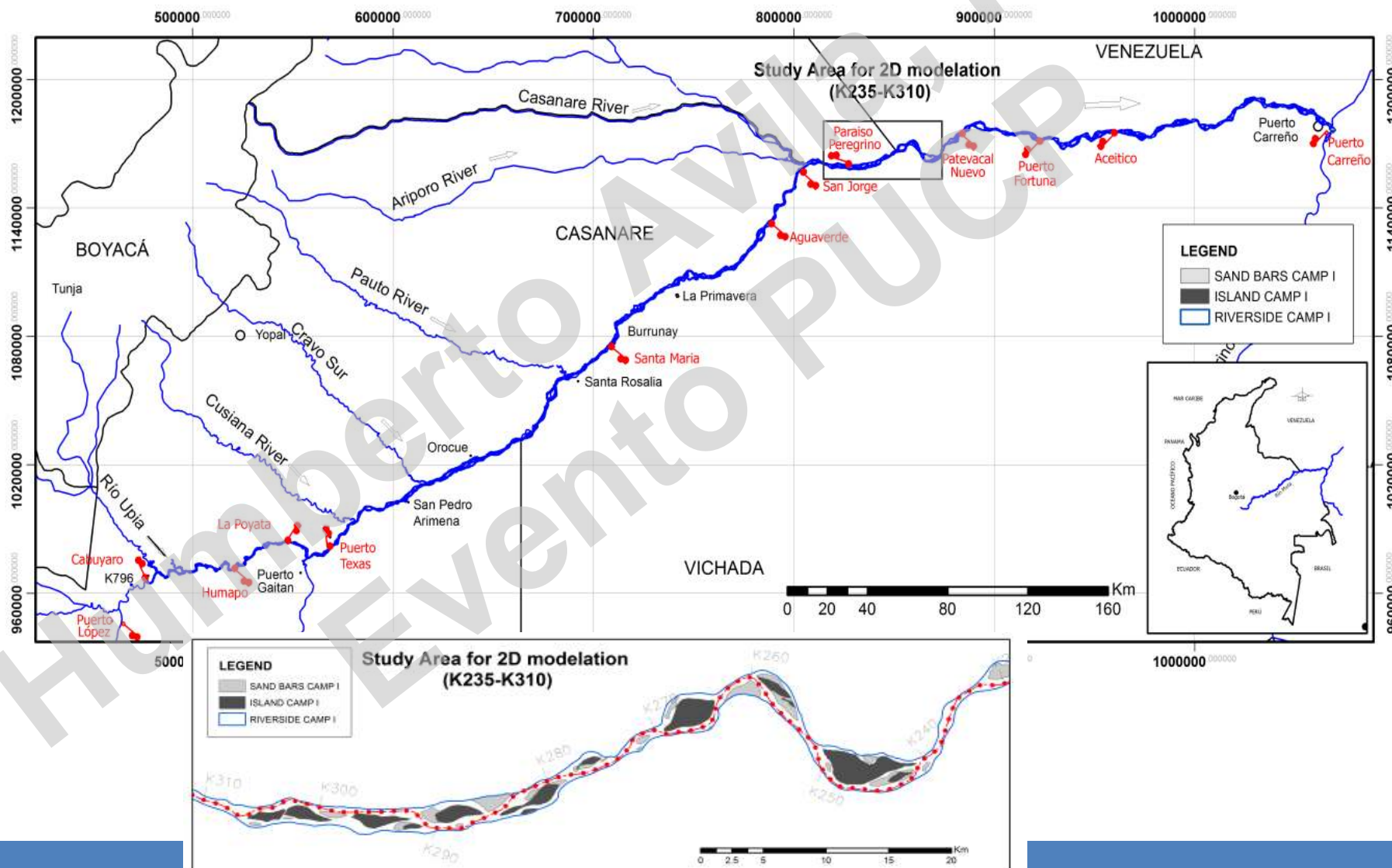
Área de la cuenca: 99,500 km²

Longitud total: 1,002 km

Desemboca: río Orinoco

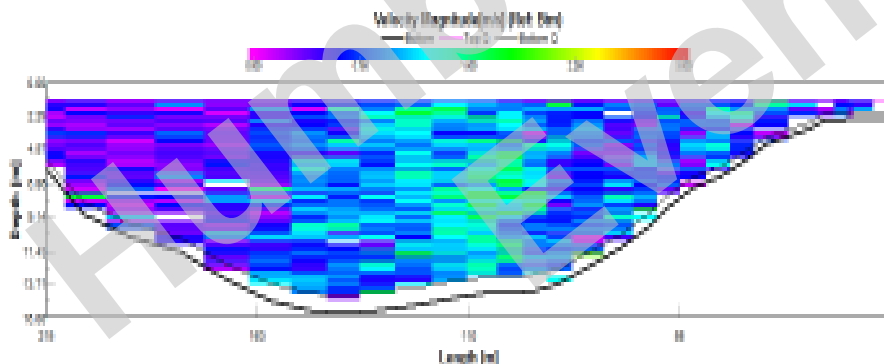
Condición estratégica económica por su conexión
con el río Orinoco

Sector de estudio



Trabajo de campo y procesamiento

- Rectificación Georreferenciación y Nivelación de red de estaciones
- Batimetrías
- Mediciones de velocidad y caudal con (ADCP)
- Levantamiento de orillas
- Mediciones de sedimento
- Reconocimiento de campo



EcoTrack Doble
frecuencia



GPS-Hiperlite



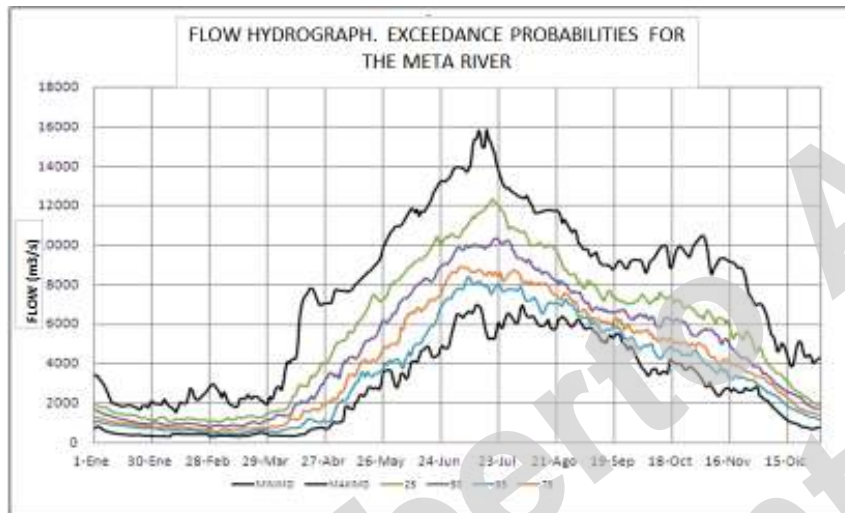
ADCP - Rio Grande



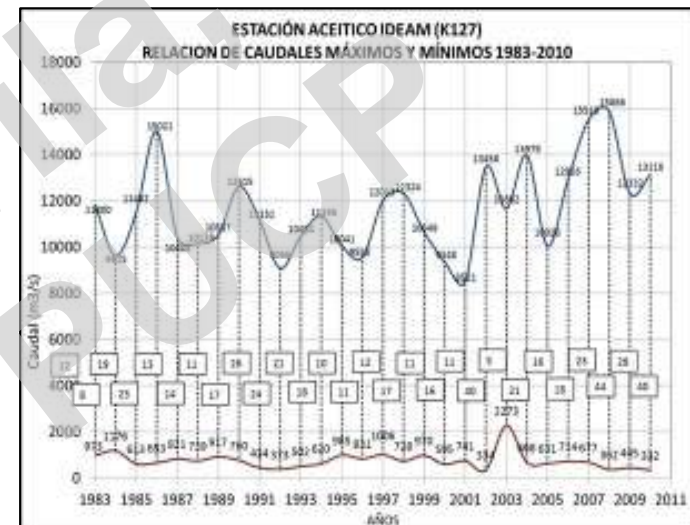
Corrector de Oleaje TSS-
DMS 25

Hidrología

• Río Meta



- Hidrograma Unimodal
- Q_{Min} : 300 m³/s
- Q_{Avg} : 5,500 m³/s
- Q_{Max} : 15,800 m³/s
- Q_{SST} = 40 Mll ton/año
- D_{50-BED} = 350 μ m



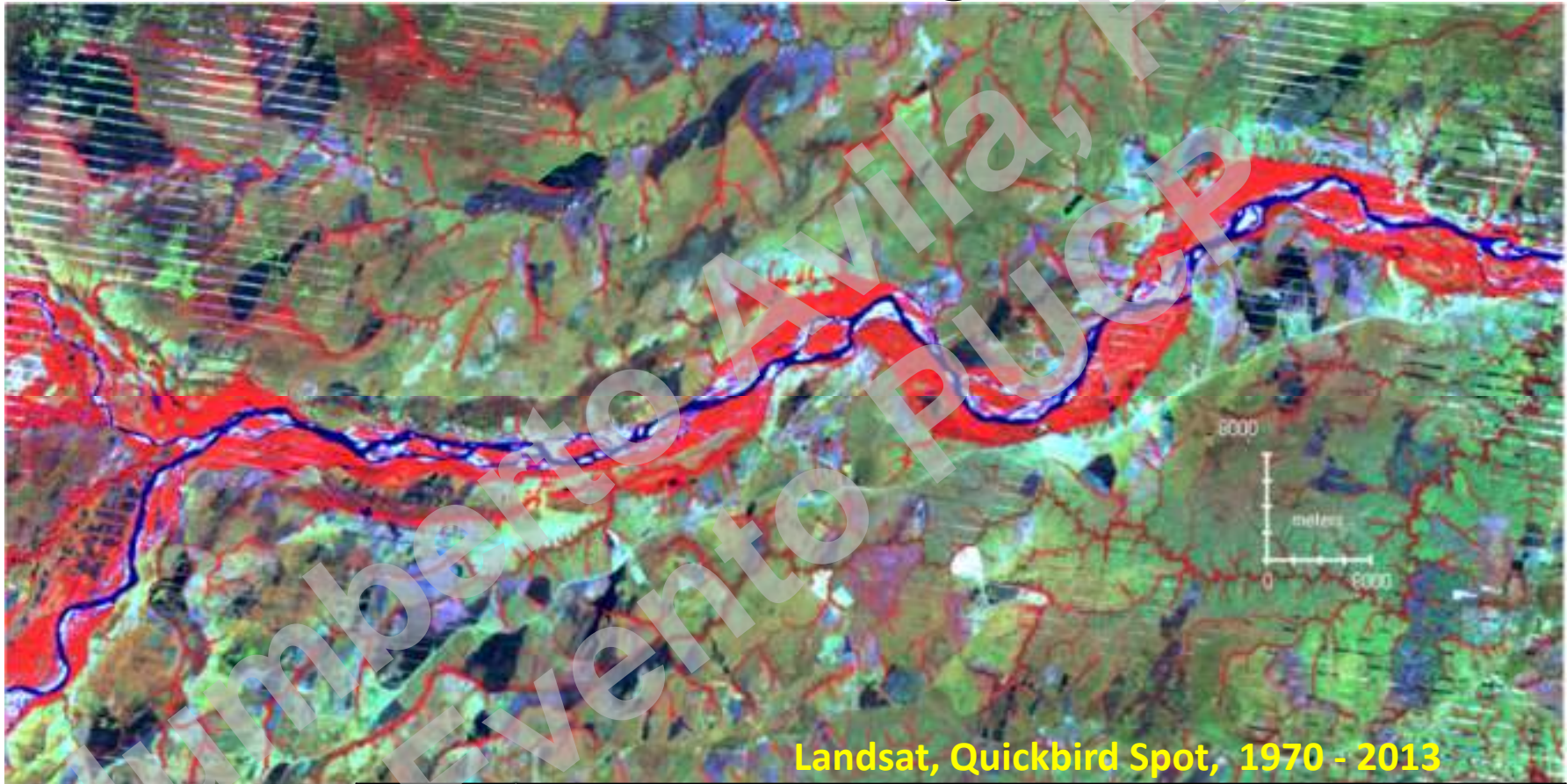
Río Meta:

$$5 < Q_{max}/Q_{min} < 10$$

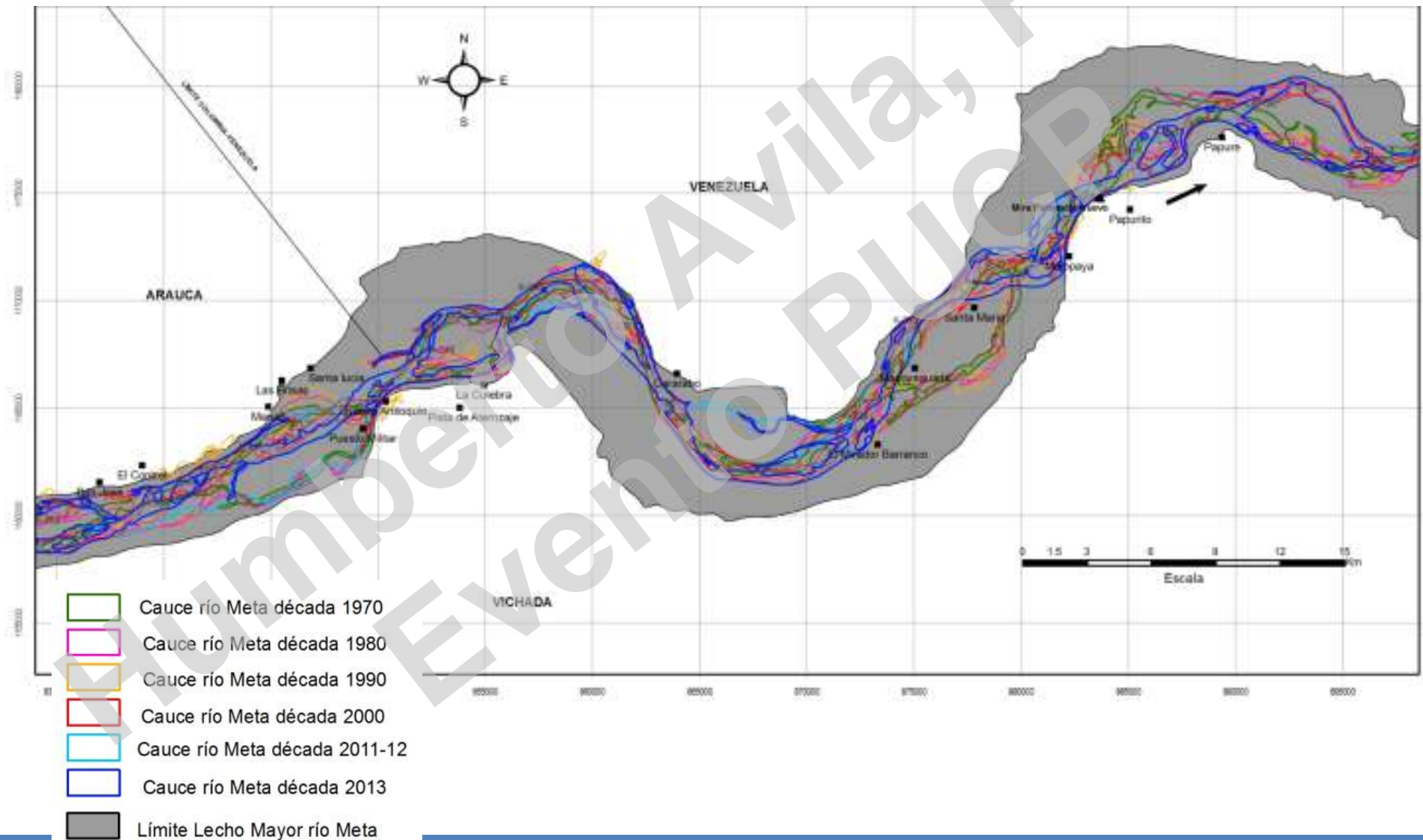
Río Magdalena:

$$Q_{max}/Q_{min} < 10$$

Geomorfología

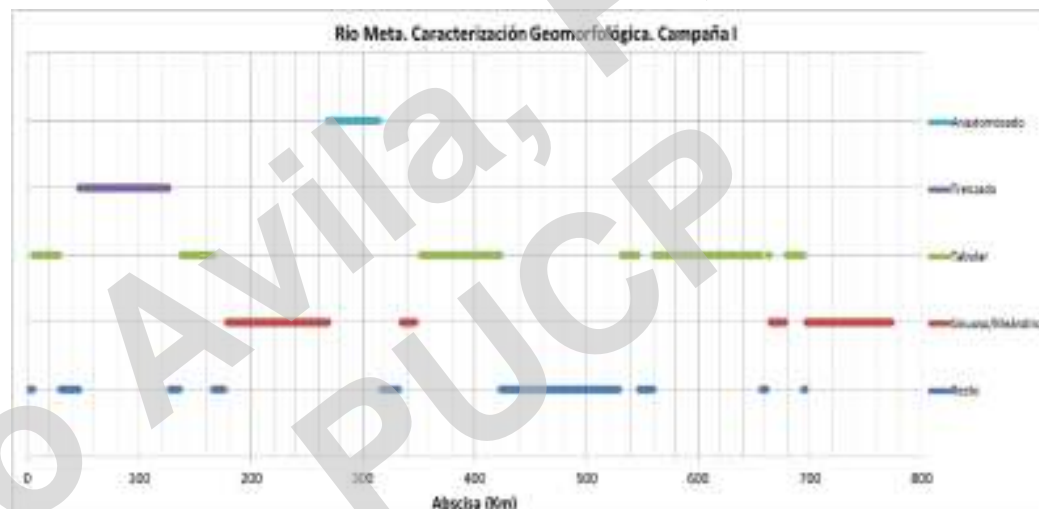
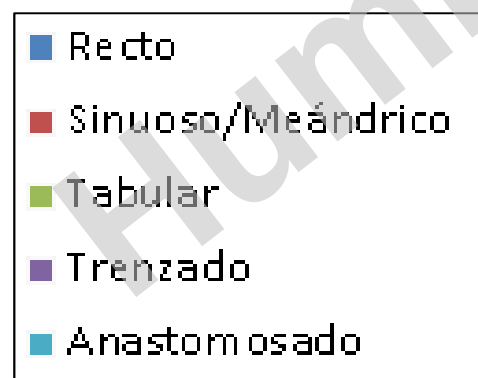
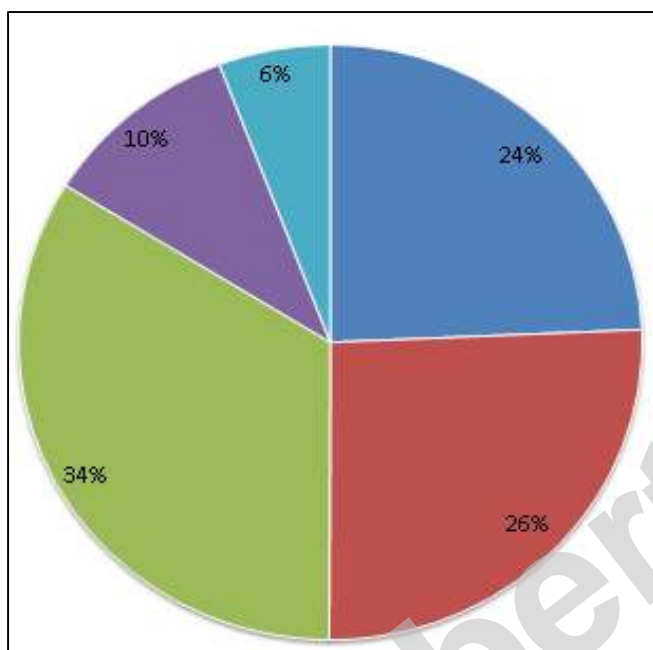


SECCIÓN	ANCHO (m)
CAUCE ACTIVO/LECHO MOBIL	Hasta 2,700
LECHO MAYOR	Hasta 9,000



Morfología

Rio Meta

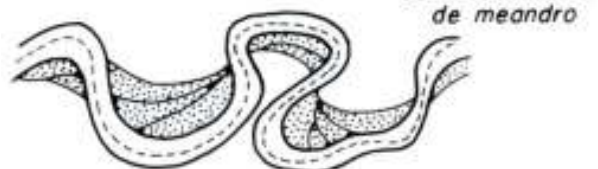


Caracterización Geomorfológica del río Meta entre el K0 - K773

RECTILÍNEO



MEANDRIFORME

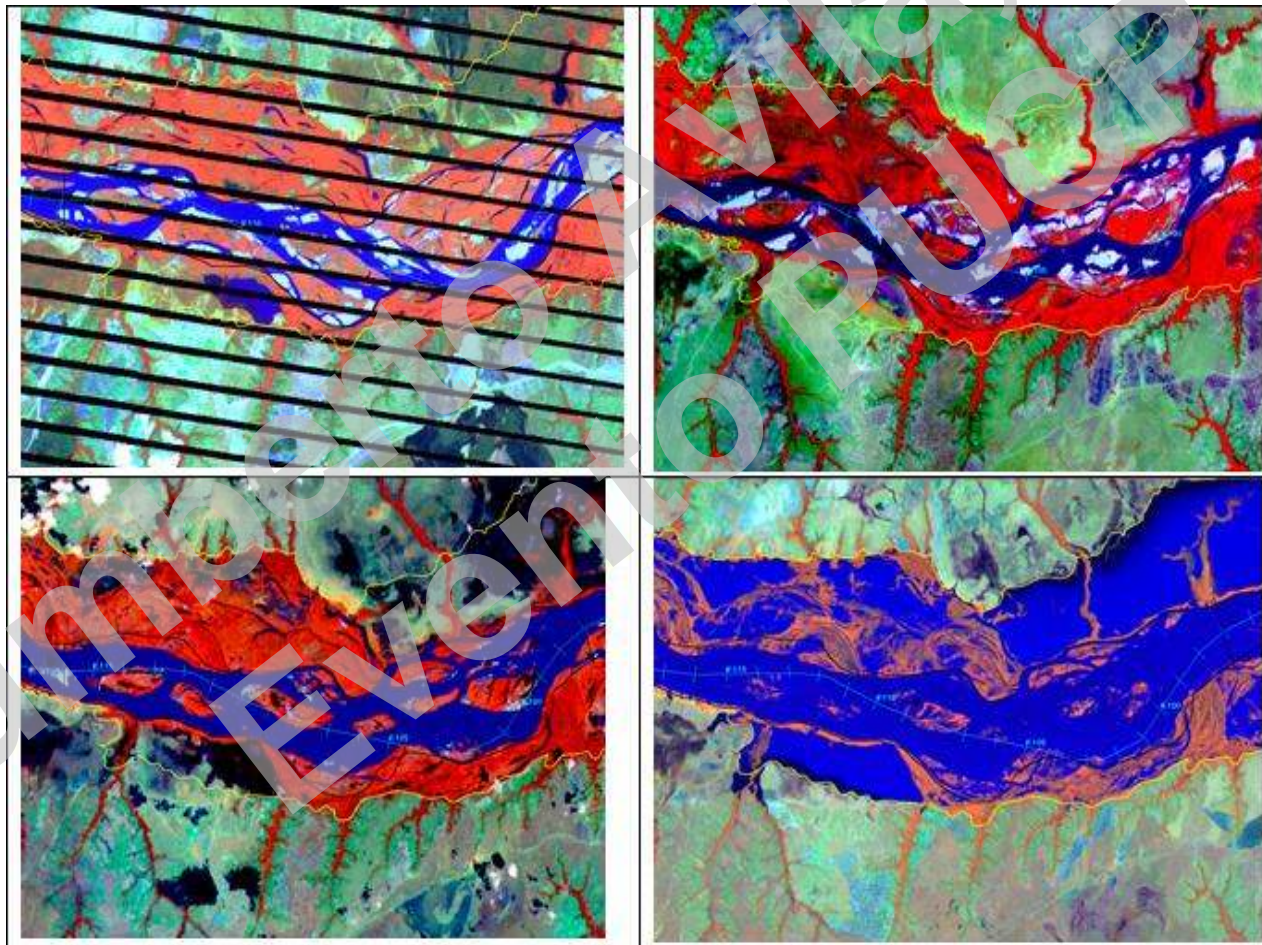


BRAIDED Y/O ANASTOMOSADOS



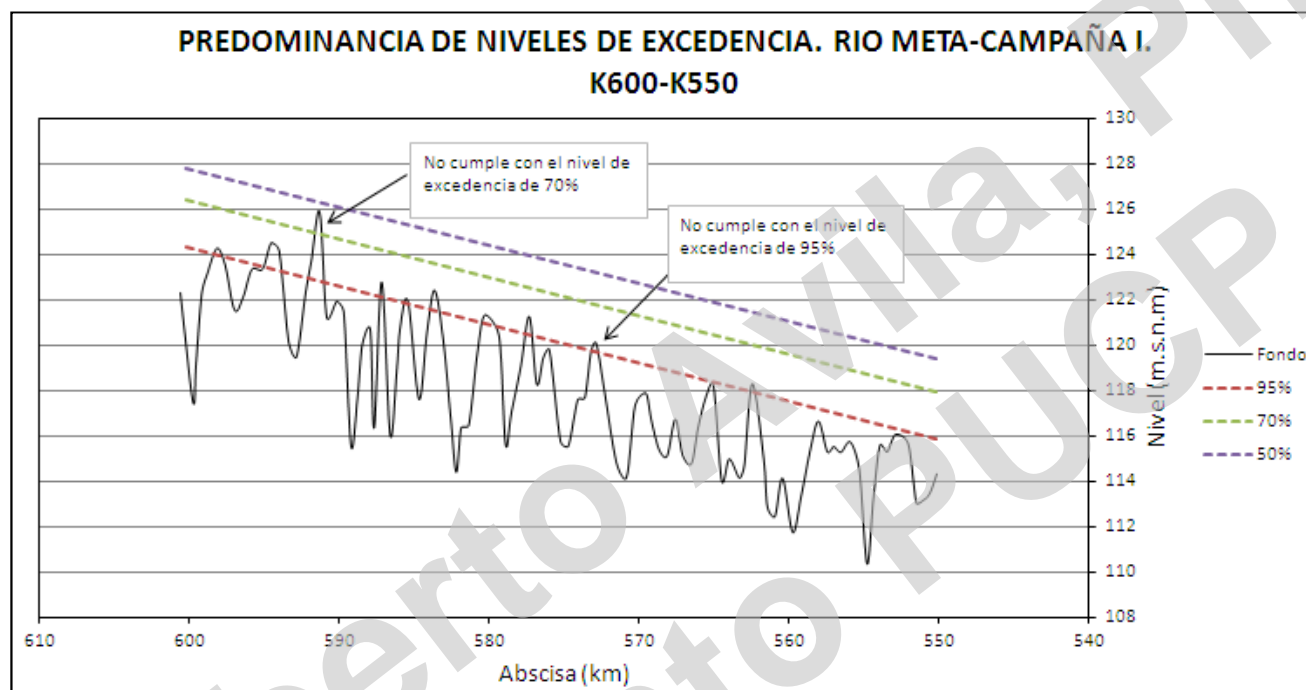
Hidrología/Geomorfología

Aguas bajas, medias, altas y aguas extremas

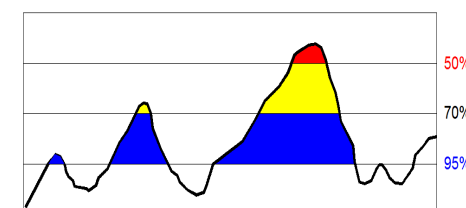
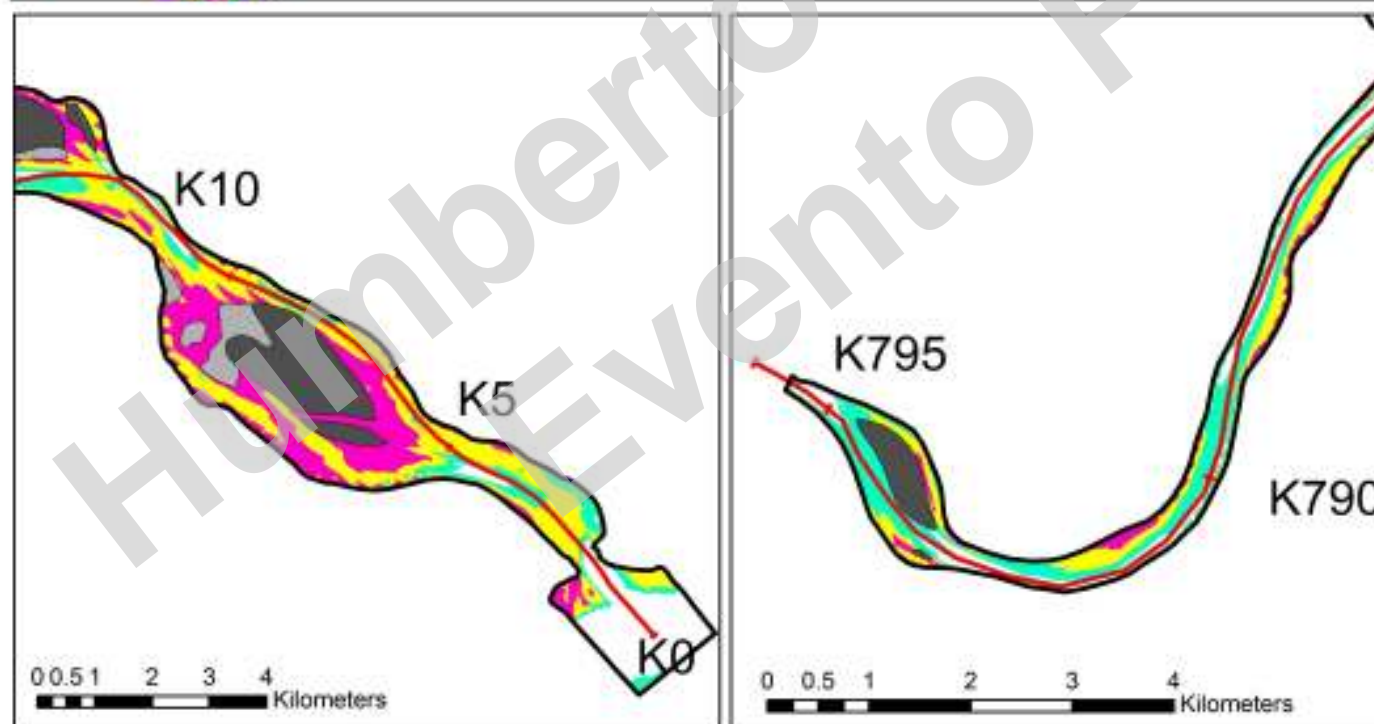
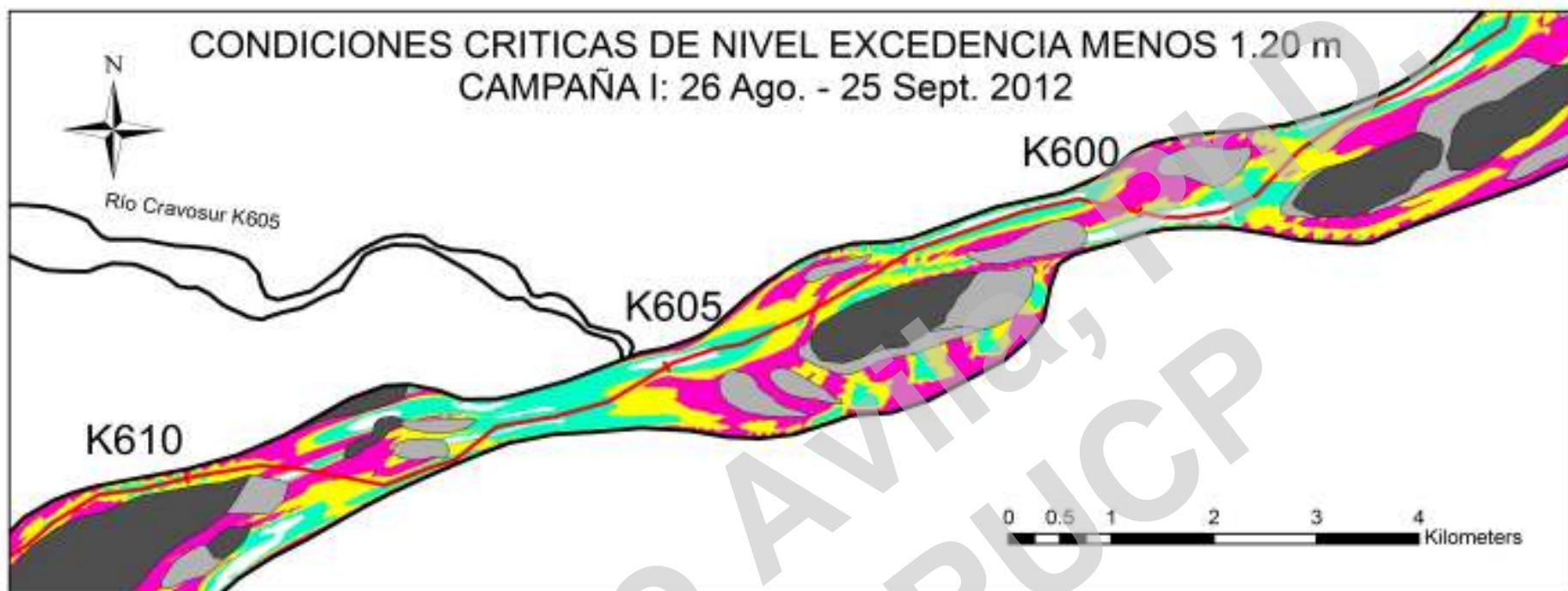


Río Meta

Análisis de Nivel de Reducción Predominante – Campaña I: 26 de Agosto y 25 de Septiembre del 2012

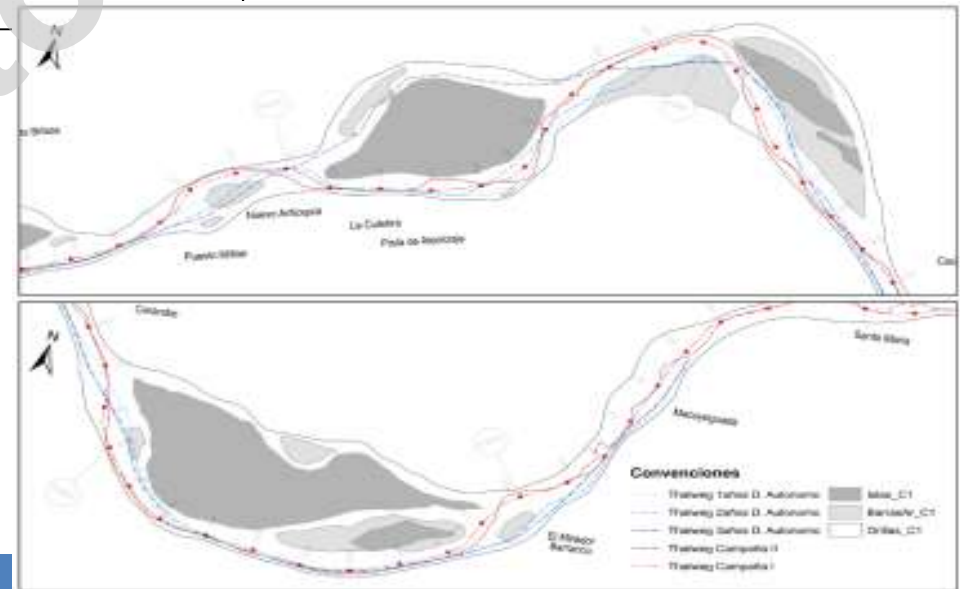


Niveles de excedencia netos	Nivel de Excedencia			Niveles de excedencia con inclusión de calado de 1.2m	Nivel de Excedencia			
	95,0%	70,0%	50,0%		95,0%	70,0%	50,0%	
Porcentaje Que Cumple	86,0%	98,3%	100,0%	Porcentaje Que Cumple	70,0%	92,5%	99,7%	
Porcentaje Que No Cumple	14,0%	1,7%	0,0%	Porcentaje Que No Cumple	30,0%	7,5%	0,3%	
Longitud Que No Cumple	111 Km	14 Km	0 Km	Longitud Que No Cumple	239 Km	60 Km	2 Km	
					Nivel de Excedencia			
				Niveles de excedencia con inclusión de calado de 1.8m				
					95,0%	70,0%	50,0%	
					Porcentaje Que Cumple	58,5%	87,0%	99,4%
					Porcentaje Que No Cumple	41,5%	13,0%	0,6%
				Longitud Que No Cumple	330 Km	103 Km	5 Km	

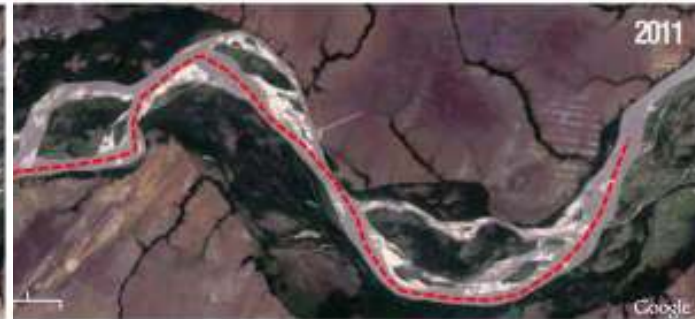
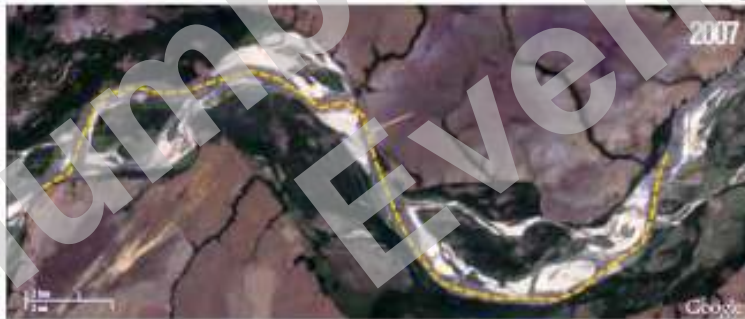
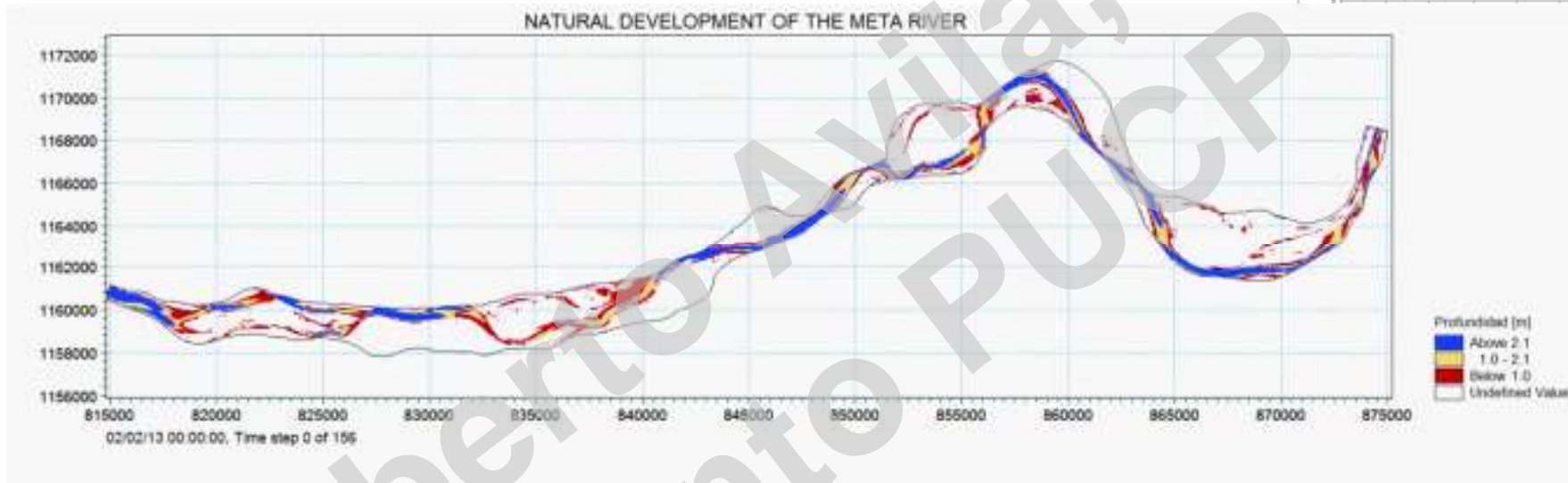


Convenciones

- Thalweg
- Islas
- Barras
- Condición crítica 50% excedencia
- Condición crítica 70% excedencia
- Condición crítica 95% excedencia

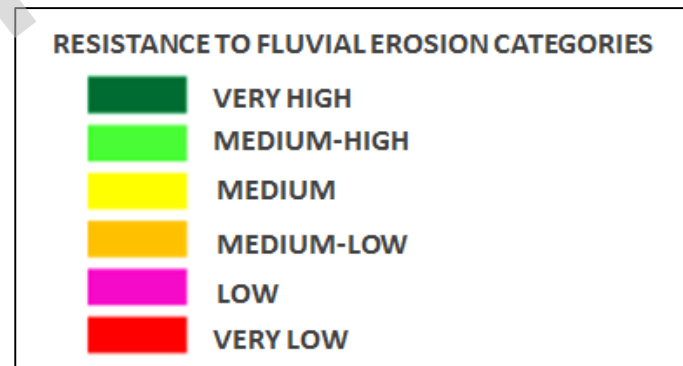
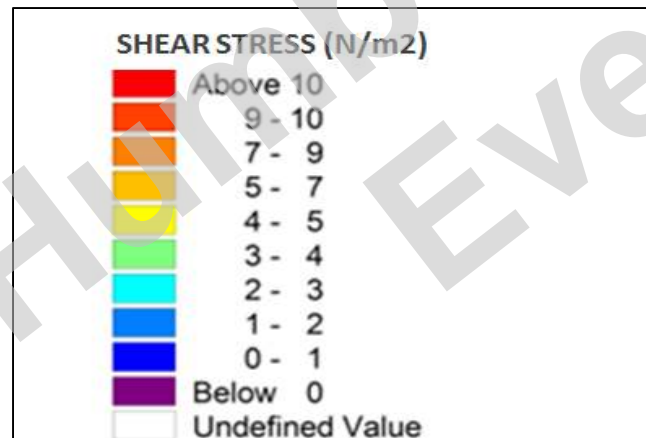
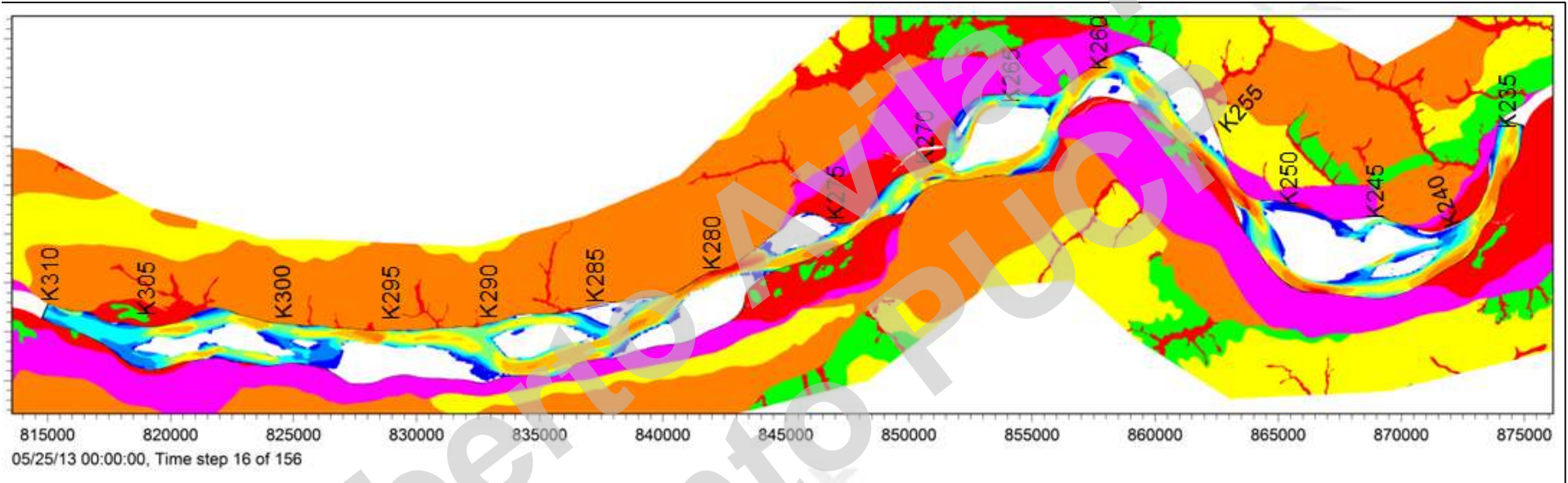


Desarrollo Autónomo - Río Meta

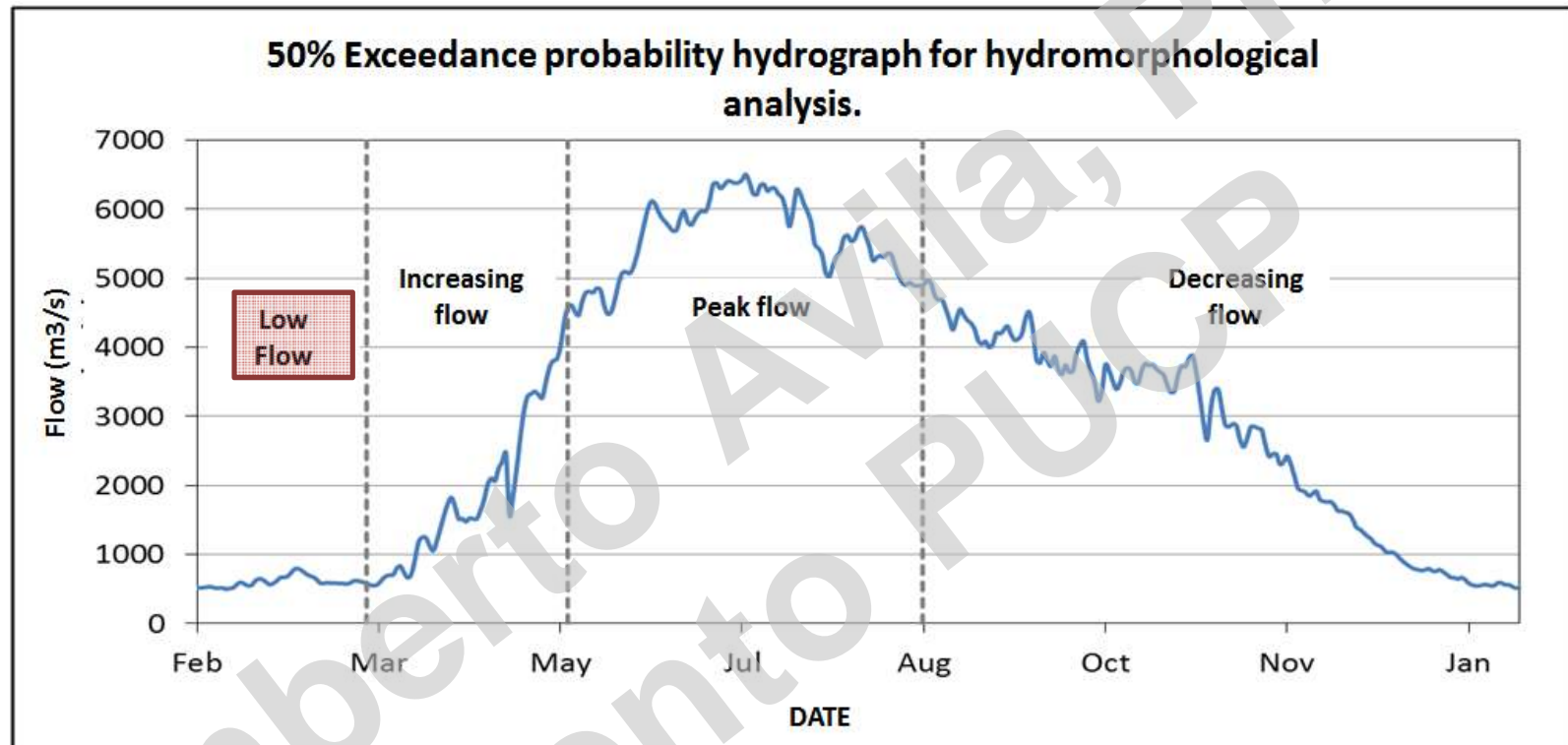


Esfuerzo cortante/Geomorfología

Simulación: 4 meses.



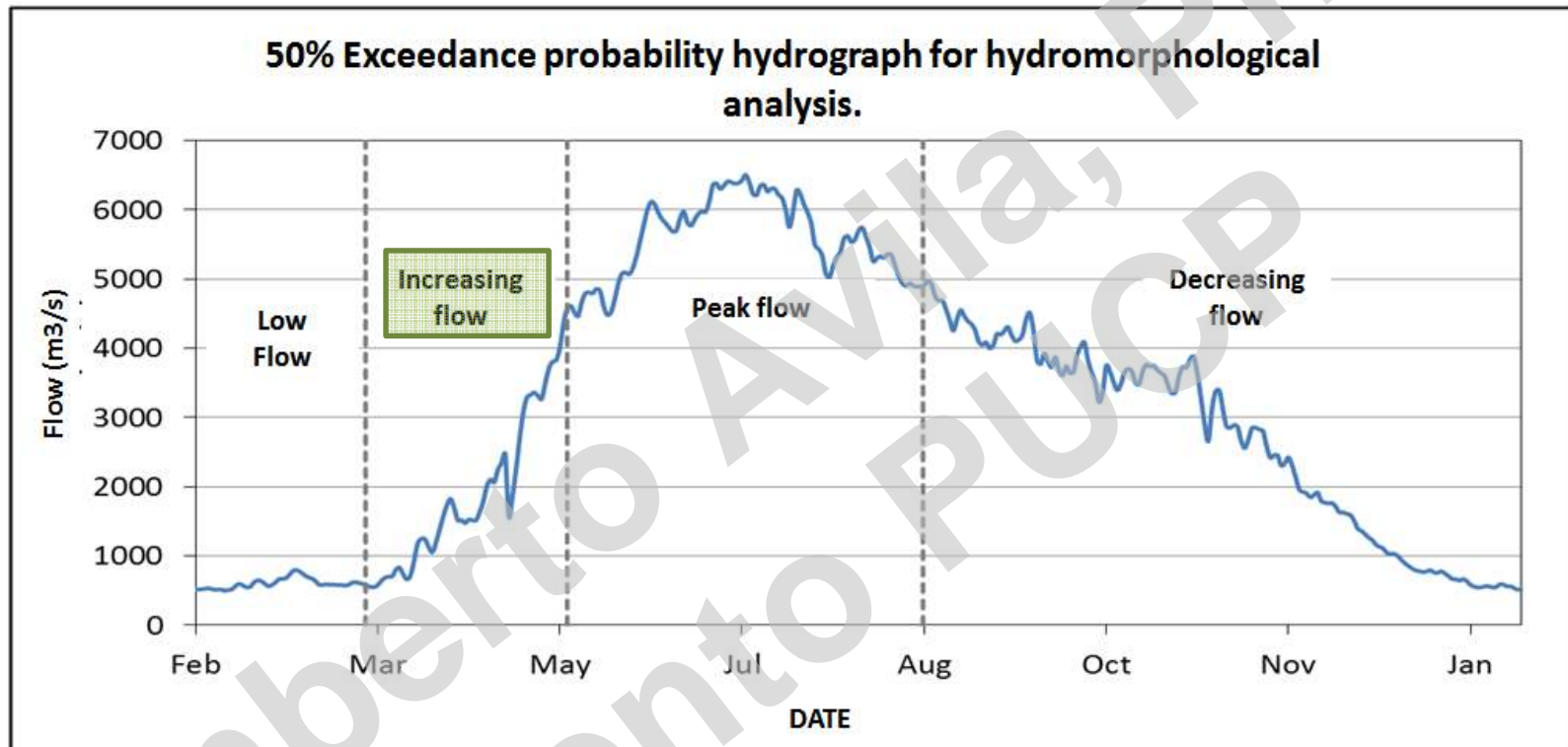
Análisis



Caudales
bajos

- El río concentra el flujo sobre el canal principal del cauce activo, dejando la mayoría de islas y barras de arenas secas.
- La profundidad del agua es menor a 2.0 m para la mayor parte del río

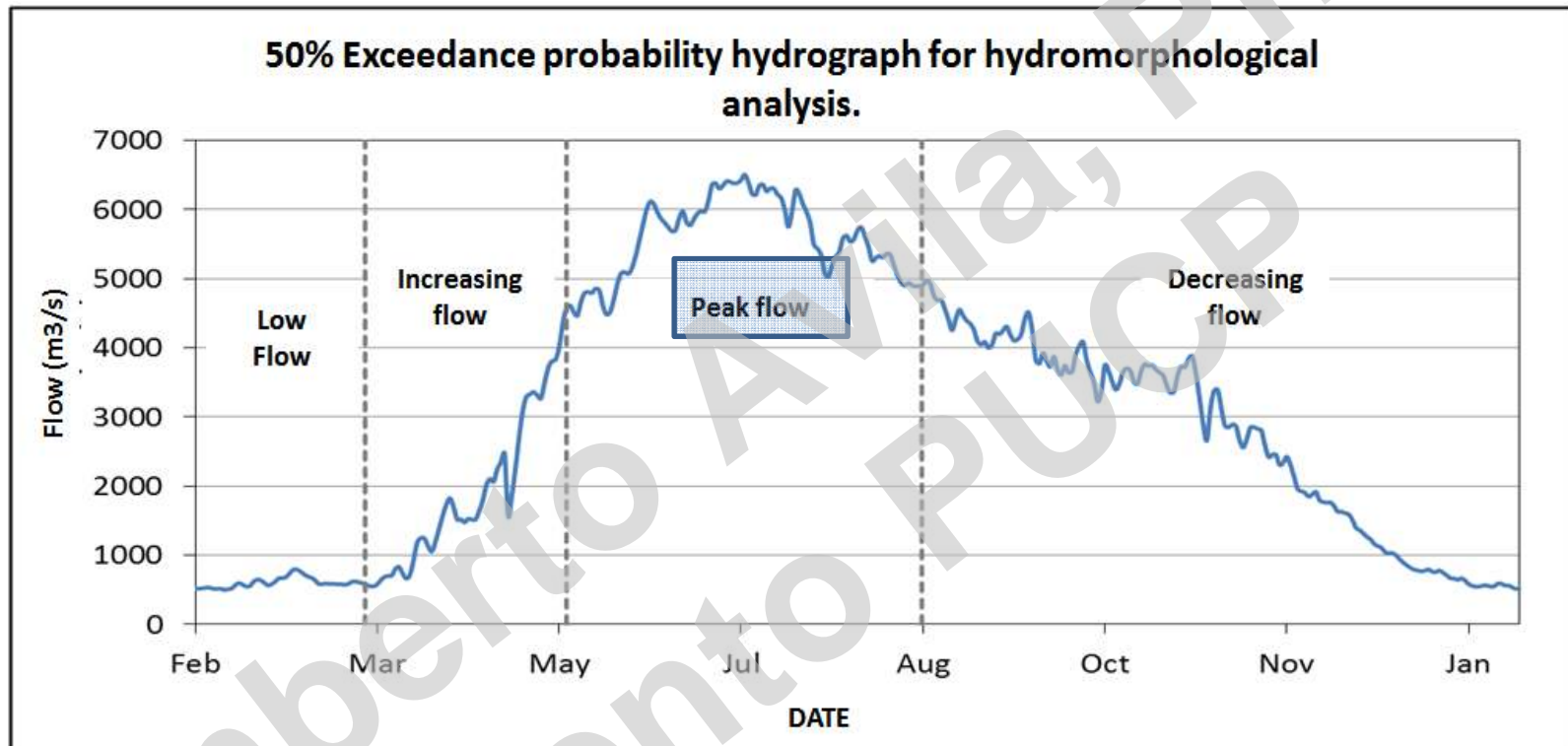
Análisis



Incremento de
caudal

- El transporte de sedimento incrementa causando un incremento en la cota del lecho
- El nivel del agua también aumenta pero más rápido que el lecho, permitiendo profundidades suficientes par navegación.
- El agua empieza a fluir a través de algunos brazos

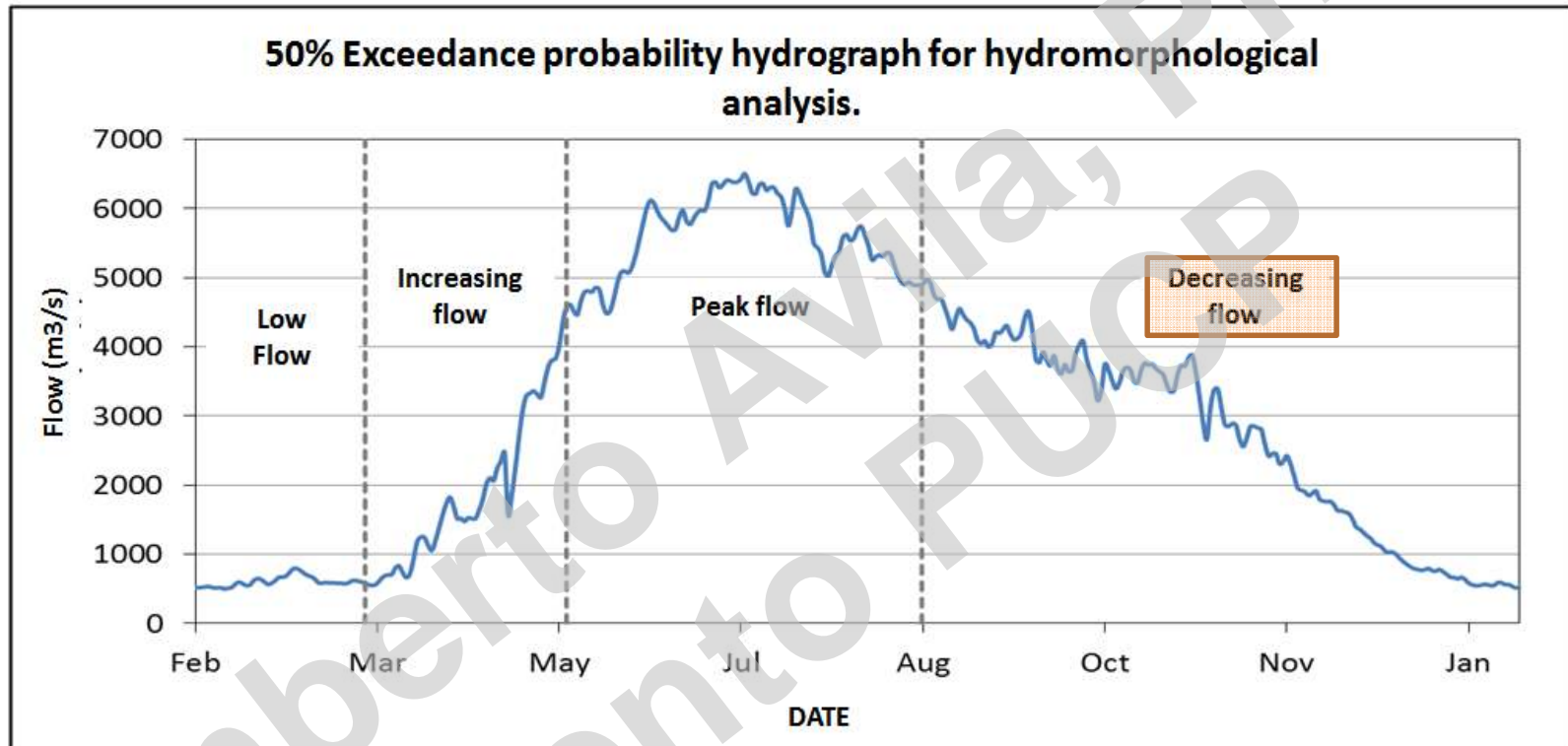
Análisis



Caudal Pico

- La mayoría de los cambios morfológicos ocurren en este período
- Los caudales son más altos y el transporte de sedimento es máximo
- El agua fluye por todos los brazos
- En eventos extremos el flujo cubre todo el lecho mayor

Análisis



**Disminución
del caudal:**

- El nivel del agua decrece rápidamente, generando procesos de erosión/sedimentación en el lecho y en orillas
- La condición del lecho empieza a cambiar para la condición de aguas bajas.
- El caudal empieza a concentrarse sobre el canal principal
- El canal principal puede cambiar de acuerdo con los procesos morfodinámicos ocurridos durante el caudal pico

Alternativas de obras hidráulicas

- **CRITERIOS BASADO EN EL DESARROLLO AUTÓNOMO**

- Dragado progresivo e inteligente
- Cierre de brazos con material dragado
- Incremento de rugosidad
- Monitoreo periódico
- Navegación satelital

SISTEMA SATELITAL DE ASISTENCIA A LA NAVEGACIÓN-SNS



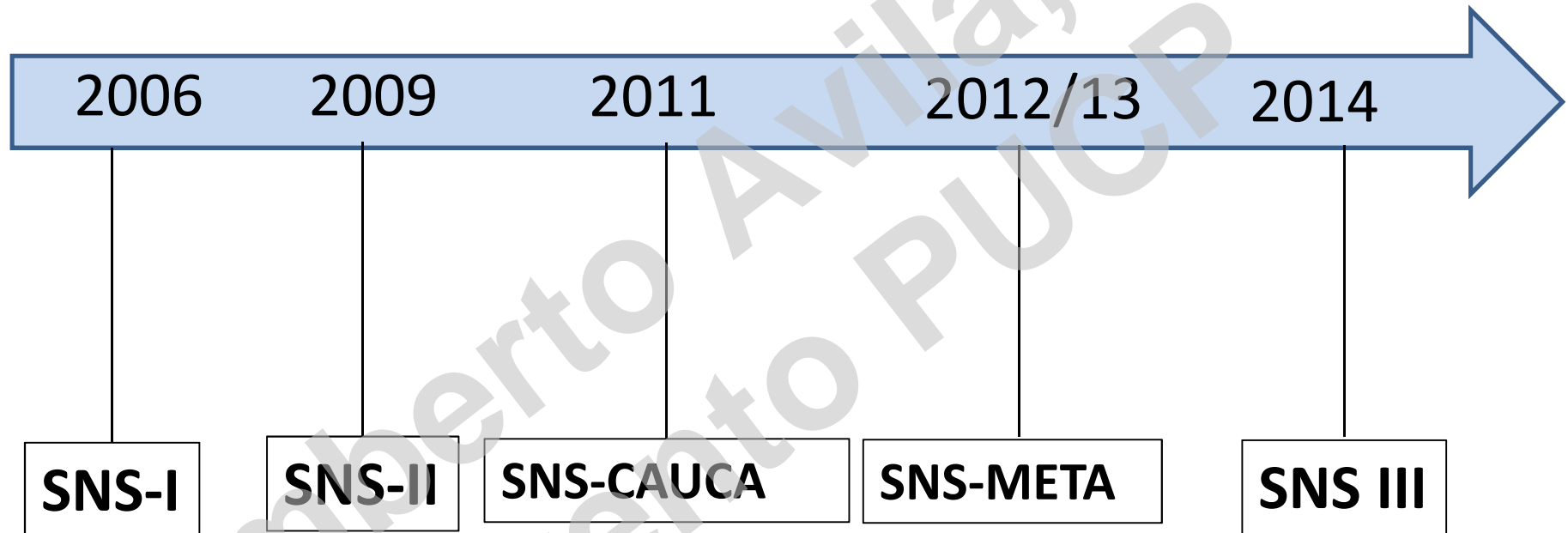
100% Orgullo Caribe



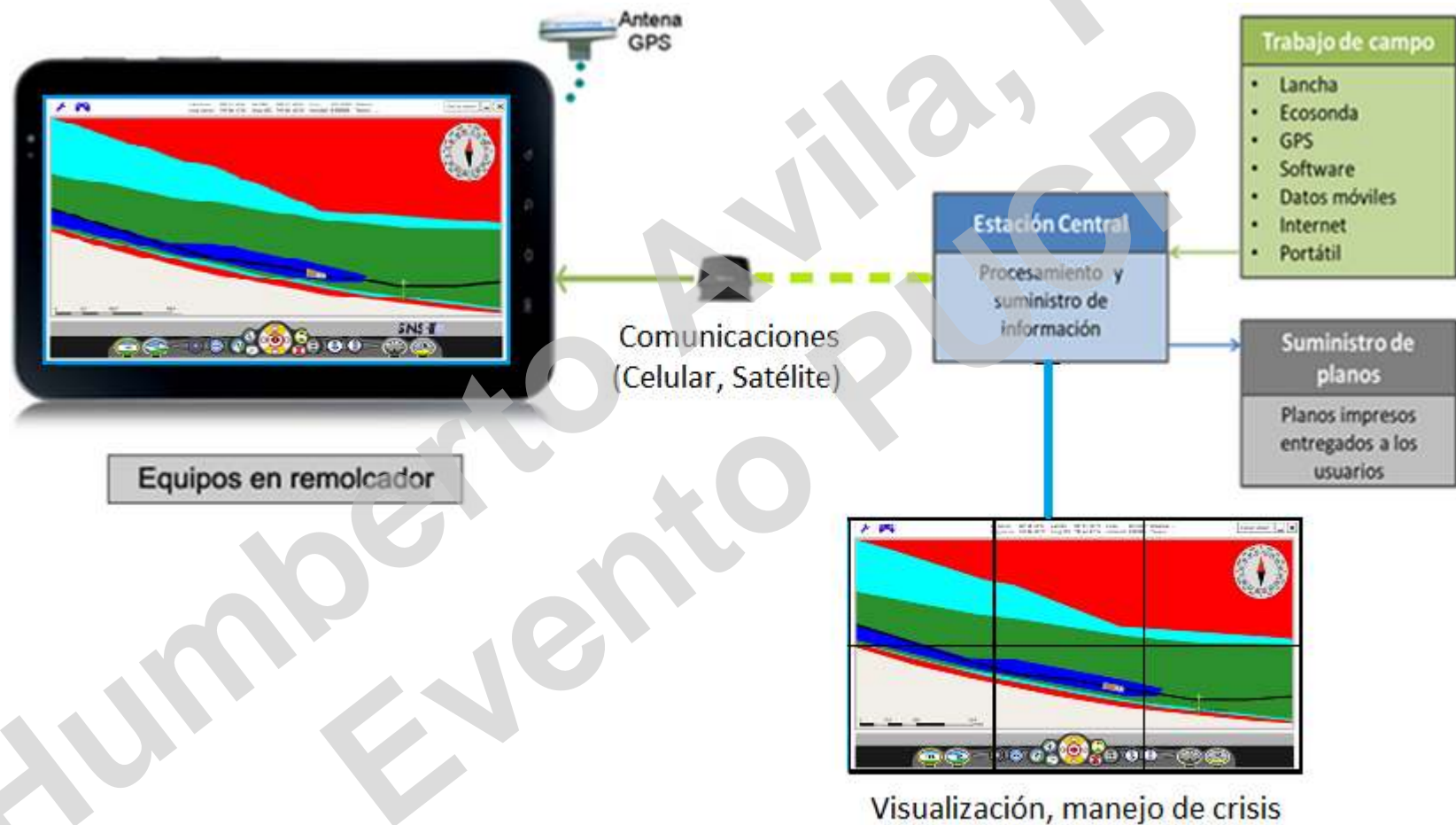
CORMAGDALENA



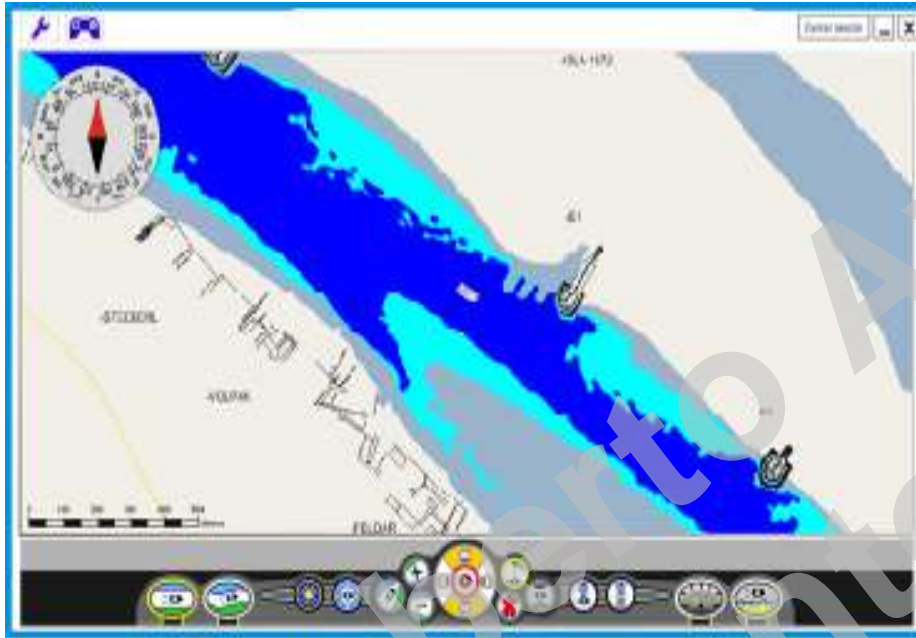
Línea de tiempo de desarrollo del SNS



Arquitectura del SNS-III

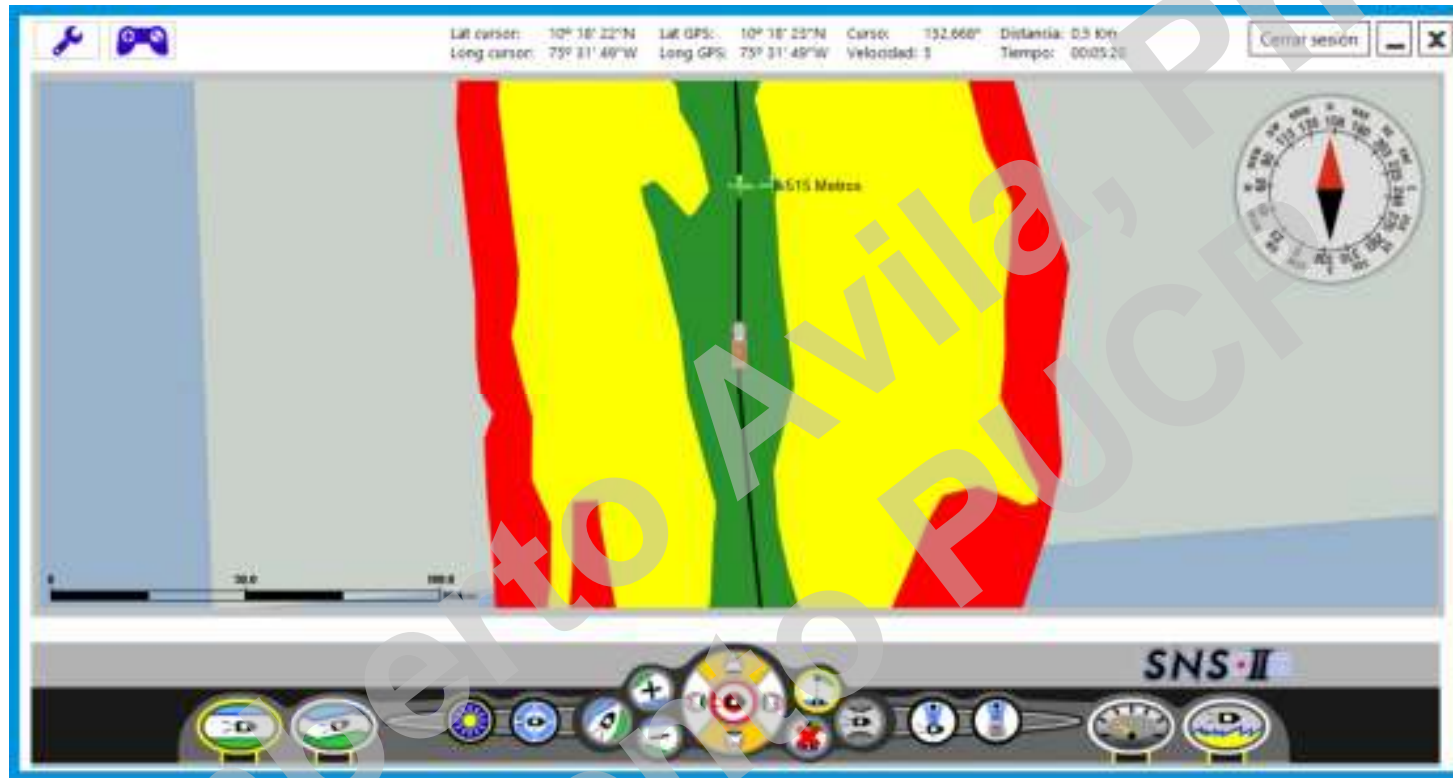


Módulo principal: Mapa de navegación



*Sistema de Información Geográfica (SIG) con las
batimetrías y el canal navegable*

Módulo principal, segmento



Permite la visualización del SIG, seleccionar modo nocturno/diurno, centrado automático de remolcador, medición de distancias, puntos de interés, grabación de recorridos, entre otros.

Módulos complementarios

- **Módulo de Posicionamiento Satelital de Embarcaciones.** Muestra las variables de navegación Velocidad, Rumbo, Latitud y longitud, distancia recorrida, entre otras, en tiempo real.
- **Módulo de Gráficas complementarias:** Curvas de niveles excedidos.
- **Modo nocturno:** Facilita la navegación durante la noche.



PRUEBA Y VERIFICACIÓN DEL SISTEMA Y CAPACITACIÓN



Capitán del barco: Sr. Miguel Sarmiento

El SNS se montó en el **remolcador María Camila** de la empresa NAVIAGRO (rio Meta).

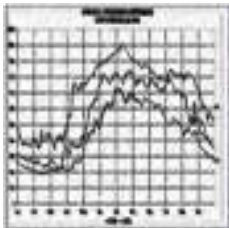
CONCLUSIONES



El conocimiento del DESARROLLO AUTÓNOMO de los ríos permiten proponer obras de navegabilidad sustentables y resilientes a los cambios naturales del río.



La navegación fluvial como parte del transporte multimodal representa una gran fortaleza económica en países con una red fluvial importante que se debe aprovechar.



Es necesario contar con una red de registro e información en tiempo real para mantener el conocimiento de los ríos y contar con pronósticos que minimicen el riesgo en la infraestructura y operación.



Las obras de ingeniería para navegación requieren del soporte de la modelación numérica para su diseño, planificación, operación y seguimiento ambiental.

Muchas gracias!

Humberto Avila, PhD

Director

Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales – IDEHA

Universidad del Norte

havila@uninorte.edu.co