

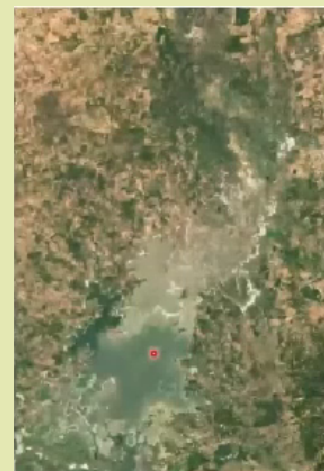
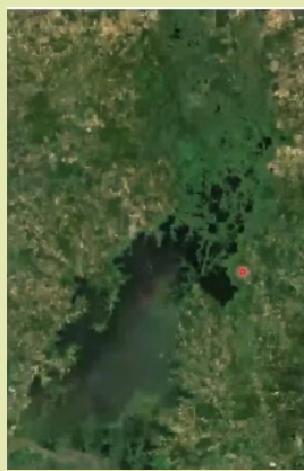
## Modelación ecohidráulica en el complejo cenagoso de Zapatosa

Fuentes-Cabrejo, C. A., Hernández-Castillo, B. E., Díaz-Barríos, M. C., Obregón-Neira, N., Cañón-Hernández, J., Devia-Morato, C., Arias-Patiño, M., Bonilla-Pérez, L. P.

Programa de Modelamiento Ecohidrológico (PMEH), componente 2 – Gestión de la Salud de los Ecosistemas; Proyecto GEF Magdalena-Cauca Vive; Fundación Natura, carrera 21 # 39 – 43, Bogotá D. C., Colombia.

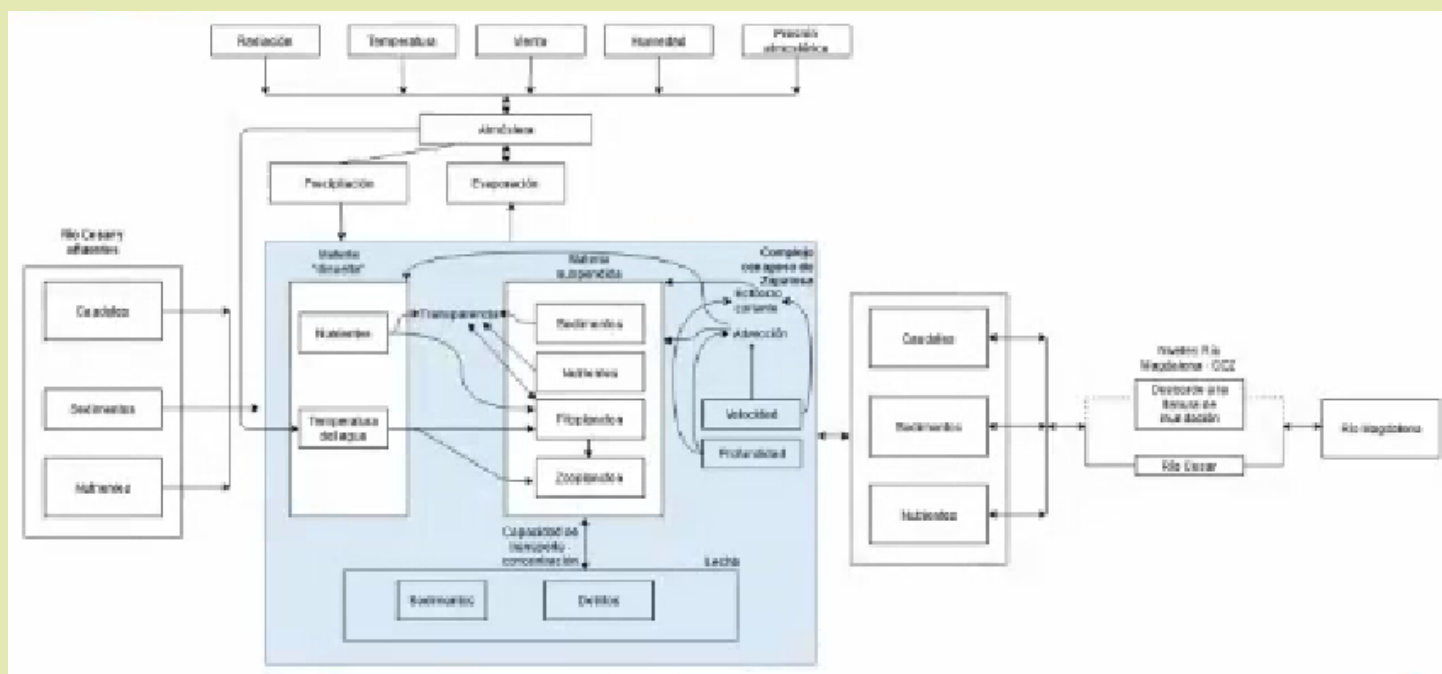
### Procesos físicos identificados en la ciénaga de Zapatosa y contemplados en la modelación

- Expansión y contracción del espejo de agua.
- Patrones espaciales y temporales de la concentración, transparencia del agua y fitoplancton.
- Variabilidad espacial de los factores físicos propiciando diferentes hábitats.



### Generación del modelo conceptual de la ciénaga de Zapatosa

El modelo conceptual presentado identifica las principales variables físicas junto con sus relaciones, determinantes en las condiciones del hidrosistema. Se hace énfasis en los cuerpos de agua con los que el sistema intercambia agua, nutrientes y sedimentos, así como en su relación con la atmósfera, que determinará variables como la temperatura del agua. Se captura parte de la complejidad en cuanto la interacción de variables netamente físicas –velocidad y profundidad, entre otras–, con el crecimiento del fitoplancton; seleccionando los procesos considerados fundamentales.



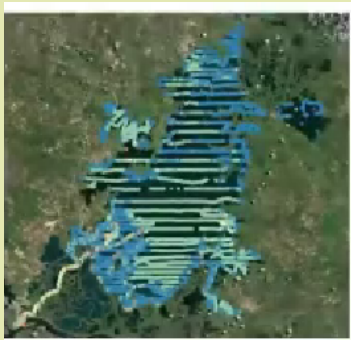
## Generación del modelo conceptual de la ciénaga de Zapatos

- Se implementó una modelación transitoria que permita representar la dinámica del complejo a lo largo del ciclo hidrológico.
- El modelo cuenta con una representación bidimensional y la capacidad de representar geometrías complejas, mediante el uso de mallas no estructuradas.
- Permite el transporte de escalares pasivos (sedimentos, nutrientes, comunidades planctónicas y otros).
- El modelo Open Telemac es de código abierto, lo que permite la implementación de procesos adicionales.
- Eventualmente se pueden expandir las capacidades del modelo desarrollado, como pasar a una representación bidimensional, cálculo de transporte de fondo para la evolución del lecho, entre otros.

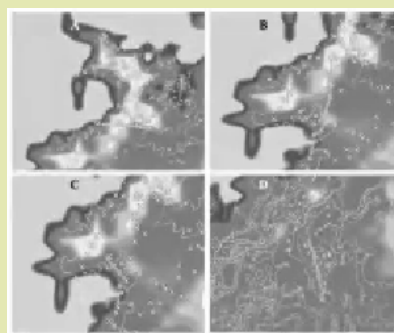
## Requerimientos topografía

- Los modelos hidrodinámicos requieren de una representación fiel del terreno para su correcto funcionamiento, por lo menos a la escala que se quiera modelar.
- La extensión, complejidad del terreno y ubicación dificulta la toma de datos topográficos en campo de forma convencional, pero no son limitaciones para el sensoramiento remoto.
- Algunos aspectos relevantes de un modelo apto para estas modelaciones son: representación de conexiones; formas del lecho (en modelos de escalas más finas); certeza en los volúmenes de los cuerpos de agua; pendiente del terreno y la alta precisión en la altimetría, tanto absoluta, como relativa.

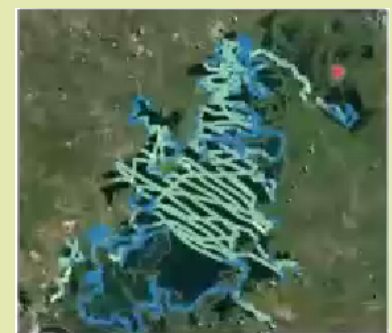
## Insumos disponibles para la construcción del modelo topo-batimétrico.



Ideam, 2005.



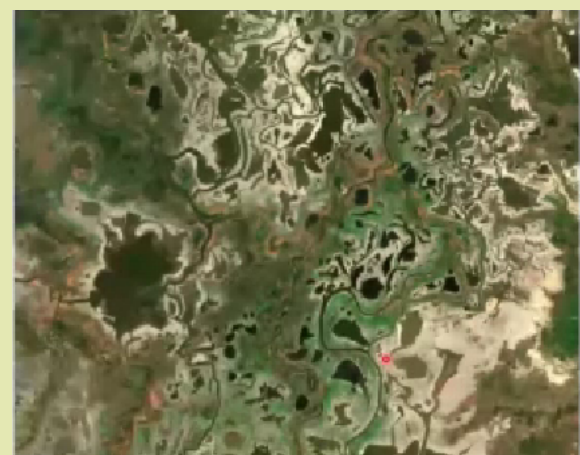
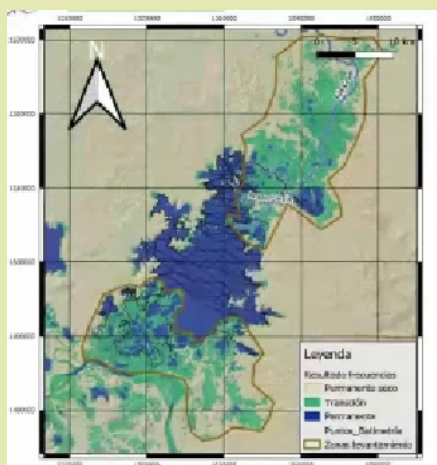
UNAL, 2007.



Ideam, 2014.

## Falencias de la información

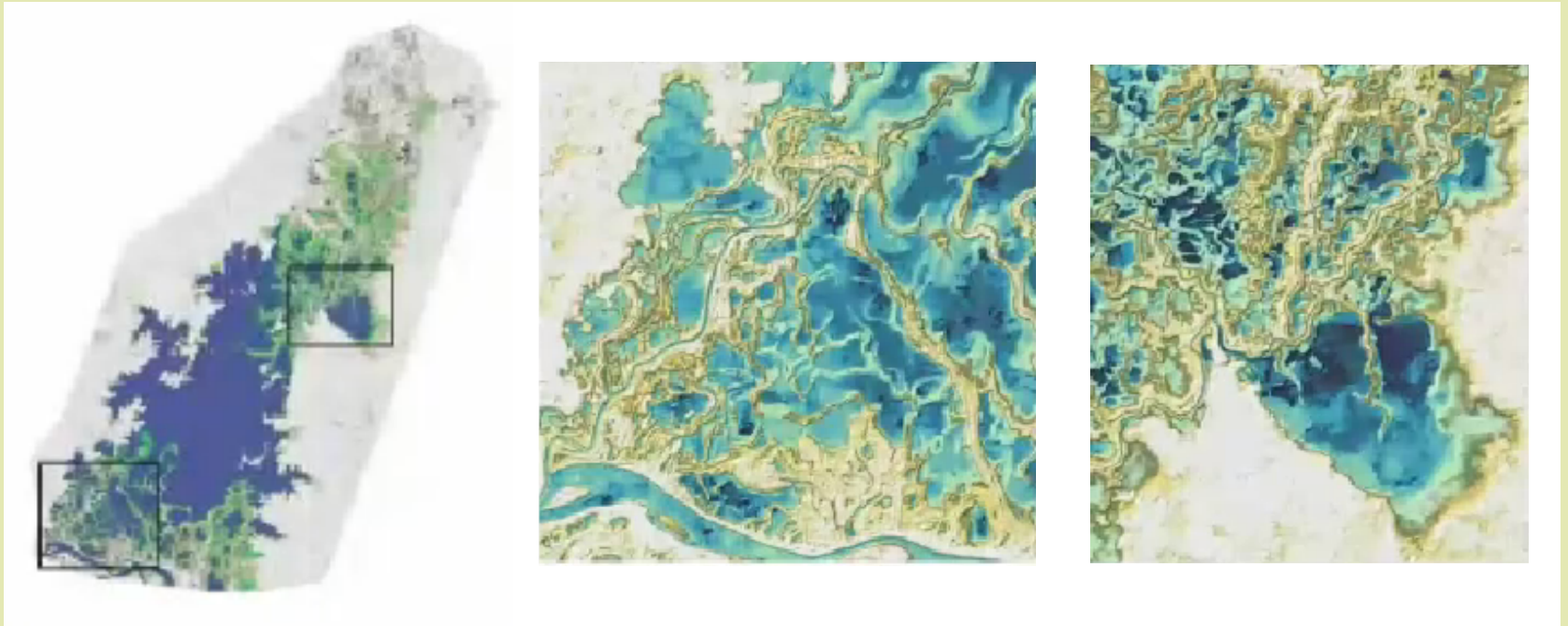
Se requirió complementar la información del complejo, especialmente en dos zonas: la parte norte y la parte sur, que en total cubren casi 400 km<sup>2</sup> y presentan alta complejidad, al estar conformadas por pequeñas ciénagas y múltiples caños que las interconectan.





## Generación del modelo conceptual de la ciénaga de Zapatos

Construido a partir de la información batimétrica colectada en campo, de imágenes satelitales y levantamientos batimétricos de otros estudios realizados en la ciénaga de Zapatos.



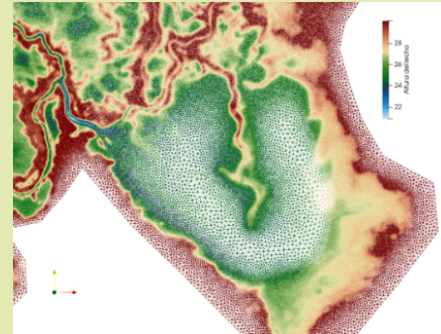
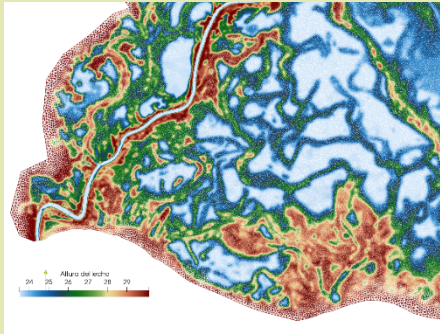
## Validación del modelo de elevación digital

Mediante levantamiento topográfico con escáner láser se realizó un levantamiento en campo detallado y preciso de algunas zonas, cuyos datos concretos se compararon con los del modelo de elevación digital generado por el proyecto, el cual cubre todo el complejo cenagoso, mostrando en forma relativa buena coherencia con lo observado.



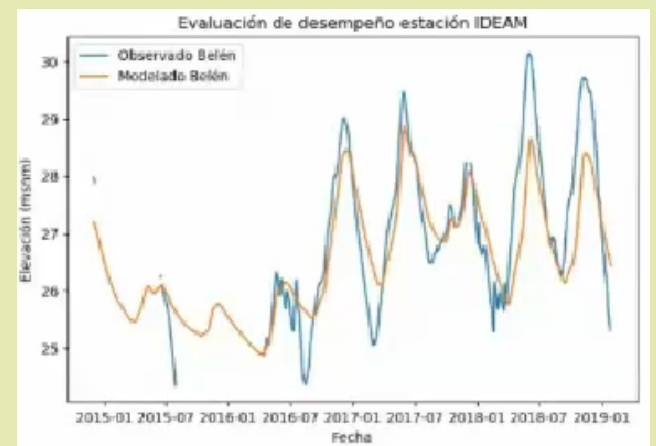
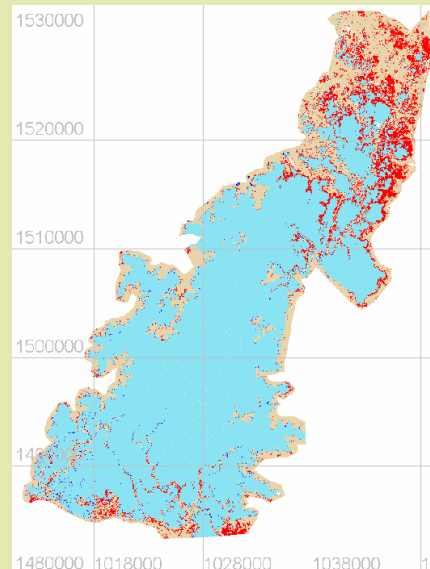
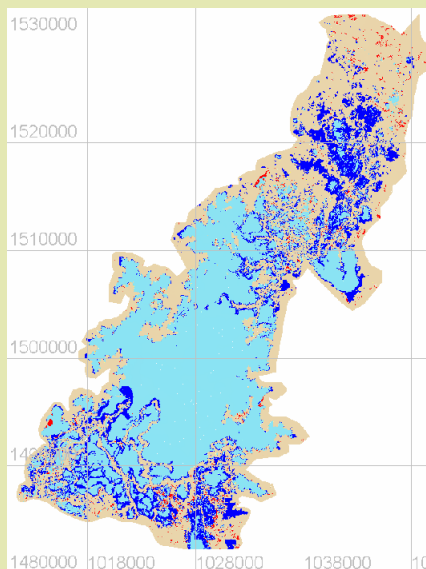
## Configuración del modelo hidrodinámico

Se empleó una malla no estructurada que permite refinar zonas en función de su complejidad. Los caños y otros cuerpos, como el río Cesar, tienen una resolución más detallada que las ciénagas.



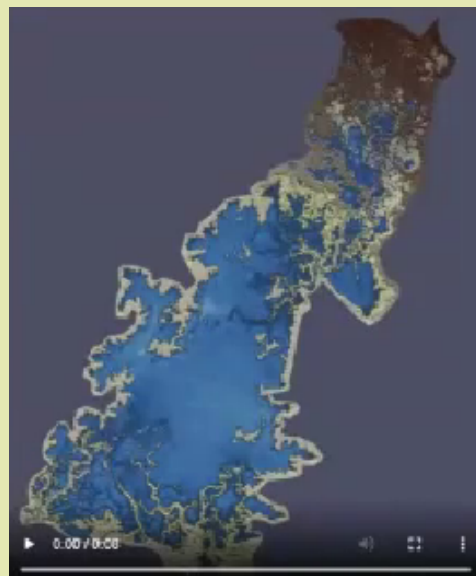
Se ajustó el parámetro del coeficiente de rugosidad de Manning en las etapas de calibración y validación del modelo hidrodinámico. Se adoptaron funciones objetivo:

- Comparación de la extensión del espejo de agua con imágenes satelitales a lo largo del ciclo hidrológico, que se cuantificó mediante la métrica F de la matriz de confusión.
- Comparación de los niveles observados y modelados para la estación de Belén, que se cuantificó mediante el error cuadrático medio (RMSE).



## Configuración del modelo hidrodinámico

- Condiciones de frontera aguas abajo de series de niveles provenientes de la estación de El Banco, sobre el río Magdalena.
- Condiciones de frontera aguas arriba de series de caudales estimados en Rancho Claro, por la modelación hidrológica y otros afluentes que aportan al complejo cenagoso.





## Dinámica de las macrófitas

Las imágenes de radar Sentinel 1 permiten diferenciar las zonas secas de las inundadas. Las macrófitas se pueden identificar en conjunto con el modelo de elevación digital y registros limnimétricos. A diferencia de las imágenes ópticas, las imágenes de radar no presentan limitaciones atmosféricas, por lo que se puede hacer un seguimiento todo el año.

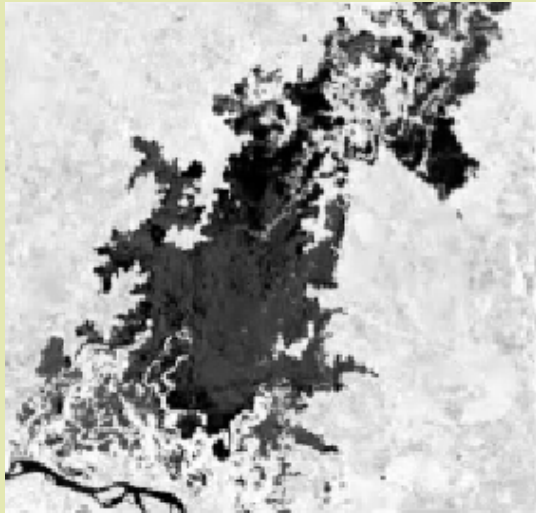


Imagen de radar.



Clasificación de la imagen de radar.



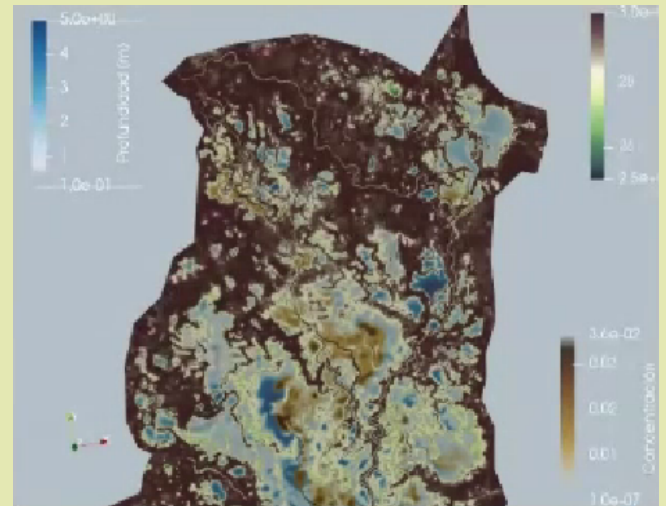
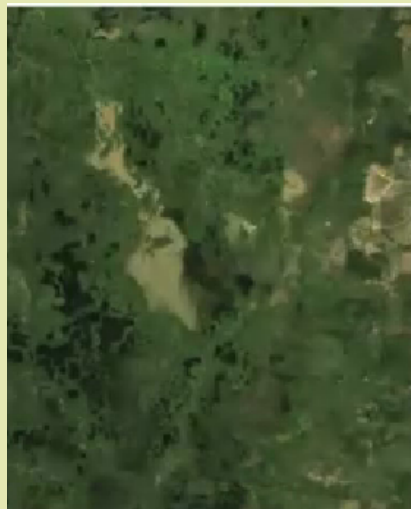
Contraste de las fuentes de información.  
Se identifican las macrófitas.

Se encontró coherencia entre el viento y la disposición espacial de las macrófitas en el 60% de las imágenes analizadas que presentaban macrófitas. El viento domina fuertemente el proceso de desplazamiento de las planta acuáticas, pero no siempre es el responsable de que se encuentren en diferentes zonas de la ciénaga.

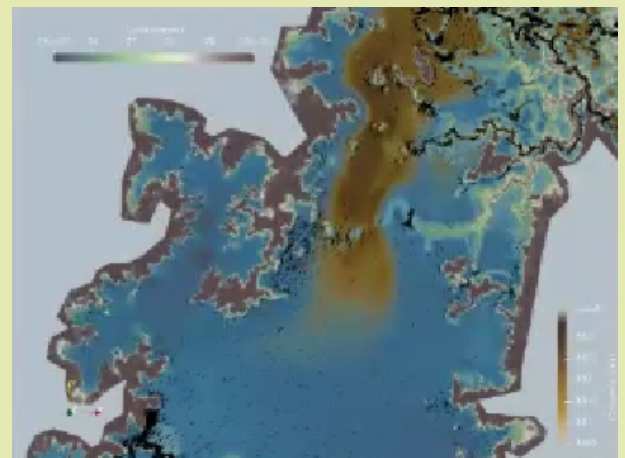
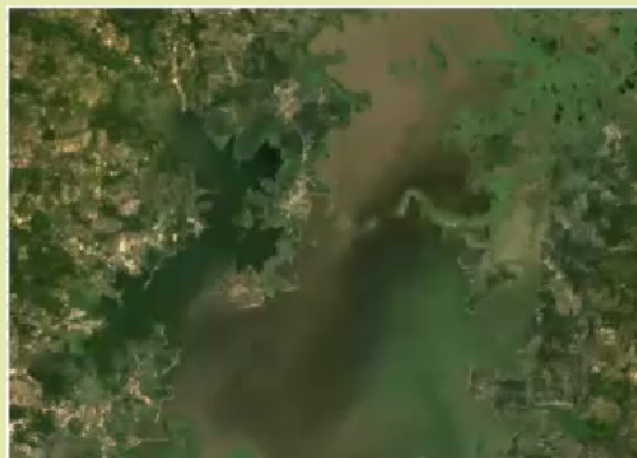
## Acoples desarrollados

En conjunto con la hidrodinámica y el aporte de los afluentes, se explica bien el fenómeno del transporte de sedimentos en suspensión. Se adaptó el código para calcular la limitación por luz del fitoplancton de manera dinámica, en función de la concentración modelada, mejorando la representación de los patrones espaciales.

Sector Ciénaga Saloa



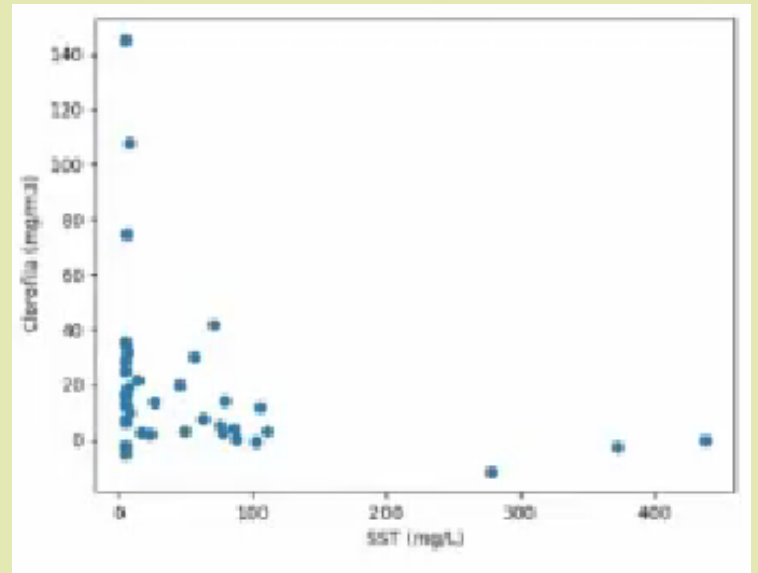
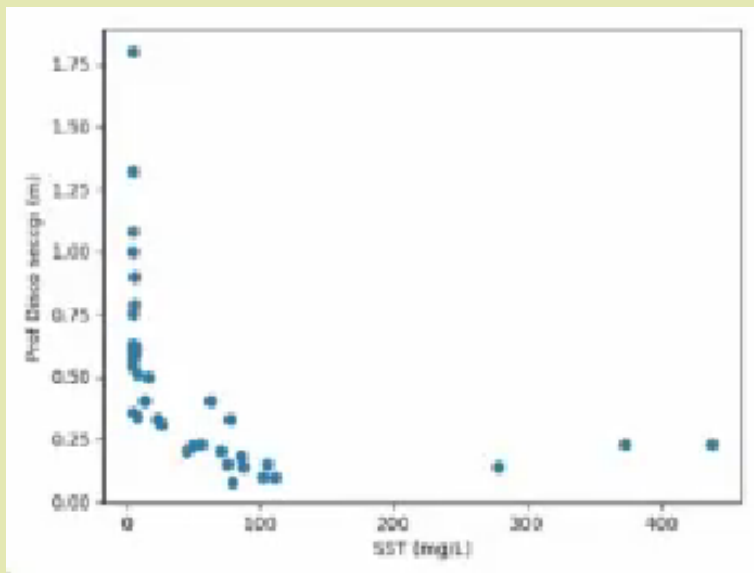
Sector Ciénaga  
Candelaria





## Desarrollo de acoples - fitoplancton

Los datos de campo mostraron una mayor respuesta a la concentración de sedimentos, que a las concentraciones de nutrientes, indicando que la limitación por luz podría ser más relevante.

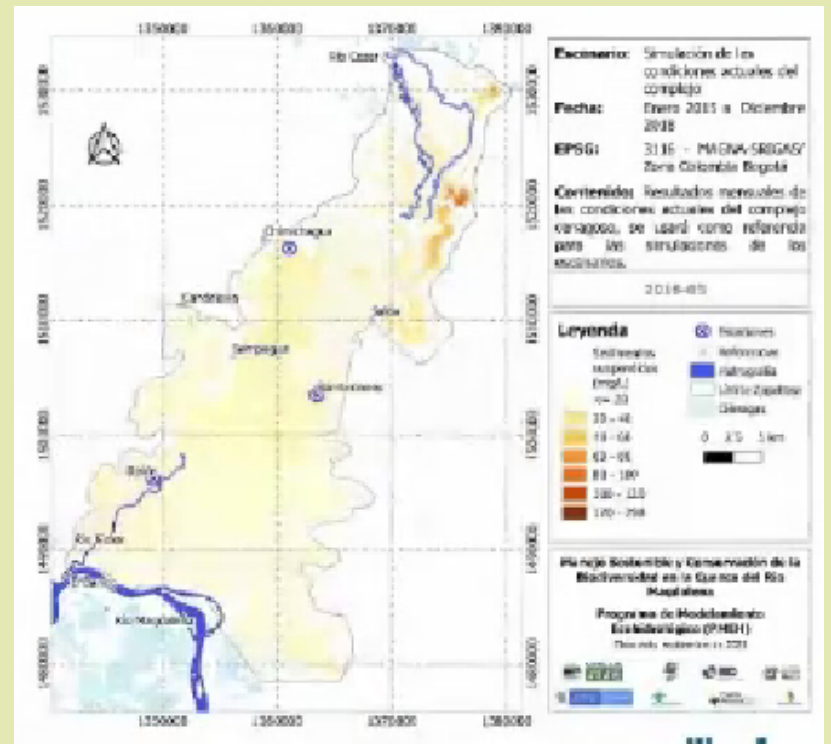
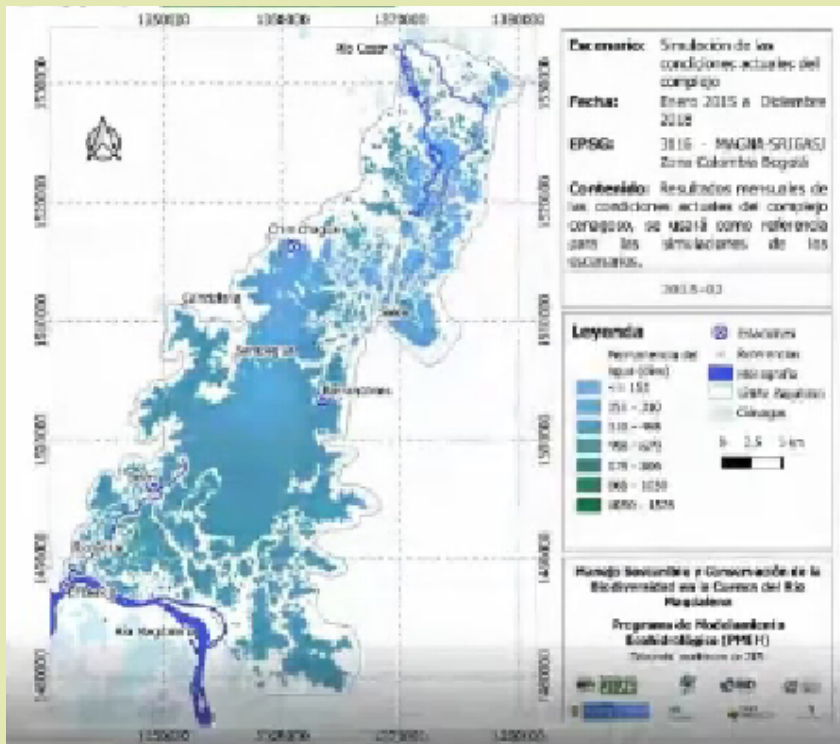


Los patrones de velocidad explican la distribución espacial de los sedimentos y el fitoplancton en sectores del complejo; caso de la ciénaga de Candelaria.



La ciénaga Saloa se encuentra dividida en dos sectores: en la parte occidental se observan concentraciones de fitoplancton, lo cual explica que la transparencia en la columna de agua es mayor; una segunda conexión con el río Cesar, en la parte norte del sector oriental de la ciénaga, explica bien el patrón de circulación, donde el aporte de sedimentos disminuye la transparencia en esta zona, limitando la presencia de las microalgas.

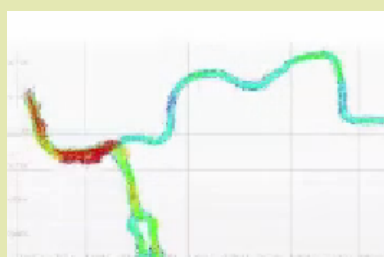
## Desarrollo de acoples - fitoplancton



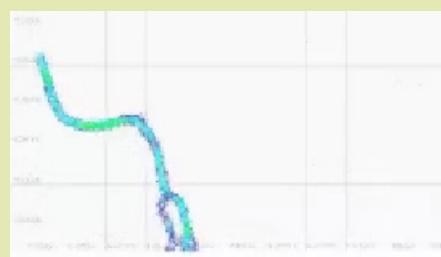
Las concentraciones de sedimentos cambian a lo largo del ciclo hidrológico. El sector occidental de la ciénaga tiene una descarga bastante importante, tanto en el sur, como el norte del complejo. Variables como la residencia permiten identificar zonas donde el agua está más tiempo dentro del complejo sin recambio alguno o escaso.

## Evaluación de escenarios

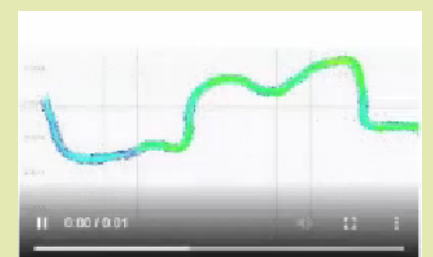
Actualmente el río Cesar presenta una bifurcación a la altura de la población de Rancho Claro, donde la distribución de caudales es favorable para el caño El Cachaco, significando esto una modificación con respecto al cauce normal y definido, el cual llega a casi 0 los caudales en el Río Cesar para los periodos de aguas bajas. Se plantean un par de escenarios en los que se estudian el caso de cierre de cada uno de los brazos, encontrando mayores diferencias para el cierre del Caño El Cachaco, al carecer el río Cesar de la capacidad hidráulica para transportar la totalidad del caudal.



Escenario Base

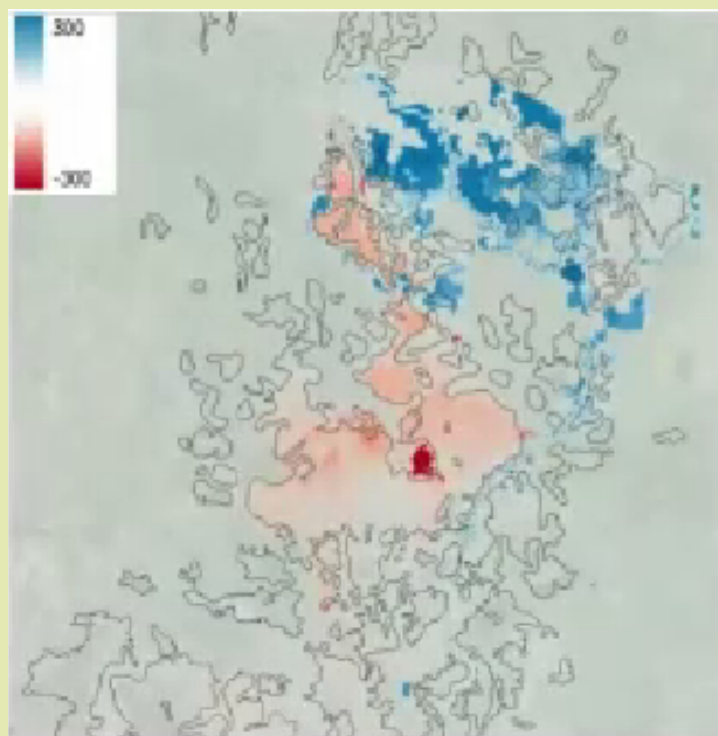


Cierre Cesar



Cierre Cachaco

Gran parte de la zona norte del complejo cenagoso está alimentada por el caño El Cachaco. El cese de agua del aporte del río Cesar por este afluente puede tener serias implicaciones en el tiempo de residencia de este sector (directamente calculado por el modelo), y eventualmente otras variables que definen la calidad de agua de esta zona.



## Conclusiones

- Muchos de los patrones espaciales que se evidencian en la ciénaga están explicados por la hidrodinámica de la misma.
- La correcta representación de la concentración de sedimentos en el complejo mejora la capacidad predictiva de otras variables fundamentales, como la biomasa de fitoplancton.
- El ejercicio de modelación permite comprender muchos de los fenómenos presentes, además de anticipar los efectos de intervenciones en el hidrosistema, mediante la aproximación de escenarios.
- Los sensores remotos se presentan como un recurso de gran relevancia para monitorear y estudiar este tipo de sistemas, sin ser su extensión una limitante.

## Agradecimientos

Proyecto GEF Magdalena-Cauca Vive, componente 2: Salud y Gestión de los Ecosistemas; Programa de Modelamiento Ecohidrológico (PMEH); Instituto Javeriano del Agua; Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales); profesor Nelson Obregón.