

ALGORITMOS Y APLICACIONES PARA EL MONITOREO DE VARIABLES ESENCIALES DE LA BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES

Centro de Análisis y Síntesis (CAS) - Laboratorio de
Genética de la Conservación
Programa de Gestión de Información y Conocimiento



Convenio interadministrativo 13-014 (FA 005 de 2013) Instituto de Investigación de Recursos
Biológicos Alexander von Humboldt - Fondo Adaptación

Subdirección de Servicios Científicos y Proyectos Especiales
Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
Bogotá, D.C., 2014



Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt

PRODUCTO: ALGORITMOS Y APLICACIONES PARA EL
MONITOREO DE VARIABLES ESENCIALES DE LA
BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES

DESCRIPCIÓN GENERAL

Sergio Enrique Rojas Sánchez, María Helena Olaya Rodríguez, Roberto Carlos
Jaramillo Vásquez, Leidy Johanna Arroyave Suarez

Centro de Análisis y Síntesis (CAS) - Laboratorio de Análisis Espacial

Programa de Gestión de Información y Conocimiento

Instituto Humboldt

Julio de 2014

Sede Principal: Calle28A#15-09 Bogotá, D.C., Colombia | PBX: (57)(1) 3202767 | NIT 820000142-2



DESCRIPCIÓN GENERAL

Este producto está conformado por documentos que abarcan tres grandes bloques: el primero es el marco general, en el cual se describen aspectos que permiten situar el producto en el contexto normativo, científico y técnico. El segundo bloque se ha denominado marco específico, en éste se abordan en sí las aplicaciones-algoritmos orientados al monitoreo de las variables esenciales de la biodiversidad en humedales, desde lo conceptual y metodológico, junto con una descripción detallada de los procedimientos asociados, lo que permite replicar tales aplicaciones en diferentes ámbitos geográficos. Al final de cada documento del marco específico se presentan ejemplos concretos de la aplicación en zonas determinadas, a excepción del documento sobre perturbaciones de los ecosistemas. El tercer bloque corresponde a actividades adicionales llevadas a cabo para el desarrollo del producto.

La estructura general del producto se resume en la Tabla 1, en la que se observan las secciones abordadas, la sección resaltada en naranja no se encuentra totalmente finalizada.

CONTEXTO		CAPITULO	
Marco General			LA NECESIDAD DE MONITOREAR LA BIODIVERSIDAD DE LOS HUMEDALES EN COLOMBIA
			GEOBON Y LAS VARIABLES ESENCIALES DE LA BIODIVERSIDAD
			ANTECEDENTES NACIONALES DE MONITOREO LA BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES
			ANTECEDENTES NACIONALES DE MONITOREO LA BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES
Marco Especifico	Clase de VEB	VEB	
	Función del ecosistema	Régimen de disturbio	Antecedentes de monitoreo espacial sobre el fuego como regimen de perturbación de los ecosistemas
	Estructura del Ecosistema	Estructura del Hábitat	documento metodológico para el procesamiento y extracción de información sobre biodiversidad en humedales con el uso de datos LIDAR
		Extensión y fragmentación de los ecosistemas	Aspectos conceptuales y metodológicos para el análisis de cambios en la cobertura del suelo documento conceptual y metodológico para el análisis de la fragmentación en humedales
Actividades adicionales		Inventario de imágenes y cartografía sobre cobertura del suelo, ecosistemas o paisajes en zonas de aplicación. Protocolo para la descarga de imágenes de sensores remotos Procesamiento de imágenes	

Tabla 1: estructura algoritmos y aplicaciones para el monitoreo de variables esenciales de biodiversidad en humedales

Los documentos que conforman el producto están estructurados para la entrega de la presente versión como se detalla en la Tabla 2.

CAPITULO / CONTEXTO	DOCUMENTOS/ARCHIVOS ASOCIADOS
Marco general	



(Directorio: ALGORITMOS V. ALPHA 0.2 \Marco General)	<ul style="list-style-type: none"> MARCO GENERAL.doc
Aspectos generales sobre disturbios en humedales (Directorio: ALGORITMOS V. ALPHA 0.2\Perturbaciones)	<ul style="list-style-type: none"> DOCUMENTO PERTURBACIONES.docx
Aspectos conceptuales y metodológicos para el mapeo de variables de estructura del hábitat mediante tecnología LiDAR (Directorio: ALGORITMOS V. ALPHA 0.2\ Estructura)	<ul style="list-style-type: none"> DOCUMENTO ESTRUCTURA - LIDAR.docx
Aspectos conceptuales y metodológicos para el análisis de la fragmentación (Directorio: ALGORITMOS V. ALPHA 0.2\ Estructura)	<ul style="list-style-type: none"> DOCUMENTO FRAGMENTACIÓN.docx
Protocolo para la descarga de imágenes satelitales. (Directorio: ALGORITMOS V. ALPHA 0.2\Actividades Adicionales)	PROTOCOLO PARA LA DESCARGA DE IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS.doc Un resultado asociado con este documento fue la descarga de cerca de 3650 imágenes MODIS que cubren los periodos 2001-2013. Los archivos se encuentran en formato HDF, distribuidos en diferentes carpetas de acuerdo al año y zona del país, el volumen de espacio en disco que ocupan los archivos es 400Gb

Tabla 2: estructura de archivos que conforman el producto



PRODUCTO: ALGORITMOS Y APLICACIONES PARA EL
MONITOREO DE VARIABLES ESENCIALES DE LA
BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES

DOCUMENTO MARCO GENERAL

1

Sergio Enrique Rojas Sánchez

Centro de Análisis y Síntesis (CAS) - Laboratorio de Análisis Espacial

Programa de Gestión de Información y Conocimiento

Instituto Humboldt

Julio de 2014

TABLA DE CONTENIDO

Sede Principal: Calle28A#15-09 Bogotá, D.C., Colombia | PBX: (57)(1) 3202767 | NIT 820000142-2



1.	LA NECESIDAD DE MONITOREAR LOS HUMEDALES EN COLOMBIA	2
2.	GEOBON Y LAS VARIABLES ESENCIALES DE LA BIODIVERSIDAD	4
3.	CÓMO SE CONCIBE EL MONITOREO DE HUMEDALES DESDE LA CONVENCIÓN DE RAMSAR	7
4.	ANTECEDENTES DE MONITOREO LA BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES	11
4.1.	COLOMBIA.....	11
	Monitoreo de inundaciones con tecnologías geoespaciales – IGAC	12
	Sistema para el monitoreo de la deforestación	12
	Sistema para el monitoreo de los procesos de degradación de los suelos y tierras	12
	Sistema Nacional de Prevención y Atención de desastres	13
	Monitoreo de coberturas.....	13
4.2.	ANTECEDENTES INTERNACIONALES DE MONITOREO DE HUMEDALES	13
	Escala Global - Continental.....	13
	▪ Globwetland	13
	▪ Programa MODIS	14
	Escala Nacional	15
	▪ Estados Unidos.....	15
	Escala Sub-nacional y Local	16

TABLA DE FIGURAS

Figura 1: Marco de trabajo de las VEB	6
Figura 2: concepto multiescalar de inventario, evaluación y monitoreo y su interrelación	9
Figura 3: diagrama descriptivo para establecer un programa de monitoreo de un humedal	10

1. LA NECESIDAD DE MONITOREAR LOS HUMEDALES EN COLOMBIA

Colombia posee cerca de veinte millones de hectáreas de humedales representados por ciénagas, pantanos y turberas, madre viejas, lagunas, sabanas y bosques inundados, los cuales proveen múltiples bienes y servicios para el desarrollo de las actividades económicas, así como a las comunidades locales (Minambiente 2002). Los beneficios que ofrecen los humedales radican en el gran número de funciones ecológicas que poseen entre las cuales se tienen: la recarga y descarga de acuíferos, el control de inundaciones,



almacenamiento de agua, retención de sedimentos y sustancias tóxicas, retención de nutrientes, estabilización de microclimas, transporte por agua y ecoturismo..., además ofrecen una serie de servicios tales como: abastecimiento de agua, recursos forestales, forrajes, recursos agrícolas, recursos pesqueros y hábitat de fauna y flora (Guerrero 1998).

Lamentablemente los humedales se encuentran altamente amenazados, según Guerrero (1998) en Colombia se había perdido o alterado parte de dichos ecosistemas debido al deterioro en los procesos naturales como consecuencia de la agricultura y la ganadería, la urbanización, la contaminación, la construcción de represas, la adecuación de tierras para infraestructura turística, la desecación y otras formas de intervención en el sistema ecológico e hidrológico así como la caza y la pesca incontroladas. Así mismo, la falta de una planificación adecuada y la utilización de técnicas inapropiadas de manejo ha repercutido también en la afectación a estos sistemas locales (Minambiente 2002).

Como consecuencia de la alteración del equilibrio natural de los humedales, particularmente de su potencial de regulación hídrica y los fenómenos de variabilidad y cambio climático, en el país se han presentado situaciones de alto impacto entre las cuales lo más representativo en las últimas décadas es el fenómeno de la niña 2010 -2011, en el cual, de acuerdo al Sistema Nacional de Atención y Prevención de Desastres (2011¹) la abundancia de lluvias y su larga duración ocasionaron un desastre en el país que dejó 469 muertos, 575 heridos, más de 80 desaparecidos, 3,6 millones de personas afectadas, 491.592 viviendas averiadas y 13.351 destruidas, más de un millón de hectáreas inundadas y un total en pérdidas que superan los cinco mil millones de dólares. Adicional a los efectos directos sobre el ser humano, las alteraciones en la estructura y funcionamiento de los humedales tienen, en numerosos casos, efectos adversos sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

3

Bajo estas circunstancias es necesario desarrollar mecanismos orientados a identificar el estado de los humedales y su comportamiento a través del tiempo, lo que es posible solo implementando sistemas de monitoreo. La necesidad de un sistema de monitoreo de los humedales se ha identificado ya desde hace varios años, la política nacional de humedales de Colombia, formulada en el año 2001 planteaba como meta "Diseñar, establecer y estandarizar indicadores para determinar y evaluar el cambio en las características ecológicas de los humedales, y las repercusiones de los factores y fenómenos que los afectan", para lo cual se planteaba el "diseño de sistemas de monitoreo de acuerdo a los problemas prioritarios de cada uno de los complejos de humedales propuestos, paralelamente al proceso de caracterización de los mismos, con el fin de generar la información necesaria para seguir la evolución de las tendencias de los ecosistemas de humedales y sus implicaciones socioeconómicas" (Minambiente 2002).

No obstante, años después de la formulación de la política nacional de humedales de Colombia, el monitoreo de los humedales del país es aún incipiente y la mayoría de iniciativas se limitan a planes de manejo para humedales específicos. Esta situación es grave por la continua afectación de los humedales y sus servicios ecosistémicos, y por la falta de disponibilidad de datos para la toma de decisiones acertadas, orientadas a reducir el deterioro de los humedales del país, pero además porque en la práctica se hace poco probable el cumplimiento de los compromisos adquiridos por Colombia en el marco del convenio de diversidad biológica y los lineamientos de uso racional de humedales del convenio Ramsar.

¹ http://www.defensoria.org.co/red/anexos/pdf/02/informe_165EmergenciaColombia.pdf. Consulta: 31 de Enero de 2014.



Bajo estas circunstancias lo que se hace claro es la necesidad de efectuar un monitoreo de humedales en un área geográfica amplia con una frecuencia temporal relativamente alta. Un programa de monitoreo de estas características debe ser, adicionalmente, previsto para funcionar en un largo plazo, de esta manera puede ser útil para propósitos tales como: (Lindenmayer & Likens 2010):

- Documentar y proporcionar una línea base con la cual confrontar cambios o comportamientos extremos.
- Evaluar las respuestas ecológicas a perturbaciones naturales o experimentales
- Detectar y evaluar cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas
- Identificar respuestas ecológicas inesperadas
- Diseñar políticas con base en la evidencia científica
- Proporcionar datos empíricos para probar teorías ecológicas y desarrollar modelos tales como simulaciones computacionales
- Proporcionar datos cuando se exploren nuevas preguntas de investigación

4

Adicionalmente, es necesario que un sistema de monitoreo sea dimensionado en varios niveles o escalas biológicas y geográficas, para lo cual es necesario la observación in situ y mediante sensores remotos. La pertinencia de los sensores remotos está dada por el potencial que tienen para producir información variada sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas en áreas extensas con una frecuencia relativamente alta, lo que permite disponer de información actualizada y pertinente para identificar procesos de degradación y desaparición de ecosistemas, lo que por métodos convencionales como los estudios de campo resultaría excesivamente costoso y dispendioso (Strand et al. 2007). Sin embargo los estudios in situ permitirán extrapolar la información obtenida localmente en un dominio espacial amplio, a través de sensores remotos.

En este contexto, el desarrollo de metodologías, aplicaciones y algoritmos para el monitoreo de humedales con el uso de sensores remotos, constituye una fase clave sobre la cual cimentar una estructura de monitoreo para los humedales del país, con la cual obtener información confiable y relevante de manera oportuna.

2. GEOBON Y LAS VARIABLES ESENCIALES DE LA BIODIVERSIDAD

GEOBON (*Group on Earth Observation - Biodiversity Observation Network*) es una iniciativa que surgió a partir del Grupo de Observación de la Tierra (GEO por su sigla en inglés), creado tras la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de 2002, que se llevó a cabo en la ciudad de Johannesburgo y tras el G8 que congregó a los países más industrializados del mundo. En estas reuniones se reconoció que la colaboración internacional es indispensable para un óptimo aprovechamiento de los sistemas de observación terrestre orientados a la toma de decisiones en medio de un ambiente dinámico, complejo y sometido a las presiones



que ejerce de manera continua el ser humano². En este sentido el trabajo de GEO se ha centrado en coordinar esfuerzos para construir un sistema global de sistemas de observación de la tierra.

En su esencia GEO es una asociación voluntaria de gobiernos y organizaciones internacionales que contribuye a proporcionar marcos de trabajo en los cuales sus participantes pueden desarrollar nuevos proyectos, estrategias e inversiones³. Actualmente en GEO participan 90 gobiernos, incluida la Comisión Europea y 77 organizaciones, que están vinculadas a grupos específicos correspondientes a las diferentes líneas temáticas que se han definido, éstas son: desastres, salud, energía, clima, estado del tiempo, aguas, ecosistemas, agricultura y biodiversidad⁴.

En el tema de biodiversidad se creó GEOBON, que ha asumido como misiones *“desarrollar un marco de trabajo robusto de escala global y enfoque científico para la observación y detección de cambios de la biodiversidad; coordinar la recolección y distribución de información sobre cambios de la biodiversidad a nivel global; asegurar la continuidad en un largo plazo de disponibilidad de información; y suministrar productos novedosos y relevantes basados en conjuntos de datos claves”*⁵.

En este contexto misional, hacia 2008 GEOBON planteó un marco de implementación que fue revisado y aprobado por las partes vinculadas. En este marco se plantean tres niveles de análisis de la diversidad articulados entre sí: ecosistemas, especies y genes, que son sujetos a observación in situ y/o con sensores remotos (Figura 1). Las relaciones entre los niveles de análisis y el sensoramiento remoto, de acuerdo a la GEOBON son las siguientes (con base en GEOBON, 2008):

- El componente de ecosistemas proporcionará información sobre los ecosistemas terrestres, marinos y de humedales continentales, particularmente de su distribución, extensión y condiciones, impulsores de cambio y consecuencias de los cambios observados.
- Respecto al nivel de especies, que tiene un alto énfasis en los temas de distribución y abundancia de especies, se indica que el modelamiento de especies y comunidades se integrará con series de tiempo de sensores remotos para evaluar las consecuencias de los cambios observados con estos, en términos de impacto sobre la distribución biológica.
- Con relación al nivel de genes, se plantea desde GEOBON evitar observaciones repetidas de variables genéticas y en su lugar basar el monitoreo en modelos espaciales de diversidad genética con los cuales interpretar los cambios identificados con sensores remotos a través del tiempo en los ecosistemas (acuáticos y terrestres) y las métricas de los hábitats (presencia-ausencia de ecosistemas, su área, y grado de fragmentación).

² <http://www.earthobservations.org/index.shtml>. Consulta: 3 de Febrero de 2014.

³ *Ibid*

⁴ *Ibid*

⁵ <https://www.earthobservations.org/geobon.shtml>. Consulta: 6 de Febrero de 2014.



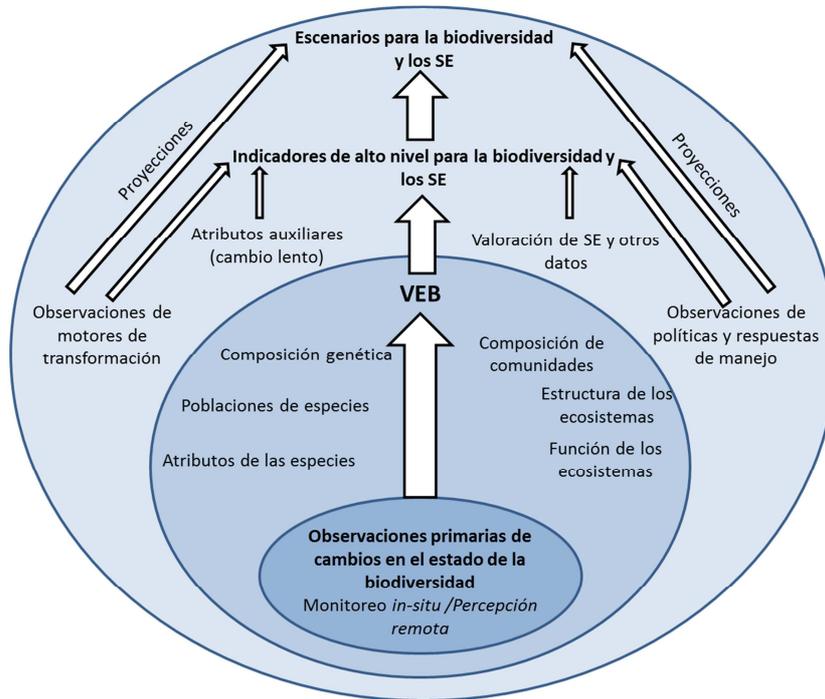


Figura 1: Marco de trabajo de las VEB. Las observaciones primarias deben ser procesadas y combinadas en las VEB. Por tanto, las VEB representan una capa intermedia de datos para la armonización entre los sistemas de protocolos de muestreo. Algunos indicadores requieren la integración de las VEB con otras fuentes de información tales como datos auxiliares, motores de transformación, respuestas al manejo ya las políticas, y valoración y demanda de servicios ecosistémicos (SE). Proyecciones futuras de los motores de transformación y respuestas a las políticas pueden ser usadas para desarrollar escenarios para la biodiversidad y los SE usando modelos que sean calibrados y validados con las VEB (Pereira, et al. 2013)

6

Una vez definidos los niveles de análisis de la biodiversidad se ha planteado la pregunta de qué variables medir y monitorear. Considerando que un sistema global de observación de la biodiversidad requiere de una articulación entre los sistemas de monitoreo existentes, se hace necesario definir un conjunto de variables que deben adoptar como objetivo de medición y monitoreo cada uno de estos sistemas. Al respecto, desde GEOBON se trabaja actualmente en establecer un conjunto de variables esenciales de biodiversidad, definidas como las medidas requeridas para el estudio, reporte y manejo de los cambios en la biodiversidad (Pereira, et al. 2013). La propuesta es que las VEB's, además de facilitar la articulación entre los sistemas de monitoreo de la biodiversidad existentes, sean consistentes con las metas Aichi del Convenio de Diversidad Biológica y por otra parte que permitan evitar la redundancia, teniendo en cuenta que están orientadas a definir un conjunto mínimo de mediciones esenciales para capturar en su mayor dimensión los cambios en la biodiversidad (Pereira, et al. 2013).

Al nivel de ecosistemas se han planteado variables de estructura y de funcionamiento⁶. Las variables de funcionamiento de ecosistemas que se han propuesto hasta el momento son: productividad primaria neta, productividad secundaria, retención de nutrientes y régimen de disturbios. Las variables de estructura del ecosistema que se han propuesto son: estructura del hábitat, extensión y fragmentación de los ecosistemas, y composición del ecosistema por tipo funcional.

⁶ http://www.earthobservations.org/documents/cop/bi_geobon/ebvs/201303_ebv_table.pdf. Consulta: 10 de Febrero de 2014.



Las variables propuestas a nivel de ecosistemas, se plantean susceptibles a ser medidas o inferidas con sensores remotos, no obstante algunas de ellas revisten un gran nivel de complejidad en su medición y requieren de avances en el conocimiento e investigación, tal es el caso de la productividad secundaria, retención de nutrientes y composición del ecosistema por tipo funcional. En el caso de los ecosistemas de humedal la posibilidad de medir algunas de estas variables es aún más restringida. De acuerdo a esto, las variables más factibles de medir, a corto plazo mediante el uso de sensores remotos en humedales son: régimen de perturbación, estructura del hábitat, extensión y fragmentación de los ecosistemas (Tabla 1).

Tabla 1: variables esenciales de la biodiversidad

Clase de VEB	VEB	Medición y escalabilidad	Sensibilidad temporal	Relevancia y afinidad con los objetivos del CDB 2020
Función del ecosistema	Régimen de disturbio	Tipo, estacionalidad, intensidad y frecuencia de eventos de disrupción a los procesos y estructura de los ecosistemas. Ejemplos: régimen de inundaciones, frecuencia de incendios, cultivos/cosechas.	Mensual	Es un determinante clave de la función, estructura y composición de los ecosistemas; cambios en el régimen de disturbios conlleva a cambios en la biodiversidad. Metas: 5, 7, 9, 10, 11, 14, 15.
Estructura del ecosistema	Estructura del hábitat	Mediciones de sensores remotos sobre cobertura (o biomasa) por clases de altura (o profundidad), para proveer una descripción 3-D de los hábitats.	Anual	Proxy para la biomasa en un ecosistema; determinante clave de la idoneidad de hábitat para la biodiversidad; base para la clasificación de la cobertura. Metas: 5, 11, 14, 15.
	Extensión y fragmentación de los ecosistemas	Observaciones de sensores remotos o fotografías aéreas de cada uno de los ecosistemas.	1-5 años	Medida clave del impacto humano en los ecosistemas. Metas: 5, 7, 10, 14, 15.

7

3. CÓMO SE CONCIBE EL MONITOREO DE HUMEDALES DESDE LA CONVENCIÓN DE RAMSAR

De acuerdo a la convención de humedales de Ramsar, el monitoreo de humedales, va ligado a dos “procesos”, interrelacionados: inventario y evaluación; El *Marco para el inventario de los humedales* de



Ramsar incorporó las siguientes definiciones de trabajo para estos procesos y el monitoreo de los humedales (Resolución VIII.6):

- *Inventario de humedales*: Recolección y/o reunión de información básica para la gestión de los humedales, incluido el establecimiento de una base de información para actividades de evaluación y monitoreo específicas.
- *Evaluación de humedales*: Determinación del estado de los humedales y de las amenazas que pesan sobre ellos, como base para reunir información más específica mediante actividades de monitoreo.
- *Monitoreo de humedales*: Reunión de información específica con fines de monitoreo atendiendo a hipótesis derivadas de actividades de evaluación, y aplicación de estos resultados de monitoreo a las actividades de gestión. La reunión de información en series temporales no impulsada por hipótesis sobre la evaluación se califica como *reconocimiento* en lugar de monitoreo (tal como se indica en la Resolución VI.1).

Básicamente, en el inventario se recolecta toda la información que describe el carácter ecológico de los humedales; la evaluación considera las presiones y riesgos asociados de cambios adversos para el carácter ecológico del humedal, y el monitoreo, que puede incluir estudios como reconocimiento, brinda información sobre la cuantía de los cambios (Davidson & Finlayson 2007).

8

Aunque los procesos tienen una diferenciación clara, presentan una alta interrelación que se da en múltiples escalas, si bien se reconoce una mayor fuerza entre evaluación y monitoreo (Humphrey *et al.* 2002). El concepto de interrelación entre inventario, evaluación y monitoreo desde una perspectiva multiescalar fue desarrollado en el Inventario de Humedales de Asia (AWI por sus siglas en inglés) donde se establecieron cuatro niveles de análisis (Figura 2) (Ramsar 2007):

Nivel 1 → *Cuenca Fluvial o isla*: estudio teórico para describir los rasgos geológicos, climáticos y ecológicos generales de cada región geográfica utilizando conjuntos de datos existentes, que cada vez se encuentran con más frecuencia en Internet.

Nivel 2 → *Región de Humedal*: estudio teórico para determinar las regiones de humedales dentro de cada región geográfica utilizando información ya confrontada sobre geología, clima, hidrología y vegetación.

Nivel 3 → *Complejo de Humedal*: trabajo de campo y análisis para determinar los rasgos físicos, fisicoquímicos y biológicos de los complejos de humedales dentro de cada región de humedal.

Nivel 4 → *hábitats de Humedal*: trabajo de campo y análisis detallados para describir los rasgos físicos, fisicoquímicos y biológicos de cada hábitat de humedal dentro de cada complejo de humedal. Esto incluye información sobre conjuntos y especies de animales y plantas, el uso de la tierra y el agua y el manejo de los humedales.



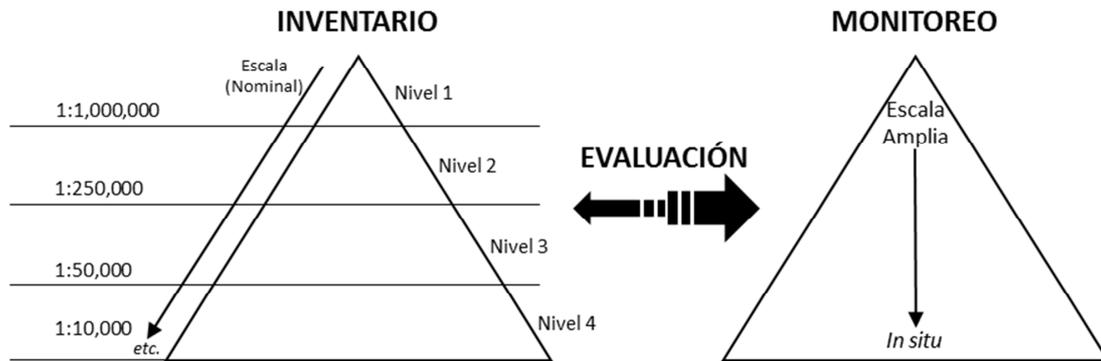


Figura 2: concepto multiescalar de inventario, evaluación y monitoreo y su interrelación. Adaptado de Humphrey, *et al.* (2002).

Bajo este panorama es claro que el monitoreo debe ser emprendido bajo unos objetivos determinados y unas hipótesis de cambio, que se deben basar en hechos factuales, los cuales son establecidos a partir de la evaluación de los humedales. Sobre la base de unas hipótesis bien fundamentadas y unos objetivos claros, es posible dar inicio al proceso de estructuración de un programa de monitoreo de los humedales, situación en la cual el siguiente paso a dar es definir los métodos y variables de evaluación, y la viabilidad/efectividad de costos, para proseguir con estudios piloto a partir de los cuales se efectúan los análisis y retroalimentación necesaria para refinar el esquema de monitoreo; la Figura 3 describe con mayor detalle el proceso sugerido por la Convención de Ramsar para establecer un programa de monitoreo, el cual no debe ser entendido como una receta de obligatorio cumplimiento sino como una guía.



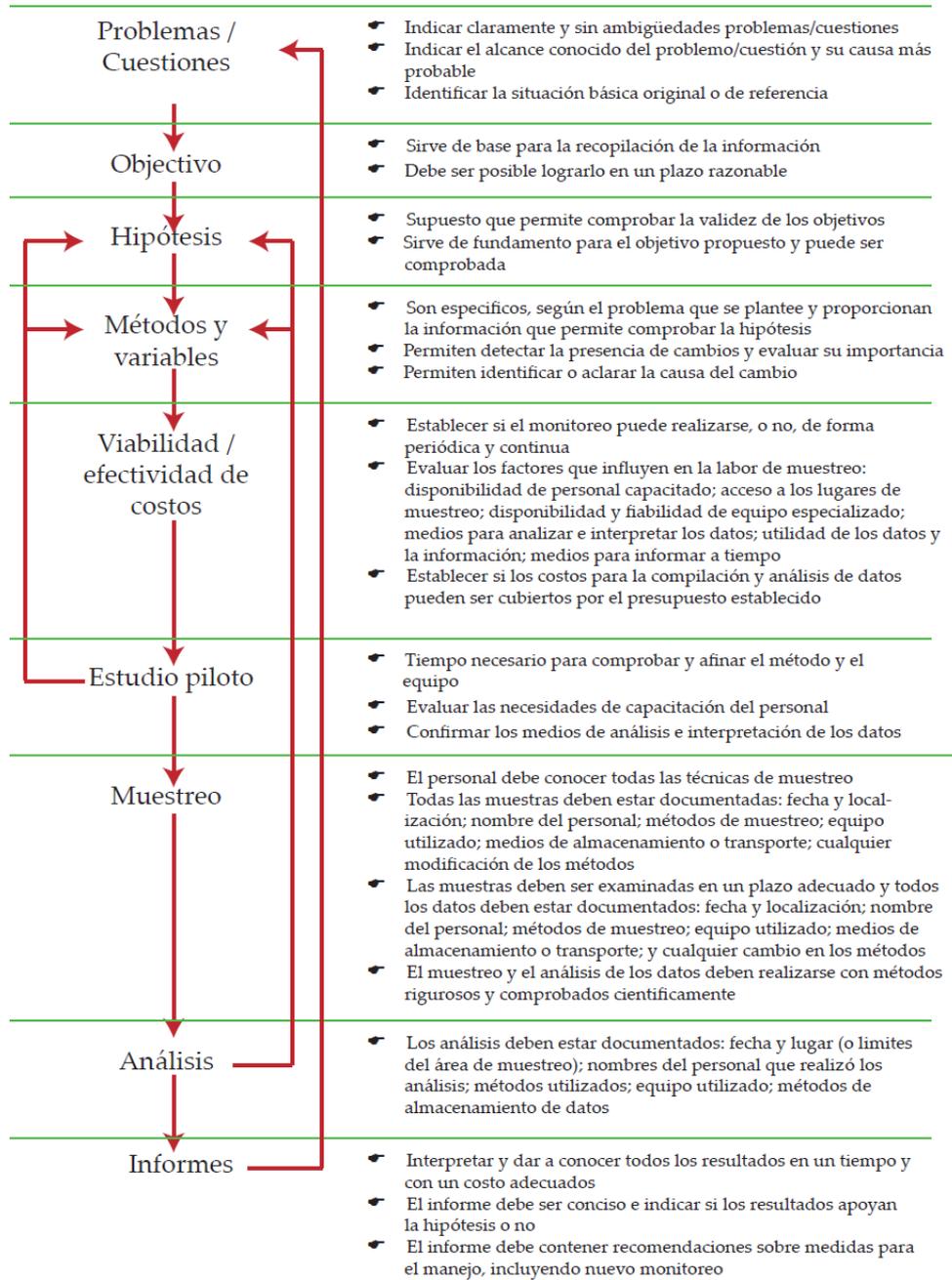


Figura 3: diagrama descriptivo para establecer un programa de monitoreo de un humedal. Fuente: Ramsar 2007.

Adicionalmente, para implementar el esquema inventario, evaluación y monitoreo, como base para la estructuración de un programa de monitoreo de humedales, es conveniente atender las recomendaciones derivadas de la Segunda Conferencia Internacional sobre los Humedales y el Desarrollo de 1998 llevada a cabo en Dakar (en Finlayson 2003):

- Recolectar datos a largo plazo en humedales



- Estandarizar las técnicas, guías y manuales
- Proporcionar capacitación
- Revisar de vacíos de información y coordinar la recolección de datos
- Desarrollar y hacer más amplio el uso de redes.
- Desarrollar medios para auditar los esfuerzos existentes.

4. ANTECEDENTES DE MONITOREO LA BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES

4.1. COLOMBIA

En el país son escasas las experiencias reales de monitoreo de humedales, Ramirez & Rojas (2012), señalan que las corporaciones autónomas regionales y la secretaria del medio ambiente de Bogotá han desarrollado acciones en torno a programas establecidos en los planes de manejo, monitoreo fisicoquímicos y microbiológicos de agua, aire, en procesos de caracterización e identificación de humedales, aves acuáticas, estado de conservación a nivel de estructura de los ecosistemas de la jurisdicción, pero no se cuenta con un sistema de monitoreo específico para humedales, mientras que el Ministerio de Ambiente no ha desarrollado una acción específicamente enfocada en humedales.

La ausencia de monitoreo se da incluso en los humedales Ramsar, en el caso del Delta del Río Baudó existe muy poca información oficial, en el Sistema de Humedales de la Laguna del Otún como en el sistema Lacustre de Chingaza todo se limita a planes de manejo. Igual ocurre con la Laguna de la Cocha, en donde se aprobó el plan de manejo en 2009⁷ y cerca de tres años después en 2012 la procuraduría general de la nación generó una alarma, debido a que sin la existencia del estudio oficial de la capacidad de carga de la laguna, se registró un incremento en la adjudicación de permisos para el cultivo de peces⁸.

En el caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta se han presentado mayores avances al efectuar el monitoreo de las condiciones ambientales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante su rehabilitación, por parte del INVEMAR (Ibarra et al. 2012). Los aspectos de monitoreo evaluados fueron calidad del agua, vegetación y recursos pesqueros, y dentro de cada componente se midieron diferentes tipos de variables⁹. Todas estas variables se midieron en un periodo relativamente corto de más o menos dos años con trabajo in situ, a excepción de la cobertura de la tierra que se obtuvo a partir de la interpretación de imágenes satelitales de 2009 y 2011.

Este es, en términos generales el panorama respecto al monitoreo de humedales en Colombia. Se podrían adicionar estudios de identificación, caracterización, detección de cambios y análisis multitemporal,

⁷ <http://corponarino.gov.co/modules/news/makepdf.php?storyid=8>. Consulta: 10 de febrero de 2014

⁸ <http://www.procuraduria.gov.co/portal/index.jsp?option=net.comtor.cms.frontend.component.pagefactory.NewsComponentPageFactory&action=view&key=2399>. Consulta: 10 de febrero de 2014

⁹ En calidad del agua: variables físico químicas, nutrientes, metales pesados; en vegetación: salinidad, estructura del bosque de manglar, regeneración natural y cobertura de la tierra; en recurso pesquero: captura total y su relación con la variabilidad climática global, composición de las capturas por especies de peces, composición de las capturas por especies de invertebrados, relación de la captura (kg ó t) - esfuerzo de pesca (faenas) y captura por unidad de esfuerzo (kg/faena) de los principales artes y/o métodos de pesca, distribución temporal y espacial del esfuerzo de pesca, comparación interanual y espacial de la cpue (kg/faena) por arte de pesca por especie y multiespecífica en la ciénaga, ingreso (\$/faena) y renta económica (\$/faena) global y por arte pesca en la pesquería de la CGSM 110, talla media de captura de las principales especies de peces e invertebrados



desarrollados por parte de las universidades y centros de investigación, no obstante, específicamente en el tema de monitoreo estas son las iniciativas más relevantes a nivel nacional. Con fines de ampliar el panorama y considerando que los humedales no son ecosistemas aislados sino que están sujetos a factores de perturbación, tales como incendios, inundaciones, deforestación, cambios de cobertura entre otros, se describen a continuación diferentes iniciativas de monitoreo que se han llevado a nivel del país en variables o factores relacionados con la perturbación de los humedales.

Monitoreo de inundaciones con tecnologías geoespaciales – IGAC

En el año 2011 el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) desarrolló un trabajo para identificar las áreas afectadas por inundaciones a partir de la interpretación visual de imágenes de sensores remotos (Radarsat, Alos Palsar, DMS2 y FAC ADS80 entre otros). Se interpretaron 21'471.671 ha, ubicadas en las zonas centro y norte del país, en las cuencas medias y bajas de los ríos Magdalena y Cauca, y en los ríos Sinú y San Jorge, donde se presentaron los mayores niveles de afectación por inundaciones en el país. Lamentablemente este proyecto no tuvo continuidad y finalizó en el año 2012.

Sistema para el monitoreo de la deforestación

En el año 2009, se inició el Sistema Nacional de Información Forestal (SNIF), que cuenta con el proyecto de Monitoreo de Bosques y Carbono para Colombia, basado en sensores remotos. Este proyecto tiene por objeto medir y monitorear satelitalmente y en campo la emisiones producto de la deforestación y degradación de los bosques, así como sus stocks y capturas de carbono. El monitoreo incluyó inicialmente zonas de interés dentro del territorio nacional, como la Amazonia, el Chocó Biogeográfico, la costa Atlántica y recientemente se ha ampliado a todo el país.¹⁰

Como parte de los resultados de la implementación del programa de monitoreo y seguimiento a la deforestación, el IDEAM ha estimado la deforestación en Colombia a dos escalas de referencia o de aproximación. La primera a una resolución espacial gruesa de 250 metros (1:500.000) y temporalidad anual, a fin de identificar los *hotspot* o núcleos de deforestación activos; y la segunda a resolución espacial media de 30 metros (1:100.000) que se pretende realizar cada cuatro años, a fin de detallar y mejorar la precisión de la cifra de la superficie deforestada en el país¹¹.

Sistema para el monitoreo de los procesos de degradación de los suelos y tierras

El IDEAM también lidera el proyecto sobre monitoreo de los procesos de degradación de los suelos y tierras, en donde se establecen como metas la realización del monitoreo y seguimiento a los procesos de degradación de tierras y desertificación en Colombia, lo que incluye erosión, salinización y desertificación. Algunos de los avances realizados son la elaboración de tres protocolos sobre desertificación, erosión y salinización. Además, el levantamiento de información de la línea base de la degradación de suelos por

¹⁰ <http://www.oecoamazonia.com/es/reportajes/colombia/4-colombia-vai-monitar-floresta>. Consulta: 24 de Julio de 2013.

¹¹ <http://www.carbonoybosques.org/images/stories/memorias-cambio-climatico/politicas-y-lineas-de-trabajo-en-cambio-climatico/avances-del-proyecto-capacidad-institucional-tecnica-cientifica-para-apoyar-proyectos-redd-maria-claudia-garcia.pdf>. Consulta: 26 de Julio de 2013.



erosión (2011- 2012) de los departamentos de Santander, Boyacá, Cundinamarca, Tolima, Huila, Quindío y Risaralda con un cubrimiento de 17.000.000 Ha del territorio continental colombiano¹².

Sistema Nacional de Prevención y Atención de desastres

El IDEAM como nodo del Sistema Nacional de Prevención y Atención de desastres acopia, analiza y procesa la información hidrometeorológica con miras a la emisión de alertas y pronósticos relacionados con el estado del tiempo para todo el territorio nacional. A partir de la información sobre el estado del tiempo y mediante diferentes métodos se monitorea y generan alarmas relacionadas con el nivel de los ríos de las principales zonas hidrológicas de Colombia, así como de incendios en las coberturas vegetales y amenaza de deslizamientos de tierra.

Los pronósticos y alertas tempranas sobre la ocurrencia de incendios de la cobertura se realiza a través de un modelo desarrollado específicamente para este fin, denominado SIGPI (Sistema de Información Geográfica para la Prevención de Incendios) que incorpora la amenaza que existe por aspectos climáticos (precipitación diaria acumulada y temperatura máxima diaria), biológicos (susceptibilidad de la cobertura vegetal a los incendios) y antrópicos (cercanía a centros poblados)¹³.

Monitoreo de coberturas

En Colombia se ha venido implementando la metodología *Corine Land Cover* adaptada para Colombia (CLCC), en la que por medio de interpretación visual de imágenes de sensores remotos se ha elaborado la cartografía sobre cobertura de la tierra a escala 1:100.000 para todo el país de los años 2002 y 2007. Si bien la metodología no está enfocada al monitoreo de humedales, algunas de las coberturas que se identifican están asociadas a éstos, tales como bosques y herbazales inundables, zonas pantanosas, turberas, vegetación acuática, áreas húmedas costeras y superficies de agua (ríos lagos, ciénagas, canales etc.). En este sentido la metodología CLCC permite identificar las transformaciones de las coberturas asociadas a ecosistemas de humedales e indirectamente los impulsores de transformación de los mismos.

13

4.2. ANTECEDENTES INTERNACIONALES DE MONITOREO DE HUMEDALES

Escala Global - Continental

- *Globwetland*

Una de las iniciativas globales de monitoreo de humedales es Globwetland, que es un proyecto fundado por la Agencia Espacial Europea, creado con el propósito de establecer un sistema global de Observación de Humedales¹⁴. El sistema está conformado por tres componentes: (1) percepción remota, en el que está todo

¹² <http://www.cambioclimatico.gov.co/jsp/2254>. Consulta: 26 de Julio de 2013.

¹³ <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=995>. Consulta: 26 de julio de 2013.

¹⁴ <http://www.globwetland.org/>. Consulta: 18 de octubre de 2013



lo correspondiente a pre-procesamiento, clasificaciones de uso y cobertura, y detección de cambios y (2) componente SIG, que hace referencian a toda la parte de arquitectura de software y (3) SIG-web, que está diseñado para permitir permanente acceso de los usuarios a la información, mapas y datos producidos desde el sistema.

Actualmente se plantea producir información respecto a tres tiempos diferentes (1975-76, 1990-91, 2005-06) en 200 sitios de humedales del Mediterráneo, a escala 1:50.000 y 1:100.000, con el uso de imágenes satelitales Landsat, lo que dará resultados como¹⁵:

- Mapas de uso y cobertura, incluyendo tipología de humedales
- Mapas de detección de cambios y análisis de tendencias.
- Mapas de variables del ciclo de agua para el análisis de la variación anual del espejo de agua.

Maximizando la utilidad de los mapas producidos en los diferentes periodos y los 200 sitios de humedales, se espera generar dos Indicadores específicos para humedales:

- Indicador Ramsar sobre efectividad (definido por la STRP¹⁶).
- Indicadores sobre el estado y tendencias de los humedales mediterráneos (definido por la OMW¹⁷).

Globwetland se encuentra desarrollando también un trabajo con imágenes de mayor resolución espacial a escala 1:5.000, en 5 sitios con humedales con el fin, por una parte, de analizar con mayor detalle el estado, impulsores y presiones de humedales considerados como relevantes por el Observatorio de Humedales del Mediterráneo, y por otra parte para la validación de mapas e indicadores obtenidos a escalas menores.

▪ *Programa MODIS*

El programa MODIS no está orientado exactamente al monitoreo de los humedales pero genera información sobre los mismos, específicamente mediante el producto MODD44W de máscara de agua que se genera a resolución espacial de 250 metros y mediante los productos de cobertura terrestre MOD12Q, que se generan anualmente con una resolución espacial de 500 metros. El producto MOD12Q está conformado por varias capas que corresponden a capas de cobertura terrestre con diferentes sistemas de clasificación, en todos estos se presenta la cobertura de “superficies de agua”, y en la clasificación del IGBP¹⁸ se da una clasificación más específica al identificar “humedales permanentes”.

Los datos generados por el programa MODIS han sido empleados por el programa de monitoreo de humedales e inundaciones que efectúa el *Dartmouth Flood Observatory*¹⁹, en el que adicionalmente se emplean datos del satélite Quikscat de la NASA, los cuales permiten generar información de los humedales aún en condiciones de nubosidad.

¹⁵ *Ibid*

¹⁶ Grupo de examen científico y técnico de la convención de Ramsar (SRTP por sus siglas en inglés)

¹⁷ Observatorio de humedales del mediterráneo (OWM por sus siglas en inglés).

¹⁸ Programa Internacional Geosfera-Biosfera

¹⁹ <http://www.dartmouth.edu/~floods/wetlands/Wetlands.html> . Consulta: 16 de septiembre de 2013.



Escala Nacional

- *Estados Unidos*

Estados Unidos cuenta con varias iniciativas de monitoreo de humedales, entre ellas es de particular relevancia la que desarrolla el servicio de pesca y vida silvestre (USFWS por sus siglas en inglés), que genera información acerca de la extensión, estado y tendencias de los humedales del territorio (vegetación, conservación de hábitats, hidrología, clima etc.), con el uso de instrumentos de campo y un alto componente de sensores remotos. A esta información se accede por diferentes medios, como los reportes nacionales sobre el estado y los cambios de los humedales, que se producen cada 10 años y que actualmente cubren los últimos 60 años²⁰, así como por medio de sistemas *web service*²¹.

De manera paralela el servicio de Parques Nacionales de EEUU también realiza monitoreo de humedales²² pero se centran más en variables como el nivel de contaminación del cuerpos de agua, la cantidad - profundidad, u otras como el estado de la vegetación, su abundancia, especies invasoras y los cambios en la estructura vegetal.

El Departamento de Agricultura (USDA, por sus siglas en inglés), efectúa también un monitoreo de humedales con un enfoque diferente que se enmarca en una iniciativa más amplia llamada “Evaluación de Efectos de Proyectos de Conservación” (CEAP por sus siglas en inglés). Este enfoque está orientado a generar información periódicamente sobre los efectos de las acciones de conservación en los ecosistemas de humedales y los servicios que estos proporcionan. Los objetivos generales definidos en este esquema fueron²³:

- Cuantificar los servicios ecosistémicos de los humedales a través de gradientes de perturbación en paisajes agrícolas.
- determinar los efectos y la eficacia de las prácticas y programas de conservación de los servicios ecosistémicos estimuladas por la USDA y por los programas de conservación de la Ley Agrícola,
- identificar los factores dados desde múltiples escalas que influyen en la capacidad de los humedales para proporcionar servicios ecosistémicos
- Desarrollar un modelo integrado del paisaje para la simular la capacidad de previsión como parte de un proceso nacional de seguimiento a humedales.

Este monitoreo tiene un alto componente de análisis y modelamiento espacial, y de sensores remotos, en particular en lo relacionado con la identificación, caracterización de humedales y generación de cartografía sobre uso y cobertura del suelo, en donde el tipo de imágenes varía dependiendo de la escala y lugar específico.

²⁰ <http://www.fws.gov/wetlands/Status-And-Trends-2009/Science.html> Consulta: 16 de septiembre de 2013

²¹ Se puede consultar en: <http://www.fws.gov/wetlands/Data/Mapper.html>

²² <http://science.nature.nps.gov/im/units/sien/monitor/wetlands.cfm> . Consulta: 10 de Octubre d e2013

²³ http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/technical/nra/?cid=nrcs143_014155 . Consulta: 8 de octubre de 2013



Escala Sub-nacional y Local

EEUU cuenta con varios sistemas de monitoreo de carácter sub-nacional, como es el caso del Programa de Evaluación y Monitoreo de recursos de los Humedales del Departamento de Calidad Ambiental del Estado de Michigan, en donde trabajan en tres frentes: evaluación de paisaje, evaluación rápida de humedales y evaluación intensiva de sitios²⁴. De estos, el enfoque de paisaje es en el que hay un énfasis mayor en el uso de sistemas de información geográfica y percepción remota, mediante el cual se establece la cobertura del humedal, uso y cobertura del suelo. El departamento de recursos naturales de Minnesota también lleva a cabo un seguimiento del estado y las tendencias de los humedales, desde 2006, particularmente en lo referente a ganancia y pérdida, que se efectúa mediante la interpretación en ambiente estereoscópico de fotografías aéreas a color de alta resolución y mediante análisis espacial. Estos procesos se llevan a cabo en cerca de 5000 puntos distribuidos a lo largo y ancho del estado, anualmente se realiza foto-interpretación en cerca de 1830 puntos²⁵.

Otro sistema de monitoreo de carácter sub-nacional en EEUU es el de Oregon, en donde se observa el estado y las tendencias de la extensión y la “salud” de los humedales mediante diferentes métodos. Una de las formas de acceder a la información generada por este sistema de monitoreo es el geoportal, en el cual se pueden consultar información vinculada a capas geográficas como área de humedal, vegetación, suelos, amenazas, tipos de hábitats y de vegetación. Adicionalmente se pueden hacer consultas con base en diferentes criterios, todo lo que en conjunto permite a los usuarios identificar los humedales y propiedades asociadas a los mismos.

16

A nivel local una de las Iniciativas más novedosas, que se presenta igualmente en EEUU, desde el distrito de Meadowlands, es el Monitoreo y evaluación de humedales mediante teledetección hiperespectral. En este enfoque se articulan tecnologías geoespaciales de última generación como LiDAR e imágenes hiperespectrales, además de fotografías aéreas de alta resolución y datos de campo. Mediante el uso de los datos obtenidos se logran obtener índices igualmente novedosos como índice de sumatoria verde, índice de reflectancia fotoquímica, *Structure Insensitive Pigment Index* e índice de reflectancia de senescencia, los cuales permiten conocer procesos químicos y biológicos relacionados con los ecosistemas asociados al humedal y de los mismos cuerpos de agua²⁶. La estrategia consiste en construir un modelo, el cual integra tipos de vegetación, textura y altura para determinar niveles de concentración de sulfuro, salinidad y del redox potencial. El diseño del programa está planteado para que una vez construido y probado el modelo, se empleen sólo imágenes hiperespectrales para el seguimiento y evaluación a largo plazo.

²⁴ http://www.michigan.gov/deq/0,4561,7-135-3313_3687-10364--,00.html . Consulta: 12 de octubre de 2013

²⁵ http://www.dnr.state.mn.us/eco/wetlands/wstm_prog.html . Consulta: 13 de octubre de 2013

²⁶ <http://meri.njmeadowlands.gov/projects/wetland-monitoring-and-assessment-using-hyperspectral-remote-sensing/> . 16 de octubre de 2013



BIBLIOGRAFÍA

- Davidson, N C, and C M Finlayson. 2007. "Earth Observation for Wetland Inventory , Assessment and Monitoring." 228: 219–28.
- Finlayson, C.M. 2003. "The Challenge of Integrating Wetland Inventory, Assessment and Monitoring." *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 13(4): 281–86. <http://doi.wiley.com/10.1002/aqc.598> (July 18, 2014).
- GEOBON. 2008. "The GEO Biodiversity Observation Network, Concept Document Document." (November): 41.
- Guerrero, Eduardo. 1998. "Una Aproximación de Los Humedales En Colombia." 163.
- Humphrey, CL, P Bayliss, and C M Finlayson. 2002. "Towards Developing a Wetland Inventory, Assessment and Monitoring Scheme in Australia: Case Studies from the Wet–dry Tropics In Developing a Proposed Framework for a Wetland Inventory, Assessment and Monitoring System (WIAMS) in Malaysia." In *Proceedings of the Workshop on Developing a Proposed Framework for a Wetland Inventory, Assessment and Monitoring System (WIAMS) in Malaysia*, eds. R Sundari, J Davies, and CL Humphrey. Kuala Lumpur: Wetlands International\}Malaysia Programme: Petaling Jaya, 59–85.
- Ibarra, Karen Patricia, Carlos Augusto Villamil Echeverri, Efraín Vilorio Maestre, Darío Vega Díaz, Paola Andrea Bautista, Betty Cecilia Cadavid, Juan Pablo Parra, Luisa Fernanda Espinosa Díaz, Martha Catalina Gómez Cubillos, Claudia Milena Agudelo Palacio, Laura Victoria Perdomo, Danetcy Mármol, and Rueda Mario. 2012. "Monitoreo de Las Condiciones Ambientales Y Los Cambios Estructurales Y Funcionales de Las Comunidades Vegetales Y de Los Recursos Pesqueros Durante La Rehabilitación de La Ciénaga Grande de Santa Marta. INVEMAR. Informe Técnico Final 2012." 130.
- Lindenmayer, David B., and Gene E. Likens. 2010. "The Science and Application of Ecological Monitoring." *Biological Conservation* 143(6): 1317–28. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006320710000522> (January 22, 2014).
- Minambiente. 2002. "Política Nacional Para Humedales Interiores de Colombia." 67.
- Pereira, H M, S Ferreir, M Walters, G N Geller, R H G Jongman, R J Scholes, M W Bruford, N Brummitt, S H M Butchart, A C Cardoso, N C Coops, and E Dulloo. 2013. "Essential Biodiversity Variables." *Science* 339: 277–78.
- Pereira, H M, S Ferrier, M Walters, G N Geller, R H G Jongman, R J Scholes, M W Bruford, N Brummitt, S H M Butchart, A C Cardoso, N C Coops, E Dulloo, D P Faith, J Freyhof, R D Gregory, C Heip, R Höft, G



Hurttt, W Jetz, D S Karp, M A McGeoch, D Obura, Y Onoda, N Pettoirelli, B Reyers, R Sayre, J P W Scharlemann, S N Stuart, E Turak, M Walpole, and M Wegmann. 2013. "Essential Biodiversity Variables." *Science* 339 (6117): 277–78. <http://www.sciencemag.org/content/339/6117/277.short>.

Ramirez, Lina María, and Luz Mira Rojas. 2012. "Evaluación Política Nacional de Humedales Interiores de Colombia 1."

Ramsar. 2007. 11 Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales *Inventario , Evaluación Y Monitoreo: Marco Integrado Para El Inventario, La Evaluación Y El Monitoreo de Humedales. Manuales Ramsar Para El Uso Racional de Los Humedales*. 3rd ed. Gland (Suiza): Secretaria de la convención de Ramsar.

Strand, H, R Hoft, J Strittholt, N Horning, L Miles, E Fosnight, and W Turner. 2007. "Sourcebook on Remote Sensing and Biodiversity Indicators." *CBD Technical Series* (32): 203.





Instituto de Investigación de Recursos Biológicos
Alexander von Humboldt

PRODUCTO: ALGORITMOS Y APLICACIONES PARA EL
MONITOREO DE VARIABLES ESENCIALES DE LA
BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES

ANTECEDENTES DE MONITOREO ESPACIAL SOBRE EL FUEGO COMO REGIMEN DE PERTURBACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS

Leidy Johanna Arroyave Suarez

Centro de Análisis y Síntesis (CAS) - Laboratorio de Análisis Espacial

Programa de Gestión de Información y Conocimiento

Instituto Humboldt

Julio de 2014

1

Sede Principal: Calle28A#15-09 Bogotá, D.C., Colombia | PBX: (57)(1) 3202767 | NIT 820000142-2



ANTECEDENTES, DE MONITOREO ESPACIAL SOBRE EL FUEGO COMO REGÍMEN DE PERTURBACIÓN EN LOS ECOSISTEMAS

1 INTRODUCCIÓN

Los incendios son elementos críticos en el sistema de la Tierra, que une el clima, los seres humanos, y la vegetación. Con 200 a 500 millones de hectáreas quemadas anualmente, el fuego altera un área mayor en una variedad más amplia de biomas que cualquier otra perturbación natural. (Lavorel et al, 2007).

Los fuegos amenazan cultivos, e infraestructuras, generan problemas respiratorios y daños ecológicos. La quema de vegetación cobra cada vez mayor importancia en el ámbito local y global debido a la producción de gases efecto invernadero, a la pérdida de biodiversidad, a los daños a la propiedad privada y a la pérdida de vidas humanas (Nepárea et al. 1999).

Los incendios se deben incluir en las evaluaciones mundiales y regionales de la vulnerabilidad al cambio climático global (Lavorel et al, 2007). La regulación de incendios en los países amazónicos, cuenta con programas en estado de desarrollo como El Programa Marco de incendios forestales de la FAO en el manejo del fuego- manejando riesgos de incendios de vegetación a nivel del territorio y mejorando la coordinación entre agencias de la FAO- este programa en general refleja un enfoque integrado que trata del fuego en la vegetación teniendo en cuenta todos los usos de la tierra .

Las causas del fuego en Colombia son principalmente de origen antrópico, relacionado con diversas actividades: descuidos, cacería, prácticas agrícolas y el contacto de las líneas eléctricas con la vegetación (Mavdt 2002).

En términos generales, para Colombia no hay políticas claras en cuanto a la prevención y el manejo de incendios forestales, A pesar de que la actual propuesta del Plan Nacional de Restauración incluye entre los disturbios priorizados a nivel nacional los Incendios forestales y quemas, (Contraloría general de la nación.2013), la ley 1523 de 2012, en donde se reglamentan la responsabilidad, principios, definiciones y el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres; El desarrollo de planes estratégicos para la mitigación de riesgos aún



no ha sido puesto en marcha, sin embargo el SIPAD elaboró la cartilla orientadora para la gestión del riesgo en incendios forestales 2012, para ser aplicada por las diferentes entidades territoriales en el país.

Históricamente los fuegos han sido usados para convertir bosques y manejar coberturas con el propósito general de realizar prácticas agrícolas, pero actualmente se están saliendo de control, entre 2005 y 2010 se deforestaron 238.360 hectáreas anuales en el país, durante ese periodo la Amazonia registró una pérdida anual de 79.800 hectáreas de bosque de acuerdo con el IDEAM (2011). (CEPAL Colombia, 2013), sin embargo de estas pérdidas de Bosque, se desconoce cuántas se generaron por incendios forestales.

Los incendios pueden causar cambios dramáticos en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Estos tienen impactos significativos en el ambiente y los ciclos biogeoquímicos. Al contribuir de manera significativa a gases de efecto invernadero (por ejemplo, con el lanzamiento de 1.7 a 4.1 Pg de carbono por año) y las emisiones de aerosoles, y la modificación de las propiedades superficiales, que no sólo afectan a la vegetación, sino también el clima. (Lavorel et al, 2007).

El Incremento de la retroalimentación positiva entre los incendios de cobertura vegetal y los gases de efecto invernadero, en la medida en que mayores temperaturas propician los incendios de mayor envergadura y estos, a la vez, generan mayores descargas de gases invernadero que contribuyen a la elevación de la temperatura ambiental (Parra, 2011).

Los incendios además de las implicaciones en los ecosistemas, tienen diferentes efectos a nivel socioeconómico, por ejemplo, los Incendios forestales generan impactos económicos tanto al sector público como privado, a manera de ejemplo se cita una cifra en que incurrió el país, en el primer trimestre del año 2010, tan solo en el control y extinción de incendios por parte de las entidades operativas, la cifra reportada fue de \$ 24.475.073.672 de pesos, este monto no involucra la valoración de los daños a la propiedad privada y a los ecosistemas ya que es una tarea compleja y de una investigación precisa. No obstante es una cifra muy alta (MAVDT 2010).

Para la mapeación de fuegos generalmente se usan técnicas de teledetección, las imágenes del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) son el instrumento principal a bordo del satélite Terra1 (EOS AM-1) y su homólogo Aqua1, cuya administración pertenece a la Nasa. Modis, realiza observaciones de la superficie de la Tierra cada doce horas y capta información en treinta y seis bandas del espectro electromagnético situadas entre los 0.4 μm e 14.4 μm y se distribuyen en diferentes grupos



de resolución espacial (Parra, 2011). Estas imágenes son procesadas usualmente usando FIRMS el módulo de Información sobre incendios para el Sistema de Gestión de recursos (Fire Information of Resource Management System Active Fire Data) disponible en <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms>. Pudiendo determinar focos de incendios, además del análisis de áreas quemadas y no quemadas, se realizan clasificaciones de coberturas terrestres generalmente usando imágenes satelitales de resolución media como Landsat o Spot.

2 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE ÁREAS AFECTADAS POR INCENDIOS

Los incendios juegan un papel importante en los cambios naturales que se producen en los ecosistemas de la Tierra. La diversidad de la vida vegetal y animal en los bosques del mundo, praderas y humedales en parte depende de los efectos del fuego; de hecho, algunas plantas no pueden reproducirse sin incendios (cortafuegos abren el recubrimiento exterior de algunas semillas y estimula la germinación). Lo que al principio puede parecer una devastación total de pronto se convierte en un panorama de la vida nueva. Fuego inicia procesos naturales críticos por descomposición de la materia orgánica en nutrientes del suelo. La lluvia se desplaza estos nutrientes al suelo proporcionando un semillero fértil rejuvenecido para las plantas. Con menos competencia y más luz solar, las plantas crecen más rápido. (NASA, 2014)

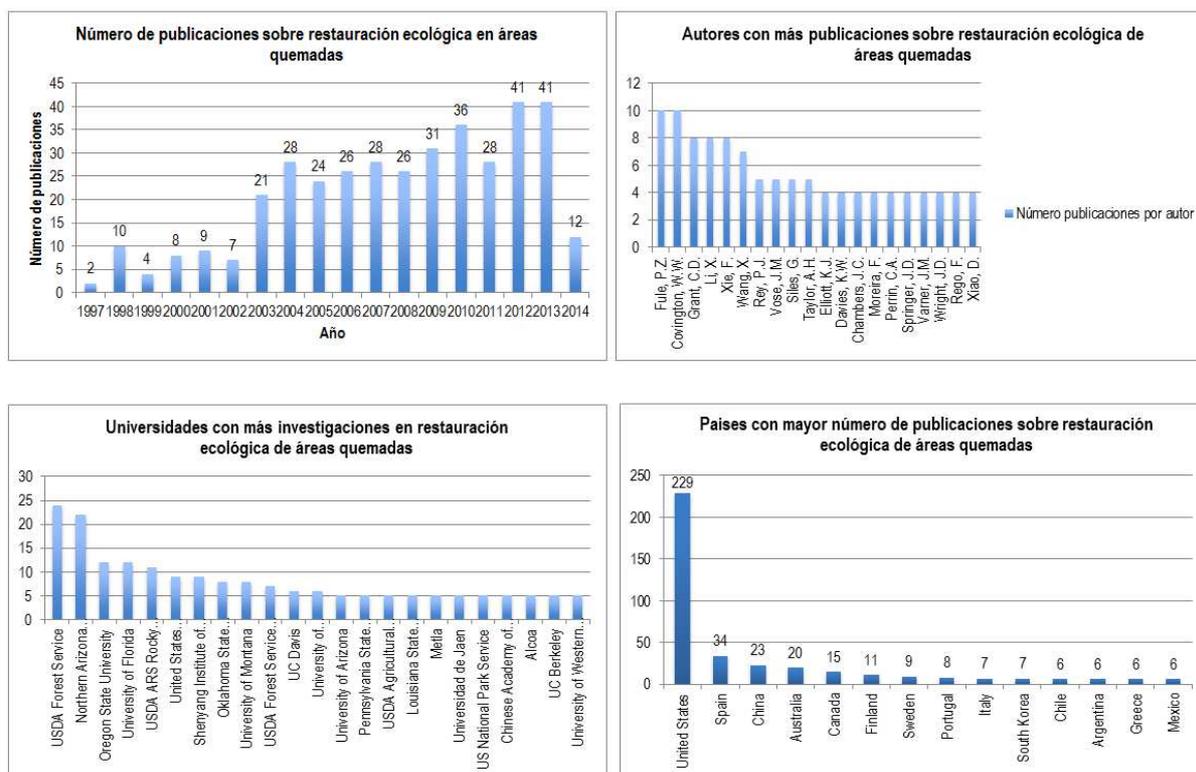
Los ecosistemas pueden ser descritos en términos de regímenes de fuegos típicos, operando dentro de un rango conocido o esperado de variación de los atributos o características clave de los regímenes de fuego. No obstante, actualmente se considera que estos regímenes, y sus causas naturales, han sido alterados o reemplazados, dando a paso a otros mecanismos relacionados con la ampliación de la frontera agrícola y la introducción de especies exóticas. De esta manera, ecosistemas que nunca o rara vez han experimentado incendios están siendo sometidos a quemadas, al tiempo que otros ecosistemas, que han evolucionado bajo regímenes de fuego (p.e. sabanas naturales) pueden estar experimentando cambios drásticos, dando a paso a regímenes alterados de fuego. (TNC et al, 2004, citado por Sarmiento, 2010).

A nivel ambiental los incendios pueden impactar de distintas maneras y en diferentes horizontes de tiempo las especies vegetales presentes en una localidad o región, y son sus efectos más importantes: la alteración de las condiciones microclimáticas necesarias para su



reproducción y desarrollo, la reducción del tamaño de las poblaciones locales por muerte directa o diferida de sus individuos, la modificación de sus estructuras poblacionales, la disminución de su diversidad genética, la generación de condiciones para el ingreso de nuevas especies competidoras y la alteración de las interacciones biológicas y ecológicas con otras especies (Zedler et al., 1983; Cochrane, 2003; Tabarelli et al, 2004; Hoffmann, 1999; Uhl y Kauffman, 1990 en Parra, 2011).

En Colombia, solamente ecosistemas como las sabanas naturales de altillanura y llanuras aluviales de desborde, han evolucionado bajo un régimen de fuego, (TNC et al, 2004, citado por Sarmiento, 2010). El informe de Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente Elaborado por la contraloría, para el periodo 2012-2013, en donde se destacan los incendios como un tensor asociado al deterioro forestal y de los páramos, se reportan los mayores



impactos en los complejos de páramos de Chingaza, Guerrero y Santurbán.

Imagen 1. Investigaciones sobre restauración ecológica de áreas quemadas en los últimos 20 años. **Fuente:** Elaboración propia a partir de búsquedas en la base de datos Scopus 10



En los últimos 20 años han aumentado el número de publicaciones referentes a la restauración ecológica de áreas quemadas (Imagen 1) , la mayor cantidad de investigaciones se realizan en Estados Unidos, en donde se destacan las investigaciones realizadas por la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), y en especial el programa de restauración del paisaje forestal de creado en 2009 para promover la estabilidad laboral, el suministro fiable de madera, la salud de los bosques y la reducción de los costos y riesgos de las emergencias derivadas de incendios forestales. Gracias a la labor desempeñada en 23 paisajes forestales de los Estados Unidos de América, se crearon más de 3 000 puestos de trabajo en 2011 y otros 4 500 en 2012, lo que generó unos 290 millones de USD en ingresos laborales. (FAO; 2014). En Colombia El Plan Nacional de Restauración (2012), tiene como objeto la orientación y la promoción de la restauración ecológica, mediante la recuperación, rehabilitación de áreas disturbadas y la conservación de la diversidad biológica ,mediante la sostenibilidad y el mantenimiento de bienes y servicios ambientales, haciendo frente a procesos que permitan la adaptación a los cambios globales. El marco metodológico del plan aborda como elementos conceptuales los motores de pérdida y transformación, la compensación y la zonificación y ordenación. Dentro de los motores de pérdida y transformación, se considera como un impulsor la transformación y pérdida de ecosistemas y hábitats naturales, dentro de este se considera como un agente de disturbio los incendios forestales y las quemadas, el tratamiento de estas áreas ya había sido contemplado en el protocolo de restauración de coberturas vegetales afectadas por incendios forestales en el año 2006 por el CONIF-MAVDT y por la guía técnica para la restauración ecológica de áreas afectadas por incendios forestales en el distrito capital desarrollado por el Jardín Botánico de Bogotá en el año 2005. Otras iniciativas importantes en el país son: El papel de las aves en la dispersión de semillas, durante el proceso de recuperación ecológica de las zonas afectadas por incendios en el Parque Nacional Natural Los Nevados (2008).

3 PRODUCTOS PARA LA DETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS

Alrededor del tema del monitoreo de áreas quemadas se han generado múltiples investigaciones, que han crecido en el tiempo, gracias a la disponibilidad de imágenes de satélite que facilitan estos análisis, se nota un decaimiento en la producción de información en el año 2012, posiblemente se debe a la pérdida del Satélite EnviSat de la Agencia Espacial Europea en ese mismo año.



Los países con mayor participación en estas investigaciones son Estados Unidos, seguidos de Italia y España, en el ámbito latinoamericano se destacan México, Argentina y Chile (Imagen 2), entre los investigadores con más Publicaciones se encuentra el Dr Emilio Chuvieco, de la Universidad de Alcalá –España, quien ha realizado muchos trabajos con aplicaciones en Latinoamérica .

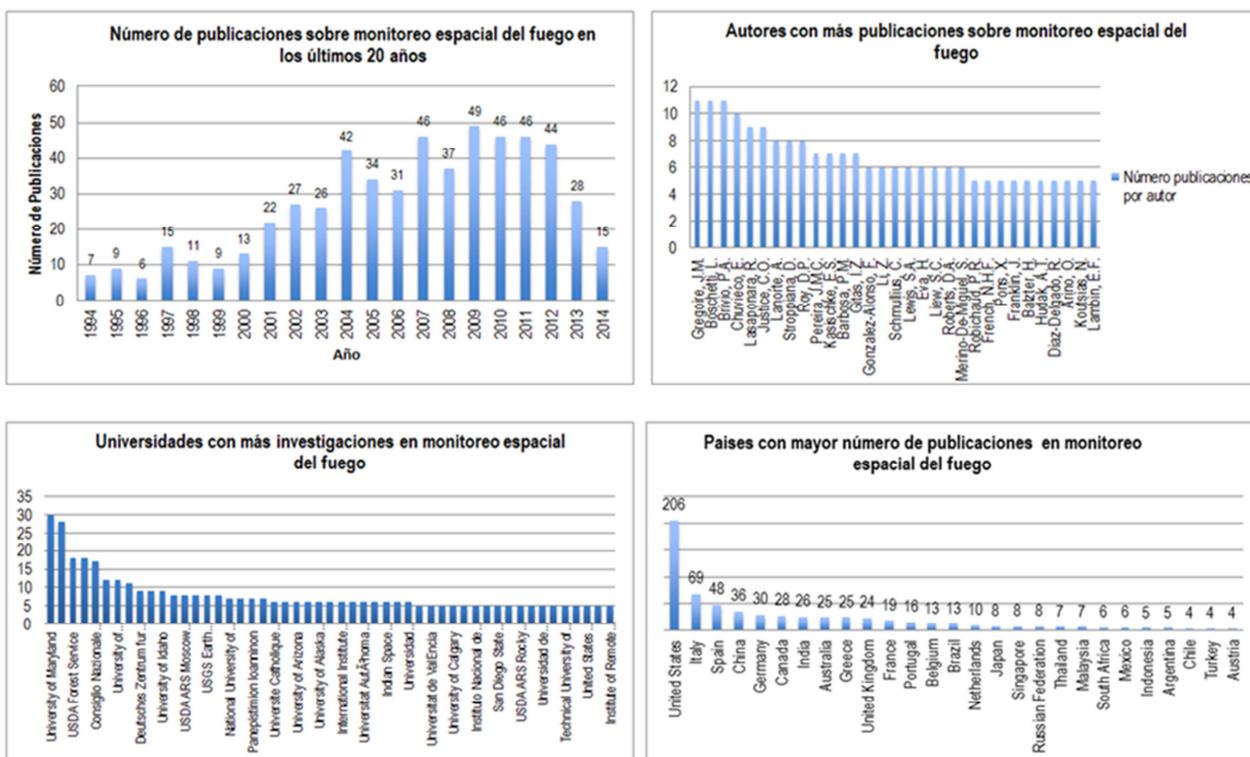


Imagen 2. Investigaciones realizadas sobre monitoreo espacial de áreas quemadas en los últimos 20 años. **Fuente:** Elaboración propia a partir de búsquedas en la base de datos Scopus 10

Entre las investigaciones realizadas en el ámbito latinoamericano, existen dos mapas de interés, uno elaborado por Chuvieco et al. (2008), basado en imágenes MODIS-Terra, y otro elaborado por Opazo y Chuvieco (2007), denominado AQS y realizado a partir de imágenes MODIS-Terra y MODIS-Aqua con reflectividad corregida. Además se destacan los trabajos realizados en Colombia: Datos para el mapeo de fuegos en Colombia reflectancia y fuegos activos MODIS (Merino, 2011), Fragmentación de los bosques y la influencia del borde en la



ocurrencia de incendios y su intensidad bajo diferentes tipos de manejo en los bosques amazónicos (Armenteras et al, 2013), Distribución geográfica y temporal de Incendios en Colombia utilizando datos de Anomalías térmicas (Armenteras et al, 2009), Incidencia de incendios sobre la vegetación de Cundinamarca y Bogotá D.C. (Colombia), entre 2001 y 2010 (Anaya, 2012). Finalmente el Informe Nacional del Estado de la Biodiversidad 2009 - 2010, incluyó un Indicador que da cuenta del grado de incidencia de los incendios forestales del país y su relación con los ecosistemas naturales presentes en los mismos, Para ello se evaluaron previamente los registros oficiales y los estudios de caso existentes, con el fin de buscar herramientas técnicas que permitan obtener un registro sistemático y adecuadamente georreferenciado contribuyendo así a mejorar la información disponible para evaluar el impacto de este fenómeno sobre la biodiversidad y los servicios ambientales (Sarmiento,2010).

A continuación se presentan imágenes satelitales como insumo para el mapeo de cicatrices de fuego, metodologías usadas y productos ya desarrollados con influencia en Colombia.

4.1 Imágenes satelitales para el mapeo de áreas quemadas

- **Imágenes Landsat**

Las imágenes LANDSAT contienen datos que varían entre 7 y 11 bandas espectrales(de acuerdo al satélite usado bien sea Landsat 5/7 o Landsat 8), Banda 1 - Costero / Aerosol (0,433 – 0,453 μm),Banda 2 – Azul (0,450 – 0,515 μm),Banda 3 (0,525 – 0,600 μm),Banda 4 – Roja (0,630 – 0,680 μm),Banda 5 - Infrarrojo cercano (0,845 – 0,885 μm),Banda 6 - Infrarrojo de onda corta (1,560 – 1,660 μm),Banda 7 - Infrarrojo de onda corta(2,100 – 2,300 μm),Banda 8 – Pancromática (0,500 – 0,680 μm), Banda 9 – Cirrus(1,360 – 1,390 μm , Banda 10 - Infrarrojo termal o de onda larga 10.30 - 11.30 μm , Banda 11 - Infrarrojo termal o de onda larga (11,50 – 12,50 μm), estas bandas son muy útiles para el monitoreo de la vegetación, en el caso de Landsat 5 y 7 la combinación de bandas 4-3-2, permite la clasificación de áreas quemadas y en Landsat 8,la combinación 5-4-3 tiene el mismo efecto. cuentan con una resolución temporal de 16 días y una resolución espacial de 30 m. Las imágenes son de libre acceso y pueden ser descargadas desde la página del servicio geológico nacional de los estados unidos <http://glovis.usgs.gov/>, las imágenes pueden ser descargadas sin ningún tipo de procesamiento, o con las correcciones geométricas



realizadas por la NASA, que incluyen su georeferenciación en el sistema de coordenadas UTM de acuerdo a la zona geográfica de la imagen.

- **Imágenes Spot- Vegetación**

El satélite SPOT 4 Vegetación, proporciona datos sobre cobertura terrestre, en cuatro bandas del espectro electromagnético: Banda 1 Azul (0,43 – 0,47 μ m), Banda 2 rojo (0,61 – 0,68 μ m), Banda 3 infrarrojo cercano (0,78 – 0,89 μ m), Banda 4 infrarrojo medio (1,58 – 1,75 μ m) con una resolución temporal casi diaria, a una resolución espacial de 1 km con una franja aproximada de 2200 km, estas características permite la observación de los cambios multitemporales a escalas regional y mundial.

- **Imágenes NOAA-AVHRR**

Este satélite, proporciona datos de 6 bandas espectrales: 1(0,58-0,68 μ m), 2(0,725-1 μ m) 3A (1,58-1,64 μ m), 3B (3,55-3,93 μ m), 4 (10,30-11,30 μ m),5(11,50-12,50 μ m). Las tres bandas que ofrecen información de infrarrojos que se utilizan para detectar la radiación de calor y, por tanto permiten la detección de fuegos, bien sea como sistema de alertas en la detección temprana de zonas con alta probabilidad de incendios o análisis temporales de áreas quemadas.

- **Imágenes MODIS**

El sensor MODIS que funciona a bordo de los satélites Terra (lanzado en 1999) y Aqua (Lanzado en 2002), brinda imágenes con resolución temporal diaria y una resolución espacial de 500 metros, con múltiples aplicaciones debido a sus 36 bandas espectrales, entre las que se destacan 7 para anomalías termales y fuegos, 3 usando datos de la plataforma Terra (MOD14, MOD14A1, MOD14A2), 3 con la plataforma AQUA MYD14, MYD14A1, MYD14A2) todos con una resolución de 1000 m y con una periodicidades de 5 minutos, diarias y semanales. Finalmente el producto MCD45A1 que combina datos de las dos plataformas, tiene resolución espacial de 500m y una periodicidad mensual.

4.2 Metodologías



Es frecuente encontrar en la literatura científica autores que proponen algoritmos automáticos para cartografiar las áreas quemadas ajustados a las condiciones locales de sus áreas de trabajo, y aunque se obtienen buenos resultados, no es claro su aplicabilidad en otras regiones (Russel-Smith et al. 1997; Koutsias y Karteris 1998; Chuvieco et al. 2002; Russel-Smith et al. 2002; Hudak y Brockett 2004; Mitri y Gitas 2004; Smith et al. 2007, citado en Bastarrika A et al , 2010).

Para la detección de áreas quemadas son usados diferentes índices espectrales, para el mapeo generalmente se combinan 2 o más índices y se usan árboles de decisión que permiten clasificar las diferentes cicatrices de fuego encontradas en las imágenes satelitales.

3.2.1 Índices espectrales

En la caracterización espectral de la vegetación quemada es necesario considerar dos tipos diferentes de señal: la que proviene de la formación y deposición de carbón y cenizas y la procedente de la alteración de la estructura y cantidad de la vegetación. El primer tipo de señal es una consecuencia de la combustión de la vegetación, y tiene el inconveniente de que dura poco tiempo y se degrada por la acción del viento y la lluvia, que pueden eliminarlo a las pocas semanas o meses después de ocurrido el incendio. La segunda señal es más estable, pero es menos nítida para discriminar los efectos del fuego, puesto que la eliminación parcial o total de la vegetación puede ser igualmente causada por otros factores, tales como la deforestación, aclareos, estrés de la vegetación o la acción de plagas (Pereira et al., 1999, citado en De Santis A y Vaughan P.2009)

- **Índice de Vegetación diferencial normalizado (Rouse et al , 1974) - NVDI**

$$NVDI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

Este índice muestra la vigorosidad de la vegetación, Donde el IRC corresponde a la reflectividad en el infrarrojo cercano y R es la reflectividad en el rojo. El NDVI varía su valor entre -1 y 1.

La interpretación de estos valores puede hacerse de la siguiente forma: valores negativos de NDVI corresponde a cuerpos de agua, Las nubes presentan valores de NDVI cercanos a 0. El suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos aunque no muy



elevados., los mayores valores de NDVI, corresponden a vegetación densa, húmeda y bien desarrollada.

- **Índice de supervisión ambiental global (GEMI)**

$$\eta = \frac{(IRC^2 - R^2) + 1.5 IRC + 0.5R}{(R + IRC + 0.5)} \quad \dots \quad GEMI = \frac{\eta(1 - 0.25\eta) - (R - 0.125)}{1 - R}$$

Es similar al índice NDVI pero presenta menor sensibilidad a efectos atmosféricos. Lo afecta el terreno desnudo, por lo tanto, se recomienda su uso en áreas de vegetación escasa o moderada.

- **Índice de área quemada (BAI)**

$$BAI = \frac{1}{(IRC - 0.1)^2 + (IRM - 0.06)^2}$$

El índice **BAI** (Burnt Area Index) (Martín 1998). El índice BAI fue diseñado para discriminar áreas recientemente quemadas, realzando la señal del carbón de las áreas afectadas por el fuego. Para ello, el índice calcula la inversa del cuadrado de la distancia biespectral a un punto de convergencia al cual tienden las áreas quemadas, que ha sido establecido según la literatura y análisis empíricos de áreas quemadas (Martín 1998). IRC corresponde a la banda de infrarrojo cercano y R a la banda de infrarrojo medio.

- **Índice de área quemada normalizado (NBR)**

$$NBR = \frac{IRC - IRM}{IRC + IRM}$$

El índice NBR, se basa en la combinación de las bandas del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio, la banda del infrarrojo cercano es sensible a la actividad fotosintética de la vegetación, mientras que la del infrarrojo proporciona información acerca del contenido de agua, esta relación permite establecer relaciones entre la detección de cambios en la vegetación viva y el contenido de humedad, así como de algunos cambios producidos en el suelo como consecuencia del fuego (Key y Benson, 2005) .



- Índice de área quemada modificado(BAIM)

$$BAIM = \frac{1}{(IRC - 0.05)^2 + (IRM - 0.2)^2}$$

En este caso el índice BAI, es modificado incluyendo una banda del infrarrojo medio, la cual se ha demostrado es sensible en la detección de áreas quemadas (Chuvieco et al, 2002).

- Índice MIRBI (área quemada infrarrojo medio)

$$MIRBI = 10LMIR - 9.8SMIR + 2$$

Este índice fue diseñado para imágenes MODIS, usando las bandas 6 y 7, los valores más altos del índice representan las áreas quemadas SMIR hace referencia a los valores de reflectividad de la banda 6 del producto diario de MODIS y LMIR corresponde a la banda 7.

3.2.2 Clasificación supervisada

La clasificación supervisada consistente en realizar mapas a partir de imágenes satelitales de manera semi-automatizada, en donde el usuario elige el número de clases (leyenda= de las cuales va a estar compuesto el mapa, la primera fase de este proceso es la de entrenamiento, en donde el usuario debe conocer la zona a priori o realizar trabajo de campo , para posteriormente seleccionar visualmente en la imagen una muestra de los pixeles (niveles digitales) que componen cada clase, posteriormente el software seleccionado (Erdas, Idrisi, Enví entre otros), mediante la aplicación de algoritmos y métodos de muestreo entre los que se destacan (Leica-Geosystems;2010):

Paralelepípedo: Los niveles digitales del pixel evaluado se comparan con los limites superior e inferior, cuando un pixel se encuentra en este rango entonces es asignado a la clase definida

Mínima distancia: Calcula la distancia espectral entre el pixel a clasificar y el pixel de la muestra de la clase evaluada, este proceso se realiza para todas las clases y el pixel se asigna a la clase en la que presenta la menor desviación estándar.



Distancia Mahalanobis: El método usado es similar a la mínima distancia, pero en este caso se usa la matriz de covarianza, la varianza y covarianza son calculadas con el fin de que los conglomerados que presentan altas variaciones sean clasificados en clases que varían de manera similar.

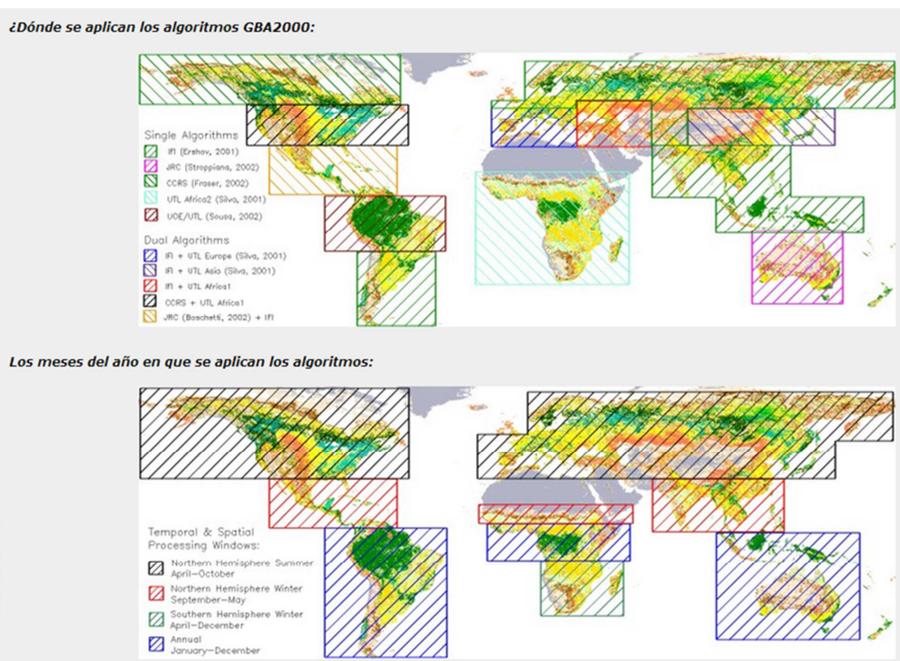
Máxima probabilidad: La regla de decisión de la máxima probabilidad está basada en la probabilidad de que un pixel pertenezca a una clase en particular. La ecuación básica asume que estas probabilidades son iguales para todas las clases y que los datos de entrada tienen una distribución normal.

La selección del método de muestreo, se realiza a partir del comportamiento estadísticos de los datos de entrada, después de todos los procedimientos el software entrega la imagen clasificada de acuerdo a la leyenda seleccionada y con los datos estadísticos que permiten evaluar la precisión del mapa.

3.2 Mapas de áreas quemadas

- GBA 2000

El producto GBA 2000 fue lanzado en diciembre de 2002, consiste en un mapa de las zonas quemadas a nivel mundial para el año 2000, el insumo utilizado fueron las imágenes de satélite SPOT-Vegetación, la resolución espacial es de 1 km, los mapas y datos están



disponibles en la página web: http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/burnt_areas_gba2000

Se puede acceder de forma libre a estos, proporcionando datos básicos como nombre, correo electrónico y organización; Además del mapa, se pueden conocer los algoritmos usados por región para su generación (Imagen 3) y las estadísticas de la superficie quemada por tipo de cobertura vegetal, éstas están en formato .XLS, que contiene los siguientes datos: Superficie quemada mensual (km²) , número de cicatrices, tamaño promedio de la cicatriz (km²), Porcentaje de la superficie total de área quemada por país (año 2000 solamente) , Porcentaje de área quemada por tipo de cobertura y por país , para este último se usó como insumo el mapa de cobertura terrestres desarrollado por la Universidad de Maryland , en el año 1998, con una resolución espacial de 1 km.

Imagen 3. Algoritmos aplicados por región en la elaboración del producto GBA 2000

Los mapas (formato raster) están organizados en bloques para su descarga (

Imagen 4), los datos son de tipo binario, área quemada y no quemadas, los archivos pueden ser importados directamente a ArcInfo, y además se ofrece la opción de descarga en formato de lectura para ENVI.



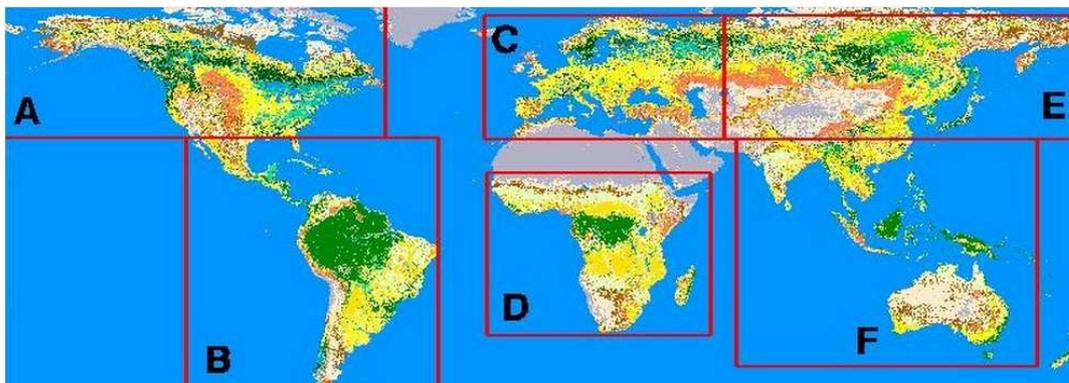


Imagen 4. Regiones para descarga del producto GBA 2000

- **GLOBSCAR-GLOBCARBON- Atlas de fuego ASA**

Fue un proyecto que se desarrolló en el año 2000 por la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Universidad de Lisboa, con el uso de datos de los satélites ERS-2; ATSR, con una resolución espacial de 1 km y una temporalidad de 30 días se tenía el objetivo de generar y probar algoritmos para mapear áreas quemadas en el contexto global. A este proyecto se le dio continuidad en el año 2001 con GlobCarbon (Global Carbon), en donde además se usaron imágenes ASTER (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer), con una resolución espacial de 1Km, se generaron resultados hasta el año 2012 (por la pérdida de su satélite Envisat, cuyos datos eran empleados en la construcción de este producto), La ESA generó el atlas mundial de áreas quemadas, los mapas están disponibles desde el año 1995 hasta marzo de 2012, y se tienen dos versiones de acuerdo al algoritmo usado para su construcción, estos se pueden descargar de manera libre, sin necesidad de registros en la página <http://due.esrin.esa.int/wfa/>, se encuentra en formato ASCII, el cual posteriormente puede ser convertido a formato raster.

- **Mapa de áreas quemadas globales L3JRC**

El mapa disponible desde 2007, contiene datos para siete años, y fue elaborado usando imágenes del satélite spot-vegetación. La resolución espacial es de 1 km, y la temporalidad diaria. El producto fue desarrollado entre la ESA, La Universidad de Leicester, La universidad Católica de Lovaina, y el instituto Smithsonian de Investigación Científica Tropical (STRI). Los mapas están disponibles en formato binario (área quemada y no quemada) y en formato ASCII.



- **Mapas y Focos de incendios-NASA**

La NASA, tiene disponible en el sitio <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/firemap/>, de manera libre para descarga con previo registro, mapas globales de fuego generados a partir de los datos MODIS (Terra y Agua), se encuentra disponible un sistema de alertas de focos de incendios, en donde con una frecuencia diaria y desde el año 2000 hasta la fecha se obtiene información de los lugares con ocurrencia de incendios, se pueden descargar las coordenadas de estos puntos con geometría punto en formato shapefile o kmz, mapas globales (mensuales) de áreas quemadas en formato JPG, y una animación mes a mes de los incendios, disponibles desde el año 2003 hasta el año 2012. Este es uno de los mejores productos, pero tiene como limitación que solo captura incendios activos durante el momento que pasa el satélite., además de que no permite tener una idea del área quemada

- **Zonificación de riesgos a incendios, pronósticos y alertas tempranas para Colombia-IDEAM**

En el año 2009, El Instituto de estudios ambientales de Colombia (IDEAM) y La Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal-CONIF, realizaron el Mapa Nacional de Zonificación de Riesgos a Incendios de la cobertura vegetal - escala 1:500.000, construido teniendo en cuenta variables como: Cobertura vegetal (Altura, biomasa, humedad de la vegetación) , temperatura, precipitación, vientos, radiación, pendiente, accesibilidad (vías primarias y secundarias),y frecuencia de incendios en la zona históricamente, estas variables fueron analizadas bajo dos escenarios, en condiciones normales y con fenómeno de Niño, y califican las coberturas vegetales del país en 5 categorías de riesgo: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto (Páramo, G. 2009).

Posteriormente a la publicación de este mapa, en el año 2011 el IDEAM publico el documento "Protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal - Escala 1:100.000. Esta metodología, permite que otras organizaciones como las corporaciones autónomas regionales, consultoras entre otras, construyan mapas en sus áreas de interés a una escala más detallada, que el mapa publicado por el IDEAM en el 2009.

El servicio de pronósticos y alertas tempranas del IDEAM, emite un boletín diario sobre la probabilidad de ocurrencia de incendios de la cobertura vegetal, este se realiza a través de un modelo desarrollado específicamente para este fin. Este modelo, denominado SIGPI



(Sistema de Información Geográfica para la Prevención de Incendios) incorpora la amenaza que existe por aspectos climáticos (precipitación diaria acumulada y temperatura máxima diaria), biológicos (susceptibilidad de la cobertura vegetal a los incendios) y antrópicos (cercanía a centros poblados) a fin de identificar las zonas de riesgo para la ocurrencia de estos fenómenos. (IDEAM, 2014)

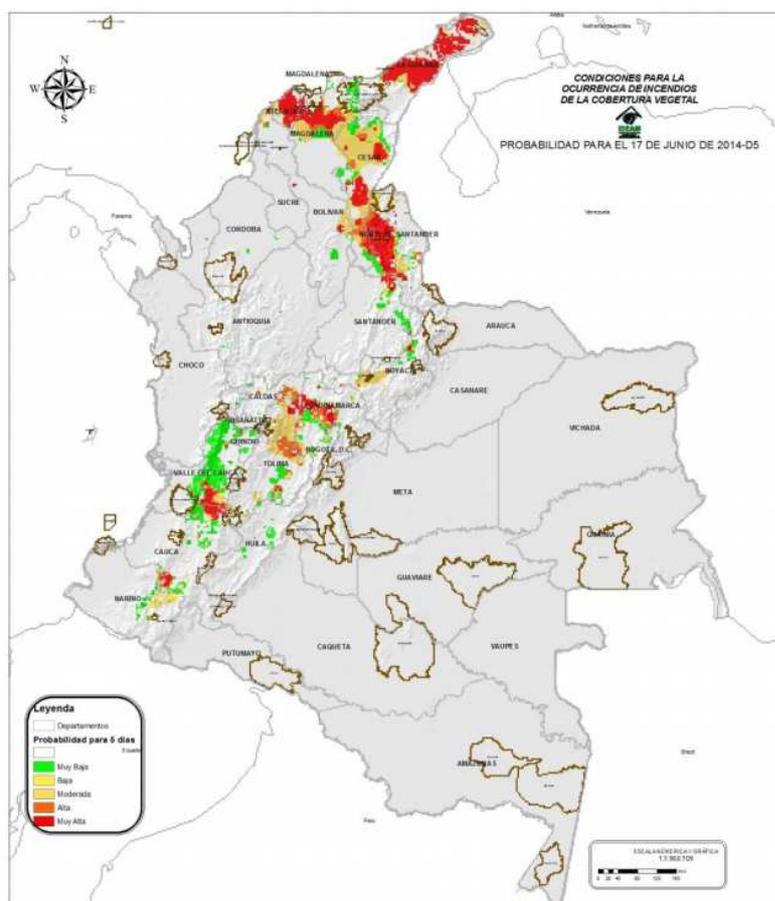


Imagen 5. Mapa generado por el sistema de alertas de riesgos de incendios del IDEAM

- **Indicador de incidencia de incendios forestales en biomas naturales y transformados en Colombia durante el periodo 1997-2009 -Instituto Alexander von Humboldt**

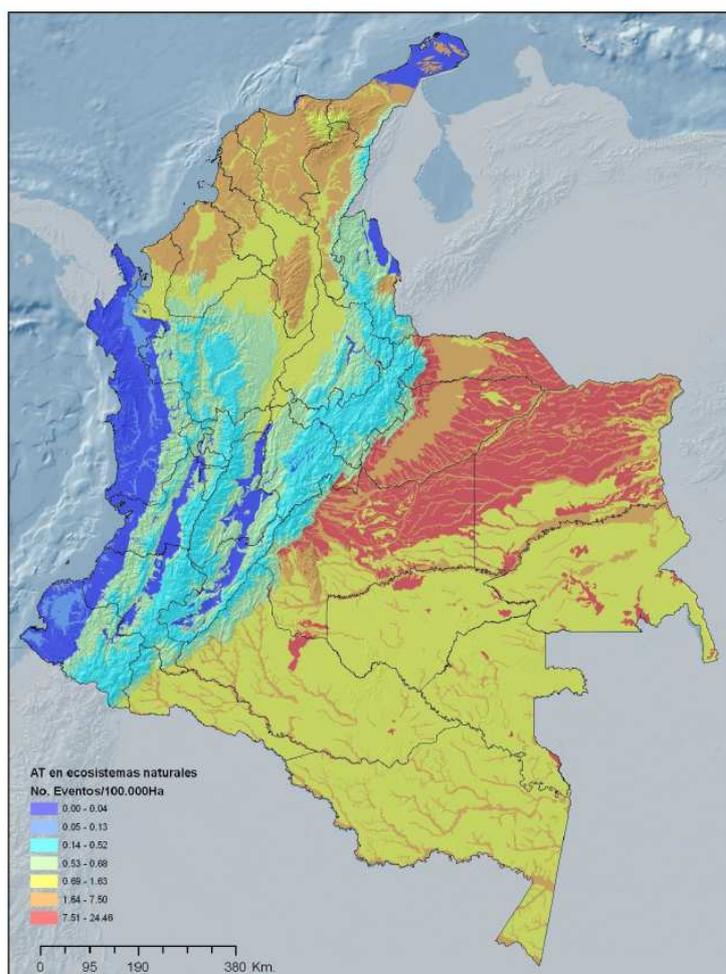


El indicador evalúa la incidencia de incendios forestales en los ecosistemas naturales mediante el registro del número de anomalías térmicas por año, y por cada 100.000 ha de cada tipo de bioma existente en Colombia.

Los datos de áreas quemadas que se usaron para el cálculo del indicador se obtuvieron del programa ATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR) de la Agencia Espacial Europea, para un periodo de 13 años (1997 / 2009). Para la determinación de los biomas y ecosistemas transformados y predominantemente naturales, se usó el mapa de Ecosistemas (IDEAM, IGAC, IAVH, IIAP, INVEMAR, 2007), a partir del cruce de estos dos datos se obtuvo la incidencia de incendios forestales calculado para cada bioma y la incidencia de incendios forestales por bioma, en ecosistemas transformados y predominantemente naturales. (Sarmiento y Fonseca, 2010). Este trabajo mostró que las áreas con mayor incidencia de fuegos reportadas para Colombia, corresponden entre otras a la Sierra Nevada de Santa Marta (Orobioma alto de la SNSM), la Sierra de la Macarena,

Amazonía y la Orinoquia. (Imagen

6)



18



Imagen 6. Incidencia de incendios forestales en ecosistemas naturales por tipo de bioma

CONCLUSIONES

Es importante el monitoreo de las áreas quemadas y sus procesos de restauración bien sean asistidos o naturales

Las iniciativas desarrolladas en Colombia si bien permiten actuar de manera inmediata en casos de incendios mediante el sistema de alertas del IDEAM, requieren de una estrategia que permita conocer a fondo las áreas perturbadas por esta causa. La iniciativa desarrollada por el IAvH en el año 2010, constituye un avance importante desde el cual es oportuno generar continuidad y realizar otros trabajos que impliquen desarrollos metodológicos para analizar escalas más detalladas, igualmente el tener identificadas las zonas afectadas por incendios permite realizar una priorización de las áreas a restaurar, teniendo en cuenta factores como el tipo de ecosistema y la posibilidad de conectividad ecológica con otros fragmentos.



BIBLIOGRAFIA

Amaya- Villabona, Armenteras D y Pascual.2010. Fire Incidence on Vegetation in Cundinamarca and Bogota DC (Colombia) During the 2001-2010 Period Acta Biológica Colombiana 17 (1), 143-158

Armenteras, D., Romero M y. Galindo G. 2005 .Vegetation fire in the savannas of the Llanos Orientales of Colombia. World Resource Review 17 (4): 531-543

Armenteras D, González T, y Retana J, 2013.Forest fragmentation and edge influence on fire occurrence and intensity under different management types in Amazon forests, Biological Conservation, Volume 159. 73-79.

Anaya-Acevedo J, Chuvieco-Salinero E. 2010. Validación para Colombia de la estimación de área quemada del producto L3JRC en el periodo 2001-2007. Actual Biol 32: 29-40.

Bastarrika A, Chuvieco E, y Martin M. 2010. Una nueva herramienta cartográfica para la cartografía automática de áreas quemadas en ecosistemas templados con imágenes LandSat TM/ETM+. Congreso Internacional en Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica [Recurso electrónico]: Ciudad de Tegucigalpa, Honduras, del 11 al 16 de octubre de 2010. Disponible en : <http://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=533232>



Cabrera E., Vargas D. M., Galindo G. García, M.C., Ordoñez, M.F., Vergara, L.K., Pacheco, A.M., Rubiano, J.C. y Giraldo, P. 2011. Memoria técnica de la cuantificación de la deforestación histórica nacional – escalas gruesa y fina. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 106 p. Páginas web consultadas:

Chuvieco, E., S. Opazo, W. Sione, H. D. Valle, J. Anaya, C. D. Bella, I. Cruz, L. Manzo, G. López, N. Mari, F. González-Alonso, F. Morelli, A. Setzer, I. Csiszar, J. A. Kanpandegi, A. Bastarrika & R. Libonati. 2008. Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data. *Ecological Applications* 18: 64-79.

Chuvieco, E; M.P. Martín y G. Ventura 2002. Evaluación de imágenes NOAA-AVHRR y Terra-MODIS para cartografía regional de áreas quemadas, X simposio de la Sociedad de Expertos latinoamericanos en Percepción Remota, Cochabamba, Bolivia,

Key, C.H.; Benson, N.C. 2006. Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In: D. C. Lutes et al., Editors, FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system, General Technical Report 2005:, RMRS-GTR-164-CD:LA1-LA51, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden

Lavorel, S.; Flannigan, M.D.; Lambin, E.F.; Scholes, M .2007. Vulnerability of land systems to fire: Interactions among humans, climate, the atmosphere, and ecosystems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12: 33 - 53.

Leica-Geosystems; 2010. Clasificación. ERDAS Field Guide:

Merino-de-Miguel S, González-Alonso F, Huesca M, Armenteras D, Franco C. 2011. MODIS Reflectance and Active Fire Data for Burn Mapping in Colombia. *Earth Interact* 15: 1-17. <http://dx.doi.org/10.1175/2010EI344.1>

Nepárea D, Verissimo A, Alencar A, Nobre CA, Lima E, Lefebvre P, Schlesinger P, Potter C, Moutinho P, Mendoza E, Cochrane M, Brooks V. 1999. Large scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, 398: 505-508

Organización de las Naciones Unidad para la alimentación y la agricultura (FAO).2014.El Estado de los bosques del mundo. Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/sofo/es/>



Páramo, G. 2009. Mapa nacional de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co>

Parra. 2011 Incendios de la cobertura vegetal en Colombia, Cali: Universidad Autónoma de Occidente.

Pereira, J.M.C., Sa, A.C.L., Sousa, A.M.O., Silva, J.M.N., Santos, T.N. & Carreiras, J.M.B. 1999. Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. In: E. Chuvieco (Ed.). Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin. Springer-Verlag, Berlin. 123-138 citado en De Santis A y Vaughan P. 2009. Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. Universidad de Santiago de Compostela. Recursos Rurales (2009) n° 5: 93-100 Disponible en: https://dspace.usc.es/bitstream/10347/3819/1/RR_5_7.pdf

Sarmiento C y Fonseca C, 2010. Indicador de incidencia de incendios forestales en biomas naturales y transformados en Colombia durante el periodo 1997-2009. Informe sobre el Estado de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente Componente de Biodiversidad Continental - 2009 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 167 88-100.

The Nature Conservancy, WWF e UICN, 2004. El fuego, los ecosistemas y la gente. Una evaluación preliminar del fuego como tema global de conservación, citado en .Sarmiento C y Fonseca C, 2010. Indicador de incidencia de incendios forestales en biomas naturales y transformados en Colombia durante el periodo 1997-2009 .167 88-100.

Van Wagtenonk, J. W., R. R. Root & C. H. Key. 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. Remote Sensing of Environment 92: 397-408.

Páginas consultadas:

[http://www.cepal.org/colombia/noticias/paginas/6/44936/Folleto Amazonia Posible y Sostenible.pdf](http://www.cepal.org/colombia/noticias/paginas/6/44936/Folleto_Amazonia_Posible_y_Sostenible.pdf)

[http://www.minambiente.gov.co/documentos/DocumentosInstitucional/incendios forestales/170712_estrategia_corresponsabilidad.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/DocumentosInstitucional/incendios_forestales/170712_estrategia_corresponsabilidad.pdf)

http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_906_es.html

<http://earthobservatory.nasa.gov/?eocn=topnav&eoci=logo>





Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt



PRODUCTO: ALGORITMOS Y APLICACIONES PARA EL
MONITOREO DE VARIABLES ESENCIALES DE LA
BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES

**DOCUMENTO METODOLÓGICO PARA EL
PROCESAMIENTO Y EXTRACCIÓN DE
INFORMACIÓN SOBRE BIODIVERSIDAD EN
HUMEDALES CON EL USO DE DATOS LIDAR**

Sergio Enrique Rojas

Centro de Análisis y Síntesis (CAS) - Laboratorio de Análisis Espacial

Programa de Gestión de Información y Conocimiento

Instituto Humboldt

Julio de 2014



Contenido

INTRODUCCIÓN 3

1. PRINCIPIOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES LiDAR 3

1.1. Componentes del Sistema 3

1.2. Datos suministrada por LiDAR..... 4

1.3. Captura de datos LiDAR 5

1.4. Aplicación LiDAR a desarrollar..... 6

2. USO GENERAL DE DATOS LiDAR 7

2.1. Mezcla de Archivos e Importación 7

2.2. Consulta de las estadísticas de los datos LiDAR 8

2.3. Visualización de Archivos 9

2.4. Extracción de altura de los elementos a partir de datos LiDAR 10

3. LiDAR PARA LA EXTRACCIÓN DE MÉTRICAS DE BOSQUES..... 11

3.1. Indicador de máxima altura del dosel..... 11

3.2. Apertura del dosel 11

3.3. Cobertura del dosel inferior relativa a la apertura del dosel 12

3.4. Cobertura del dosel superior relativa a la apertura del dosel..... 14

3.5. Relación de la cobertura del dosel inferior y la cobertura del dosel de superior 14

3.6. Indicadores adicionales de estructura del bosque 15

3.7. Resultados en un área de muestra 15

4. MODELOS DIGITALES DE TERRENO PARA EL ANÁLISIS HIDROLÓGICO..... 21

4.1. El modelamiento hidrológico y la biodiversidad 22

4.2. Trabajo en HEC GeoRAS – ARCGIS..... 23

4.3. Trabajo en HEC-RAS..... 33

4.4. Fase final en HEC-GeoRAS- ArcGIS..... 48

5. HERRAMIENTAS Y AYUDAS DE INTERNET 55

BIBLIOGRAFÍA..... 57



INTRODUCCIÓN

Las tecnologías geoespaciales han demostrado desde sus inicios una gran capacidad para producir información relevante sobre las propiedades de los ecosistemas y sobre sus dinámicas. En el caso de los sensores remotos, la posibilidad que ofrecen de cubrir áreas extensas, en ocasiones de difícil acceso, con una frecuencia relativamente alta en el tiempo y de suministrar información en diferentes regiones del espectro electromagnético, generan un gran potencial para el monitoreo de los ecosistemas que otros métodos de captura de datos difícilmente igualan. Entre las tecnologías geoespaciales de desarrollo reciente, el LiDAR (*Light Detection and Ranging*) se ha venido perfilando como uno de los más importantes avances, dado que proporciona información acerca de las características tridimensionales de los elementos de la superficie terrestre.

En el campo de los humedales, el potencial de los sensores LiDAR es bastante importante, dado que permite la generación de modelos digitales del terreno con una alta resolución espacial y gran exactitud de posición tanto vertical como horizontal, lo que hace posible efectuar diferentes tipos de modelamientos hidrológicos con un alto nivel de certidumbre. Adicionalmente, la información que proporcionan los sensores LiDAR respecto a la altura de la vegetación, permite hacer análisis e inferencias acerca de las relaciones ecológicas que se presentan entre el humedal, entendido como superficie de agua, y la vegetación que lo rodea.

Considerando la utilidad de los sensores LiDAR en el contexto de los humedales, se ha elaborado el presente documento, que busca constituirse en una herramienta básica para generar información de alta relevancia en la caracterización de los humedales, como base para el análisis y monitoreo de su estructura y funcionamiento. En la primera parte se hace una contextualización de los principios físicos de LiDAR y sus aplicaciones en humedales y bosques asociados, en la segunda parte se describen procedimientos generales de procesamiento y procedimientos para generar diferentes tipos de información acerca de la estructura tridimensional de los bosques; en la tercera parte se desarrolla una aplicación de modelamiento hidrológico para determinar el comportamiento de diferentes variables relevantes para determinar el funcionamiento de los humedales.

1. PRINCIPIOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES LiDAR

1.1. Componentes del Sistema:



Los sistemas LiDAR están conformados, básicamente, por un escáner láser, una unidad de medición inercial (IMU), un sistema GPS abordo cuya corrección diferencial se hace con estaciones GPS terrestres, y un conjunto de computadores que sirven, entre otras cosas, para el almacenamiento de los datos y la incorporación de los planes de vuelo (Figura 1). El principio es que el transmisor del escáner hace una medición de la distancia (relativa al tiempo de retorno de la señal) entre el punto de origen de la señal y la superficie, lo que junto con los datos de posición suministrados por los GPS (latitud, longitud, altura) y de orientación suministrados por el IMU (deriva, cabeceo y balanceo), permiten hacer el cálculo de la altura y posición de los objetos en el terreno.

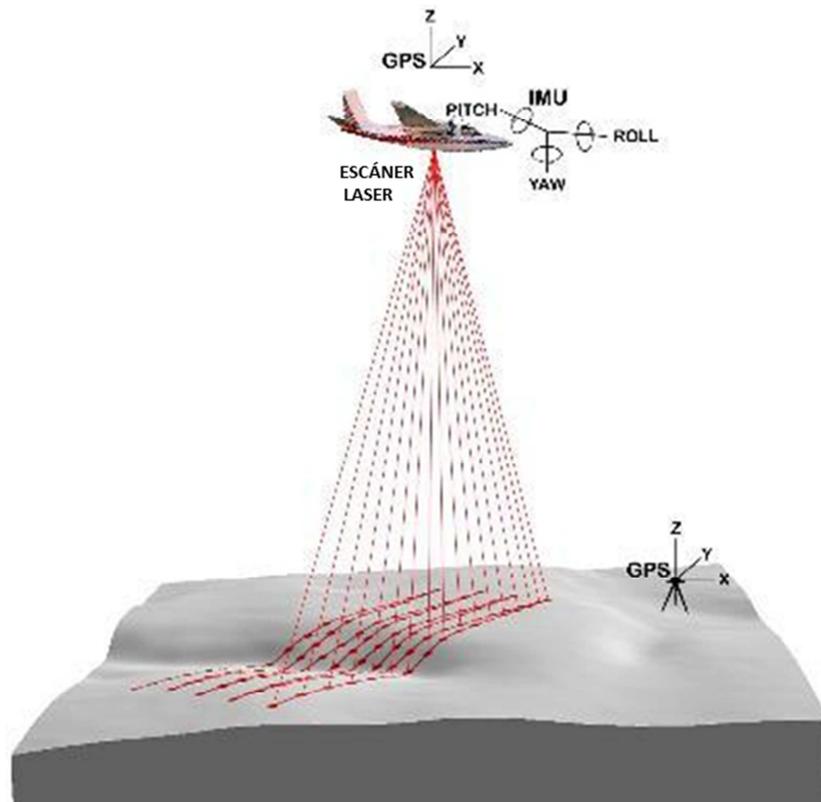


Figura 1: componentes del sistema LiDAR.
 Fuente: <http://www.landmarktrees.net/lidar.html> modificado

1.2. Datos suministrada por LiDAR

La información de LiDAR puede ser almacenada en varios tipos de formatos, pero el más generalizado es el archivo *.las, que corresponde a una nube de puntos, cada uno de los cuales contiene básicamente tres atributos: número de retorno, intensidad y posición respecto a un datum horizontal y vertical determinado. Con relación al número de retorno el principio es que el sensor emite pulsos (o haces de luz) cada uno de los cuales, de manera individual retornan al sensor, esta señal de retorno puede estar conformada por varios ecos dependiendo de los



elementos con los que el haz de luz haya interactuado (Figura 2); si por ejemplo el haz de luz pasa por un tipo de vegetación alta, otra más baja y el suelo entonces se tendrán tres retornos; el primer retorno es usualmente el de los elementos de mayor altura mientras que el último es el de los elementos más bajos.

La intensidad por su parte es un atributo que describe la fuerza con la que retorna cada uno de los pulsos emitidos, lo que depende fundamentalmente de las características intrínsecas de los elementos y de la misma potencia del pulso. Finalmente, el atributo de posición corresponde a las coordenadas X, Y y Z de cada uno de los puntos y sus valores resultan del procesamiento de los datos suministrados por el GPS, IMU y la medición de los tiempos de retorno.

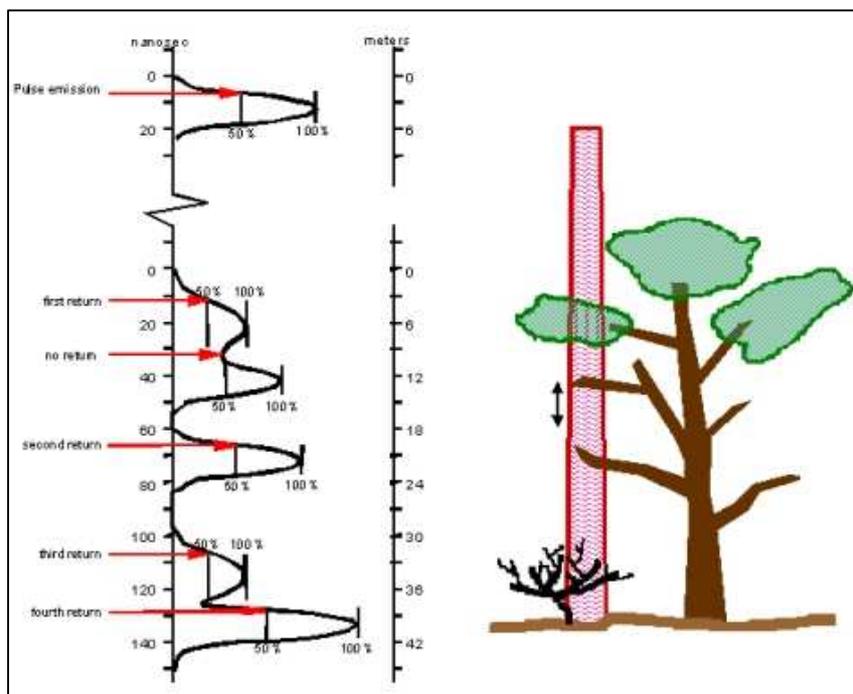


Figura 2: En esta figura se puede observar como a partir del pulso emitido se dan varias señales de retorno.

Fuente: <https://www.e-education.psu.edu/lidar/book/export/html/1873>

1.3. Captura de datos LiDAR

Uno de los aspectos importantes a tener en cuenta es la densidad de puntos, lo que determina la resolución en la que se puede generar información. La densidad depende de varios factores como son: la altura de vuelo, velocidad de vuelo, frecuencia de repetición de pulsos, ángulo de barrido y el patrón de barrido. La altura y la velocidad de vuelo son factores que están condicionados por la plataforma de captura, generalmente con helicópteros se pueden programar vuelos relativamente lentos y a una menor altura, lo que permite obtener una mayor cantidad de datos. También es necesario considerar condiciones del terreno como el relieve, que limita la altura mínima de vuelo, y el estado del tiempo que es relevante dado que el LiDAR no tiene la capacidad de transmitir los



pulsos a través de las nubes, motivo por el cual los vuelos suelen planearse a una altura inferior al nivel medio de las nubes en la zona de interés.

La frecuencia de repetición depende del equipo que se utilice, actualmente hay equipos que permiten capturar hasta 600.000 puntos por segundo. El ángulo de barrido usualmente no supera los 40°, debido a que ángulos superiores generan inexactitudes hacia los bordes dando lugar a inconsistencia en las zonas de superposición que se presentan entre fajas de barrido adyacentes. El patrón de barrido depende igualmente del sensor, el patrón elíptico asegura una mayor densidad de puntos que los patrones zigzagueantes (Figura 3).

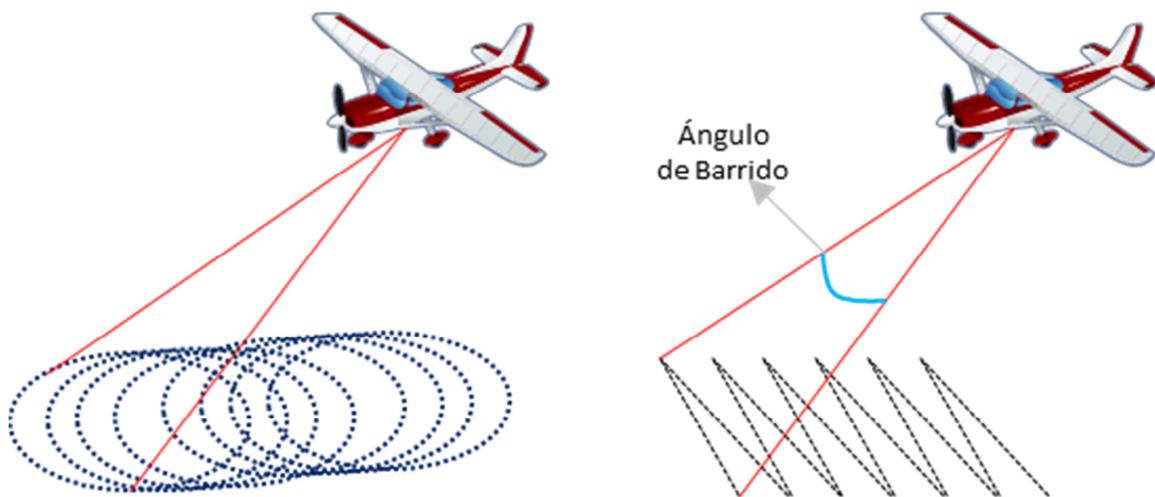


Figura 3: Patrones de barrido en sensores LiDAR; a la izquierda el patrón elíptico y a la derecha el patrón en zigzag
Fuente: elaboración propia. Avión: imágenes de Power Point

En el caso de los humedales que tienen bosques asociados, es recomendable una alta densidad de puntos, dado que esta condición hace más factible la obtención de información que se encuentra debajo de los estratos arbóreos superiores, como el sotobosque, el suelo, o la superficie de agua. En este sentido es también recomendable que el ángulo de barrido sea bajo, dado que la capacidad de penetración de haces de luz es inversamente proporcional al ángulo de barrido, y que la potencia del láser sea alta para asegurar una alta capacidad de penetración.

Uno de los temas importantes es que los LiDAR no registran información en las superficies de agua, motivo por el que la captura de datos debe hacerse en el perímetro del humedal y en las zonas periódicamente inundables, lo que implica efectuar la captura, en la medida de lo posible, en las épocas más secas.

1.4. Aplicación LiDAR a desarrollar



En este documento se trabajan dos aspectos, uno orientado a la generación de métricas del bosque y el otro a la generación de información hidrológica. Respecto al primero, se generan 5 métricas de estructura del bosque utilizados en Pekin, et al (2012) quienes encontraron relaciones entre la estructura del bosque seco y la diversidad bioacústica. Tales indicadores son:

- *Máxima Altura de Dosel:* que representa la altura máxima del dosel de los árboles
- *Apertura del dosel:* corresponde a la suma de la intensidad de retornos en un área determinada, refleja la cantidad de luz que penetra hasta el suelo a través de los árboles y en este sentido refleja que tan abierto es el bosque. Valores bajos indican que el bosque es cerrado y valores altos que es abierto.
- *Cobertura del dosel inferior relativa a la apertura del dosel:* corresponde a una relación entre el dosel de los estratos arbóreos inferiores y la apertura del bosque. Valores altos representan que el dosel de los estratos arbóreos bajos es cerrado.
- *Cobertura del dosel superior relativa a la apertura del dosel:* corresponde a una relación entre el dosel de los estratos arbóreos superiores y la apertura del bosque. Valores altos representan que el dosel de los estratos arbóreos más altos es cerrado.
- *Relación de la cobertura del dosel inferior y la cobertura del dosel inferior:* este índice refleja el nivel de complejidad y el desarrollo de los árboles de edad intermedia.

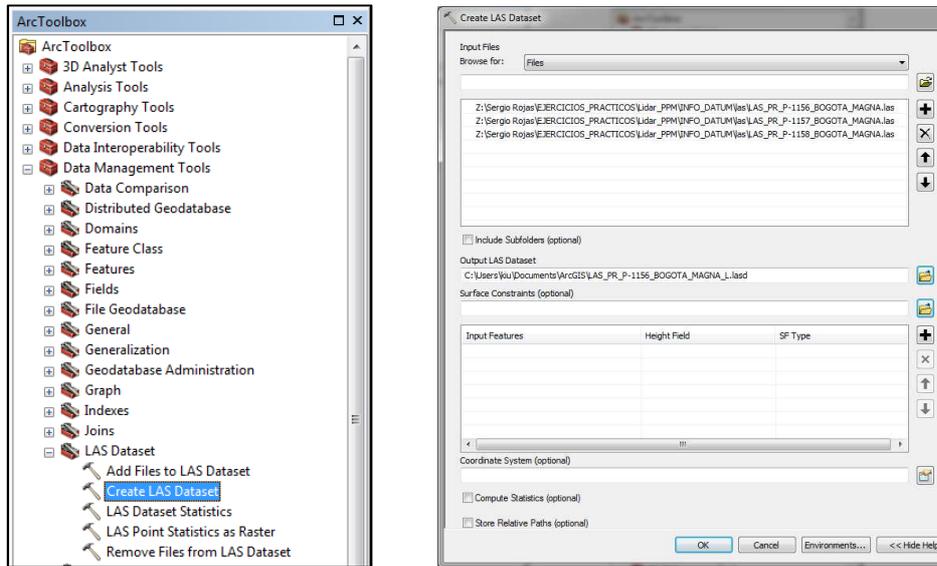
Respecto al tema hidrológico, en el que como datos de entrada obtenidos mediante sensores remotos se usan modelos digitales de terreno, la aplicación consiste en efectuar modelamiento hidrológico con el software HEC-RAS a partir del cual se determina la profundidad y velocidad de ríos así como áreas de inundación bajo diferentes escenarios representativos de caudales dados en periodos de retorno específicos.

2. USO GENERAL DE DATOS LiDAR

2.1. Mezcla de Archivos e Importación

Usualmente los datos de LiDAR se entregan en diferentes archivos, ya sea por motivos de volumen del proyecto o por el esquema de captura de los datos, debido a esto uno de los procedimientos iniciales debe ser el de unir diferentes archivos en uno solo. Este procedimiento permite adicionalmente convertir los archivos del formato *las a formato *lasd, que es con el que trabaja ArcGis; la interface mediante la cual se lleva a cabo este procedimiento se observa a continuación.

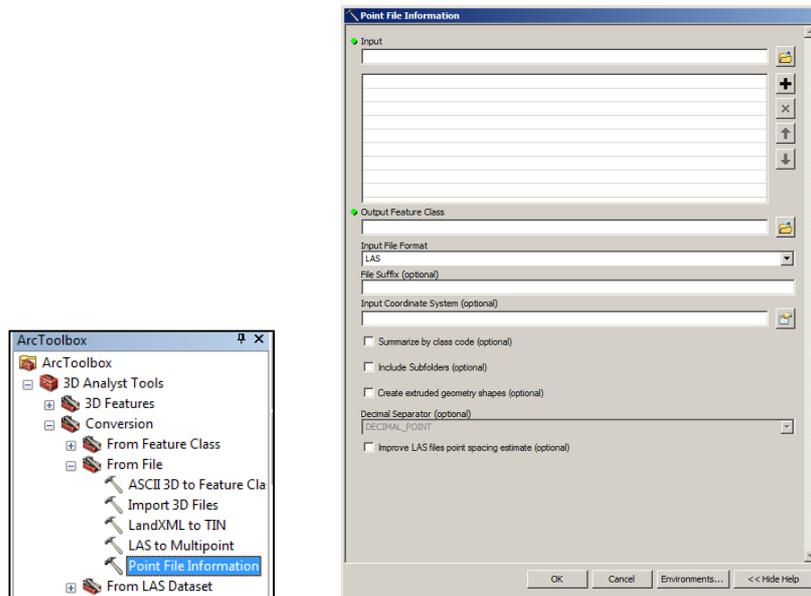




2.2. Consulta de las estadísticas de los datos LiDAR

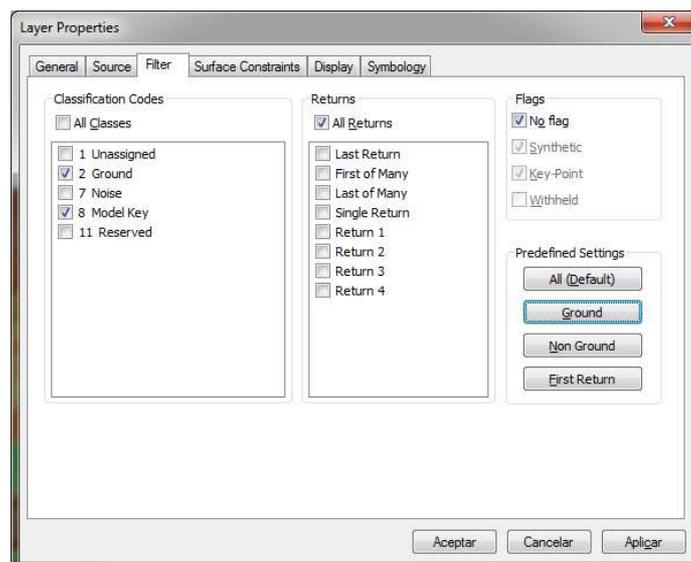
Para valorar los datos LiDAR y tener una idea general de sus características es útil consultar sus estadísticas. Uno de los aspectos importantes a considerar es la densidad de puntos, dado que es una de las especificaciones técnicas relevantes que se debe definir previa a la ejecución del vuelo, de acuerdo a los objetivos del proyecto; adicionalmente al consultar las estadísticas se pueden identificar datos atípicos que pueden indicar errores de captura. La herramienta para consultar las estadísticas en ArcGIS es *Point File Information* en la barra de herramientas *3D Analyst Tools/3D Features/Conversion/From File*.





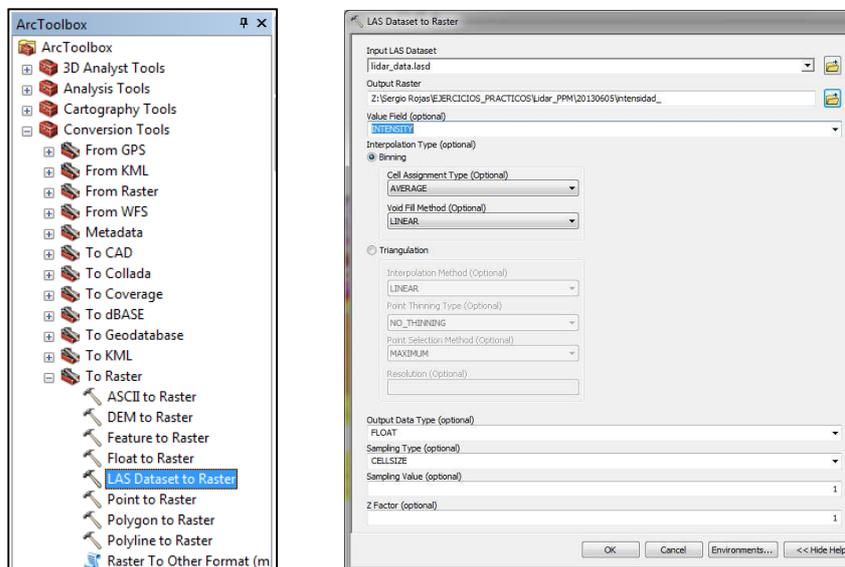
2.3. Visualización de Archivos

En ArcGIS es posible ver todos los retornos o un conjunto de los mismos según la selección que se desee hacer, lo que se fija en la pestaña *filter* de las propiedades de la capa (clic derecho sobre el archivo en la tabla de contenido de ArcGIS). Adicionalmente el programa posee opciones para el despliegue de retornos correspondientes a suelo, no suelo y primer retorno entre otros.



2.4. Extracción de altura de los elementos a partir de datos LiDAR

Uno de los aspectos claves de LiDAR es que permite obtener de manera simultánea el modelo digital de superficie (altura de elementos sobre el terreno) y el modelo digital de terreno (altura del terreno como tal); la diferencia entre los dos permite obtener la altura absoluta de los elementos sobre el terreno. Para obtener este indicador se debe primero generar, a partir del primer retorno, un modelo digital de elevación raster y luego hacer lo mismo pero con el último retorno, lo que requiere la aplicación de algún método de interpolación. Este procedimiento se hace mediante la herramienta *LAS Dataset to Raster* que se encuentra embebida en la herramienta de ArcGIS *Conversion Tools*.



Para que la capa de alturas corresponda al primer o último retorno basta con seleccionar en la herramienta de propiedades, pestaña *Filter* (sección 2.3), el retorno con el que se requiere generar el modelo de elevaciones.

Una vez generados ambos modelos digitales de elevación el procedimiento consisten en extraer la diferencia entre el modelo de superficie y el modelo de terreno, mediante el uso de la herramienta *Raster Calculator* del módulo de análisis espacial. Cabe anotar que como resultado de este procedimiento pueden generarse píxeles con valores negativos, principalmente a causa de los procedimientos de interpolación y particularmente en zonas relativamente grandes en las que se presentan vacíos de información, como es el caso de los cuerpos de agua. En tal caso se puede aplicar un condicional que elimine esos valores y los pase a cero o a la cota de altura de los puntos más cercanos, este procedimiento es pertinente si se considera que en general los valores



negativos se corresponden con zonas donde las diferencias de altura son muy bajas; valores negativos muy alejados de cero están relacionados principalmente con errores de captura ocasionados por las propiedades de los objetos, por ejemplo en cuerpos de agua. Para este fin se puede utilizar la herramienta *Raster Calculator* y aplicar una fórmula condicional como la que sigue:

Con("altura_elementos.img" < 0, 0, "altura_elementos.img")

Lo que traduce que si los píxeles que representan la altura de los elementos tienen un valor inferior a cero entonces pasen a ser ceros o en caso contrario mantienen su valor original. El valor de reasignación puede también ser el de la cota de altura de los puntos más cercanos en vez de cero.

3. LIDAR PARA LA EXTRACCIÓN DE MÉTRICAS DE BOSQUES

3.1. Indicador de máxima altura del dosel

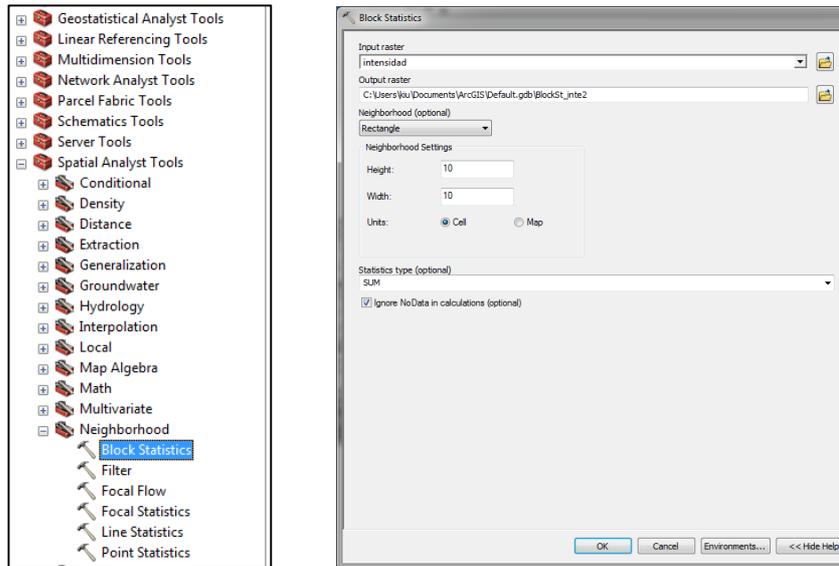
Como resultado del procedimiento de extracción de altura de los elementos se obtiene la altura máxima tanto de elementos antrópicos (construcciones, tanques etc.) y naturales. Una opción para aislar las coberturas de bosque y obtener exclusivamente este indicador es crear máscaras raster de las coberturas correspondientes a uso urbano por ejemplo.

3.2. Apertura del dosel

Este índice depende de la intensidad de los puntos del piso y su valor en cierta área. El principio es que la intensidad de los retornos representativos del suelo disminuye al haber más elementos (hojas por ejemplo) que se interponen en el recorrido de los haces de luz. El procedimiento consiste, inicialmente, en generar una superficie continua de intensidad de los puntos del suelo, para tal fin se utiliza la herramienta descrita en la sección 2.4 (*LAS Dataset to raster*), pero a diferencia de los parámetros definidos en ésta, se cambia el atributo de elevación por intensidad. Cabe anotar que deben estar desplegados únicamente los puntos correspondientes a suelo.

Una vez generado el mapa raster de intensidad de los puntos del suelo se suman los valores de intensidad que se encuentren dentro de un área representativa de la variabilidad de apertura del dosel. Esto se puede aplicar mediante la herramienta *Block Statistics*.





3.3. Cobertura del dosel inferior relativa a la apertura del dosel

Este índice se genera tomando como base la intensidad del dosel de la vegetación de los estratos arbóreos inferiores. Es conveniente inicialmente identificar la altura de los estratos arbóreos inferiores, para tal fin se pueden visualizar los datos LiDAR verticalmente, es decir, de perfil. Existen herramientas de uso gratuito que permiten llevar a cabo estas mediciones, en esta aplicación se utilizó un software llamado Frugo Viewer, creado por la empresa Internacional Fugro¹. Como se puede observar (Figura 4) además de las mediciones el software permite hacer diferentes tipos de análisis cualitativos. Cabe resaltar que esta herramienta trabaja con los archivos *.las originales.

¹ Esta herramienta se puede descargar en: <http://www.fugroviewer.com/>



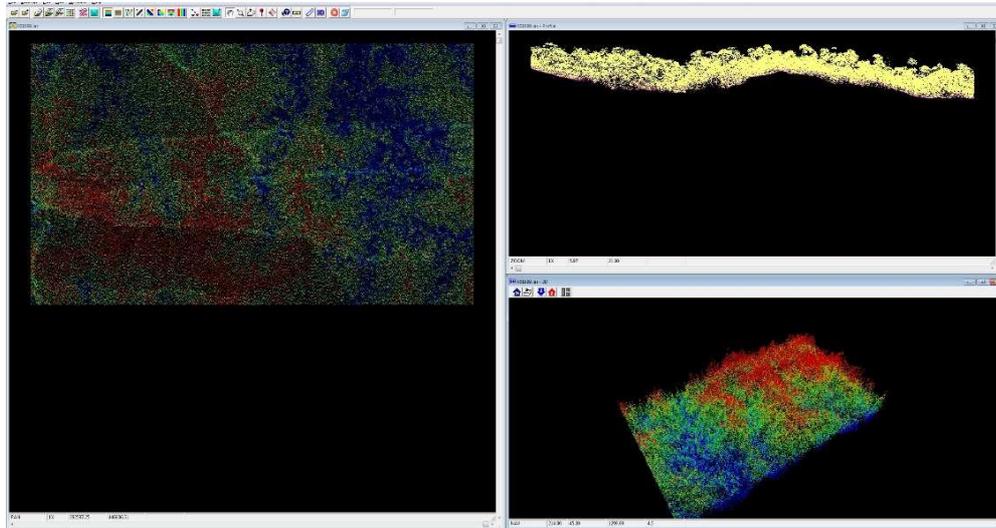
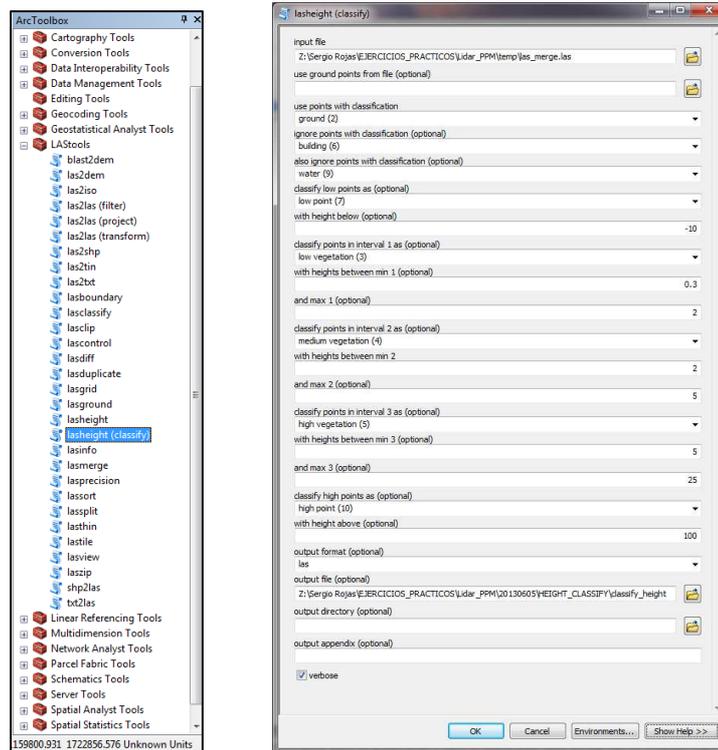


Figura 4: interface del programa Fugro Viewer para la visualización de archivos LiDAR.

Una vez definidas las alturas de dosel en los diferentes estratos arbóreos, se debe hacer una reclasificación de los puntos LiDAR de acuerdo a su altura. Con este objeto, se puede utilizar una herramienta de libre acceso llamada *LASTools*, desarrollada por el Departamento de Ciencias Computacionales de La Universidad de Carolina del Norte y que funciona en articulación con ArcGis. Esta herramienta permite efectuar diferentes procedimientos como convertir archivos *.las a otros formatos (*.bin, *.txt y *.shp), rasterizar con base en atributos del archivo, mezclar archivos independientes, y otras.

La herramienta se puede descargar en <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/> posteriormente se descomprime, y en ArcGis se adiciona al ArcToolbox (clic derecho en *add Toolbox*). Debido a que *LASTools* no trabaja con datos *.lasd, se deben mezclar los archivos *.las independientes en un solo archivo *.las de salida, con el uso de la herramienta *Lasmerge* (procedimiento equivalente al de la sección 2.1 pero con la herramienta *LASTools*). Una vez efectuado este procedimiento se debe activar la herramienta *lasheight (classify)* y entrar a reclasificar el archivo *.las de acuerdo a las mediciones realizadas previamente. En la ventana que se despliega inicialmente se define el archivo de entrada, los puntos correspondientes al suelo, y puntos de exclusión de manera opcional (construcciones, agua etc.), en la parte intermedia se definen las alturas de reclasificación y el número a asignar a cada una de las alturas, y finalmente, en la parte inferior de la ventana se asigna el nombre del archivo de salida y su directorio de ubicación.





Por último, para obtener este indicador, el archivo reclasificado se vuelve a convertir a formato *lasd, y se repiten los procedimientos de la sección 3.1, solo que a diferencia de ésta deben estar desplegados exclusivamente los pulsos que representen retornos dentro de la altura definida como dosel de los estratos arbóreos inferiores. El resultado de este procedimiento se debe dividir en la capa que representa el indicador de apertura del bosque, esto con el uso de la herramienta *Raster Calculator*.

3.4. Cobertura del dosel superior relativa a la apertura del dosel

Este indicador tiene el mismo principio del desarrollado en la sección 3.2, y por lo tanto también se utiliza el archivo resultante de la reclasificación por alturas, la diferencia está en que se emplean los puntos que representan el dosel de los estratos arbóreos superiores, que son los únicos que deben desplegarse para posteriormente repetir los procedimientos de la sección 3.1. Al final el producto debe dividirse en la capa que representa el indicador de apertura del bosque, esto con el uso de la herramienta *Raster Calculator*.

3.5. Relación de la cobertura del dosel inferior y la cobertura del dosel de superior

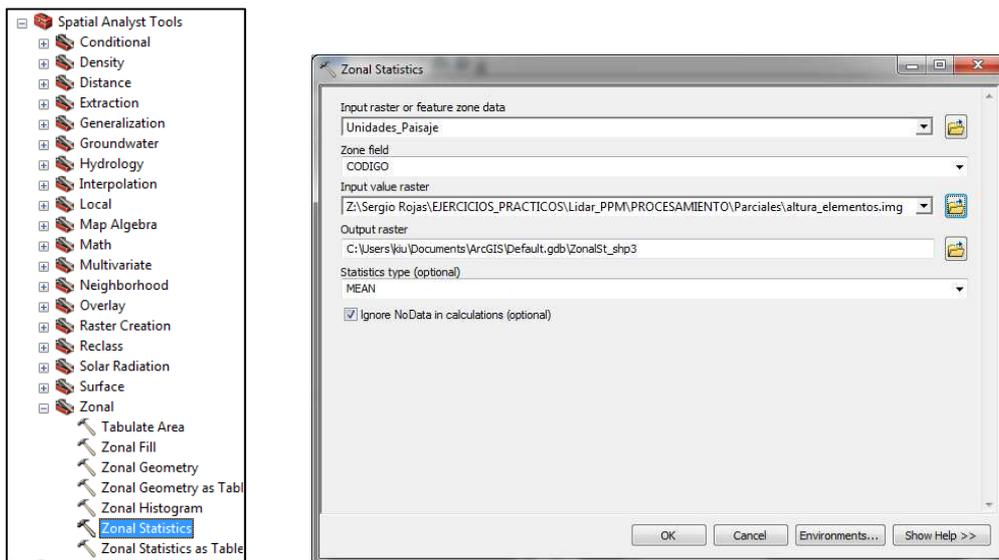
Este indicador resulta de dividir el resultado final de las secciones 3.3y 3.4, se puede utilizar la herramienta *Raster Calculator* de ArcGis.



3.6. Indicadores adicionales de estructura del bosque

La tecnología LiDAR en el campo de la diversidad biológica y el estudio de bosques tiene además de las aplicaciones descritas hasta este punto otras adicionales. (Müller et al (2009) generaron datos por un total de 223 parcelas cada una de 100x100m, acerca de la altura media y la desviación estándar de la altura del dosel del bosque. Señalan que la media es un indicador de la densidad del bosque mientras que la desviación estándar es un indicador de la variación vertical de la altura del dosel de la vegetación.

El procedimiento se lleva a cabo mediante la herramienta de ArcGIS estadísticas zonales donde como archivo zonal se usa la capa vectorial de unidades de paisaje o cobertura de la tierra y como archivo de valores se usa la capa raster de altura absoluta de los elementos, como estadística se usa la media o desviación estándar.



3.7. Resultados en un área de muestra

En una aplicación práctica, utilizando datos LiDAR suministrados por DATUM Ingeniería Ltda., correspondientes a fotografías aéreas multiespectrales (tres bandas del visible más infrarrojo cercano) con 25 centímetros de resolución espacial, y datos LiDAR. Los datos cubren una zona de aproximadamente 150 Hectáreas que está localizada en el departamento de La Guajira y concretamente en el municipio de Albania; sus coordenadas máximas son 11°08'6.79" N y 72°38'12.44" O, y sus coordenadas mínimas son 11°07'40.75" N y 72°36'55.61" O.



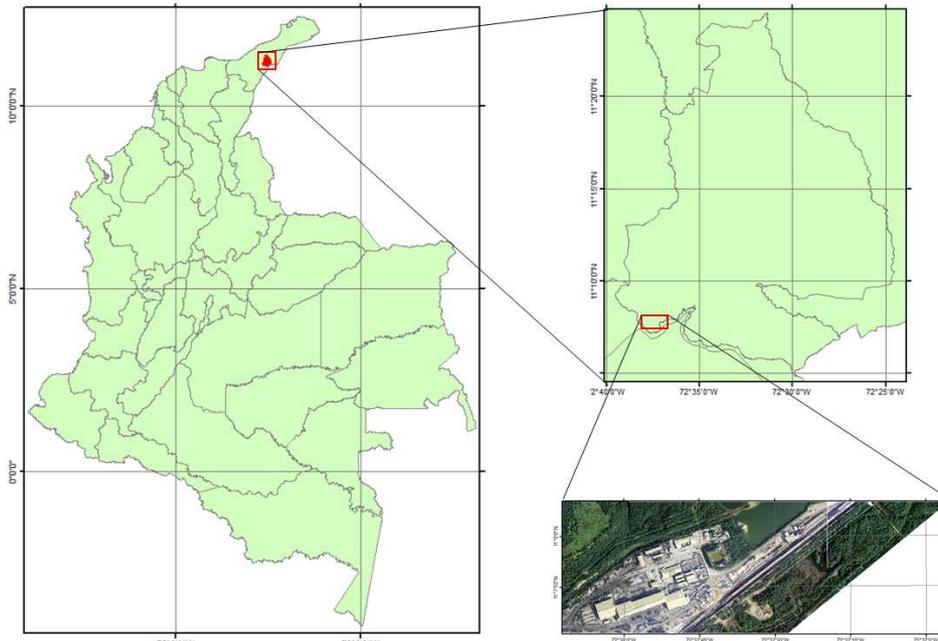
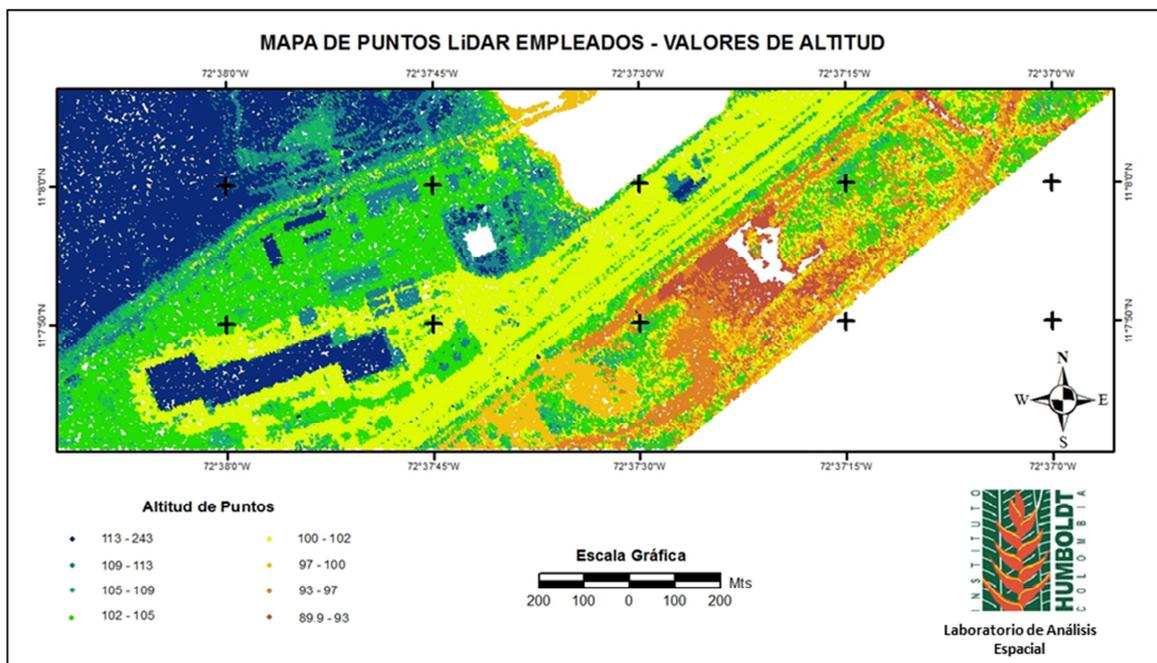
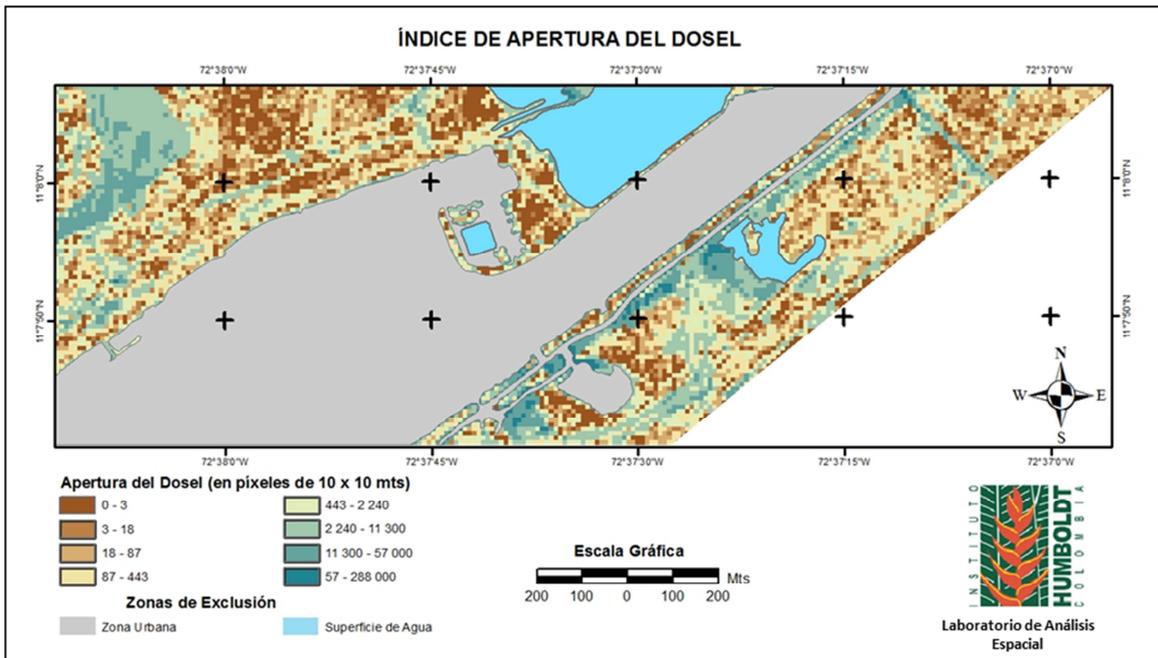
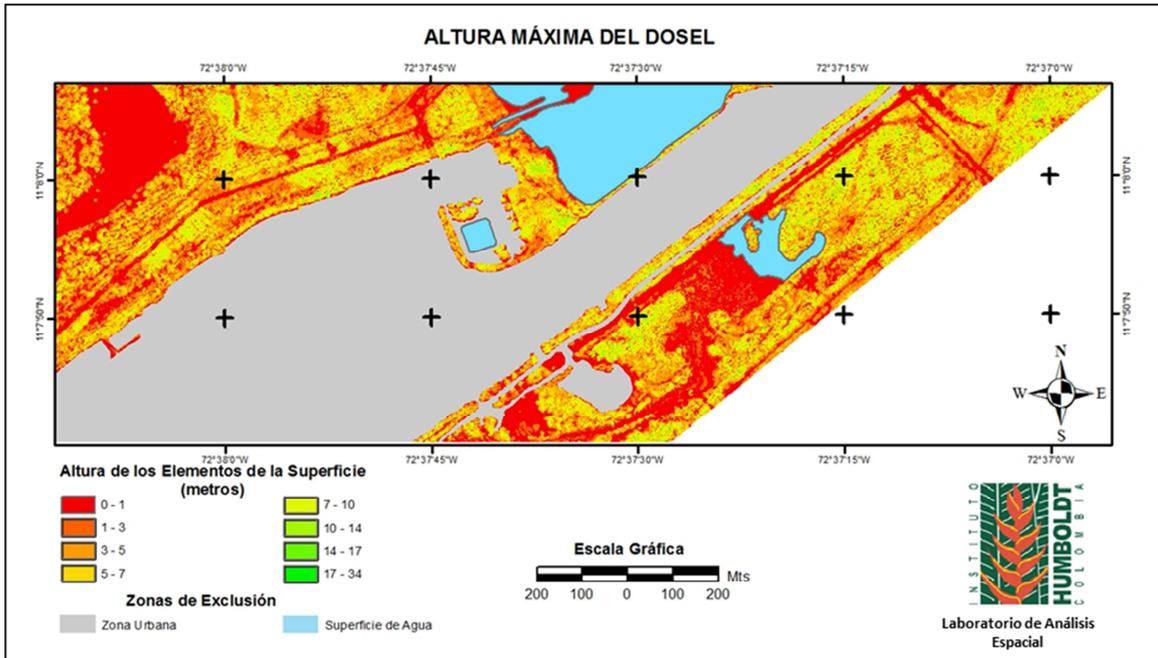
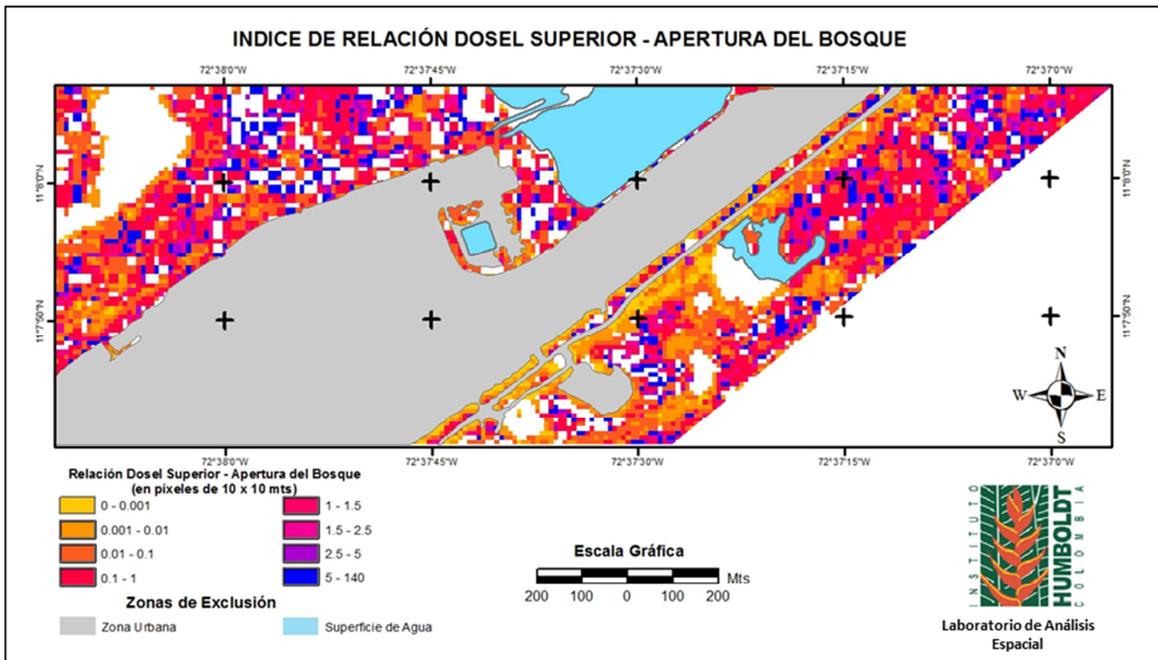
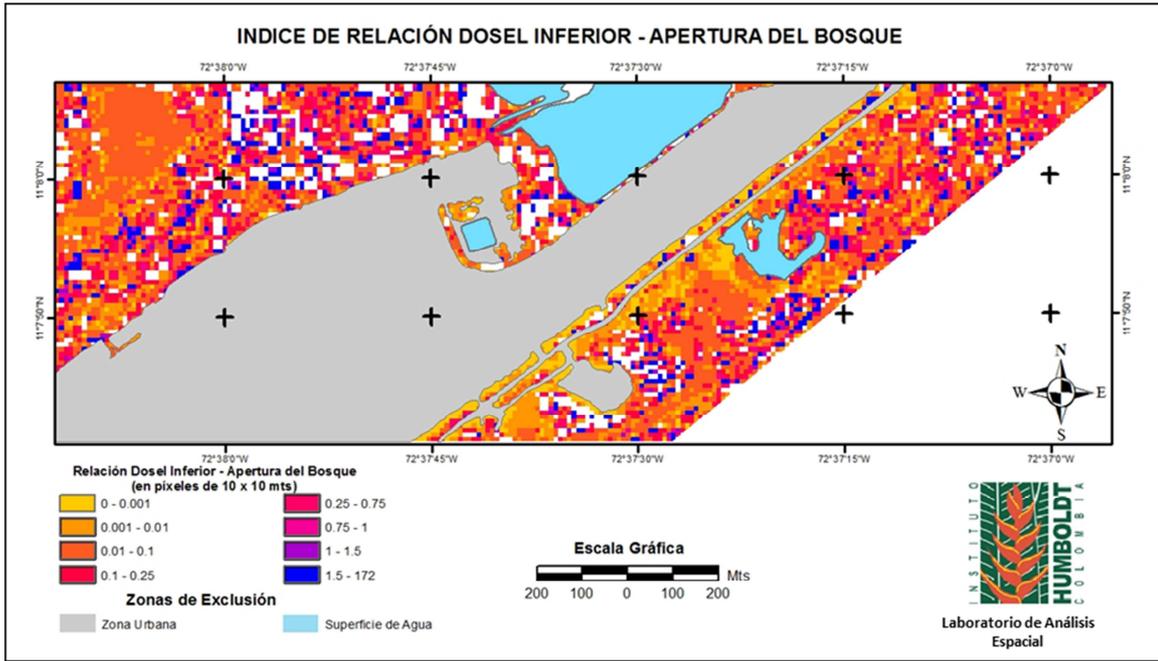


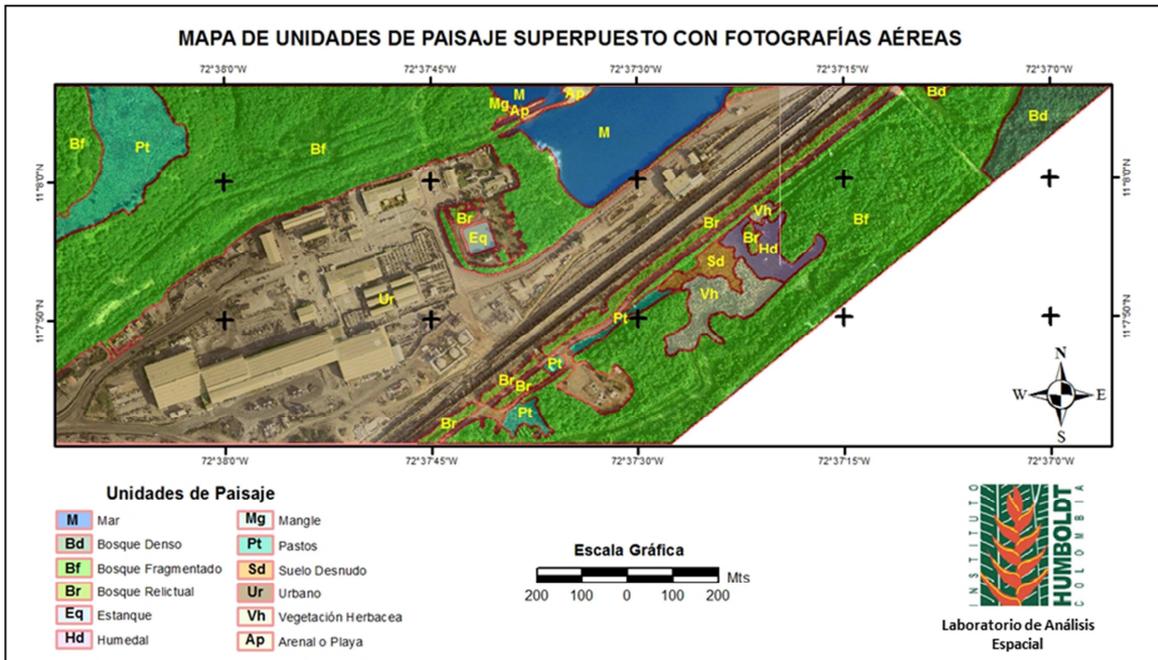
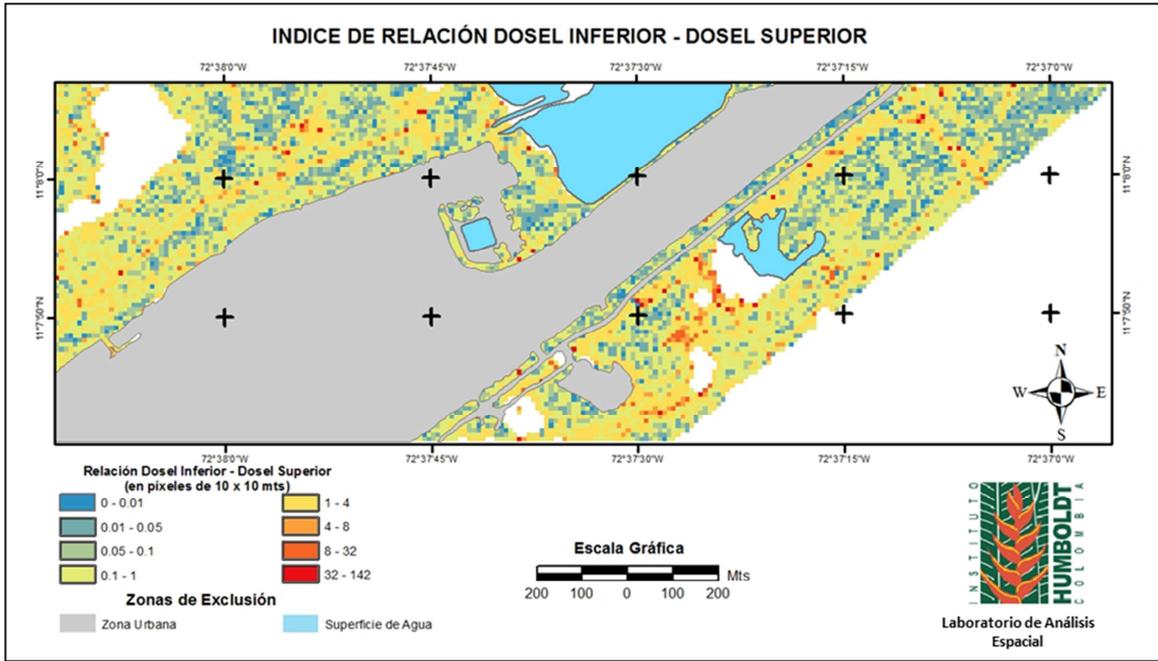
Figura 5: Área de aplicación.

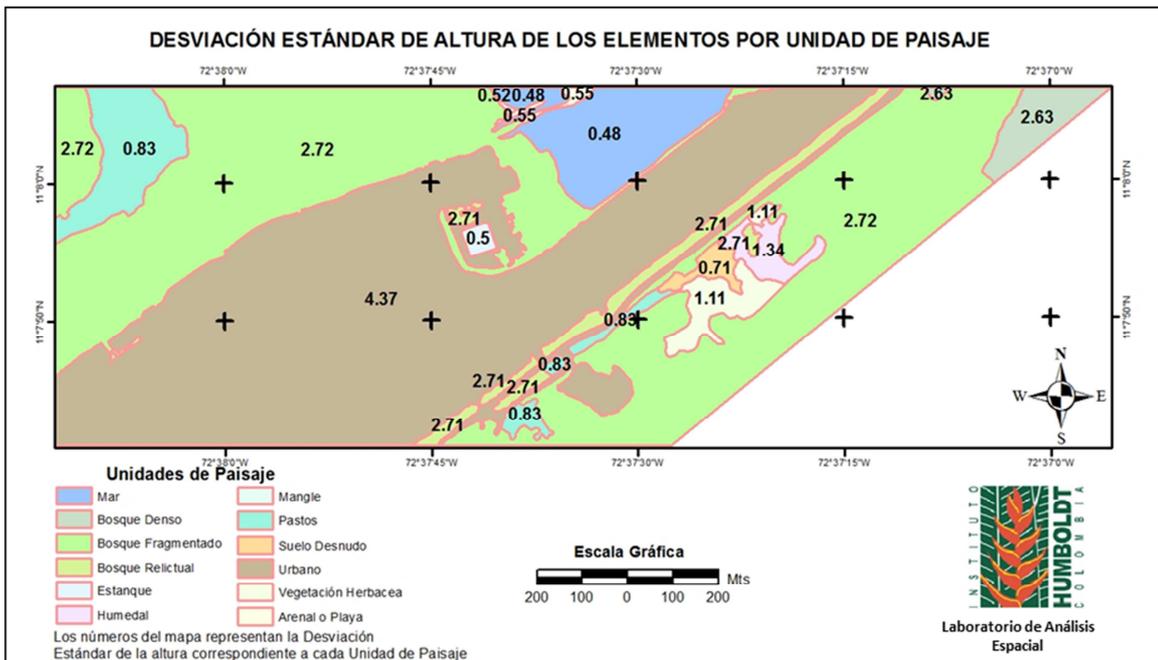
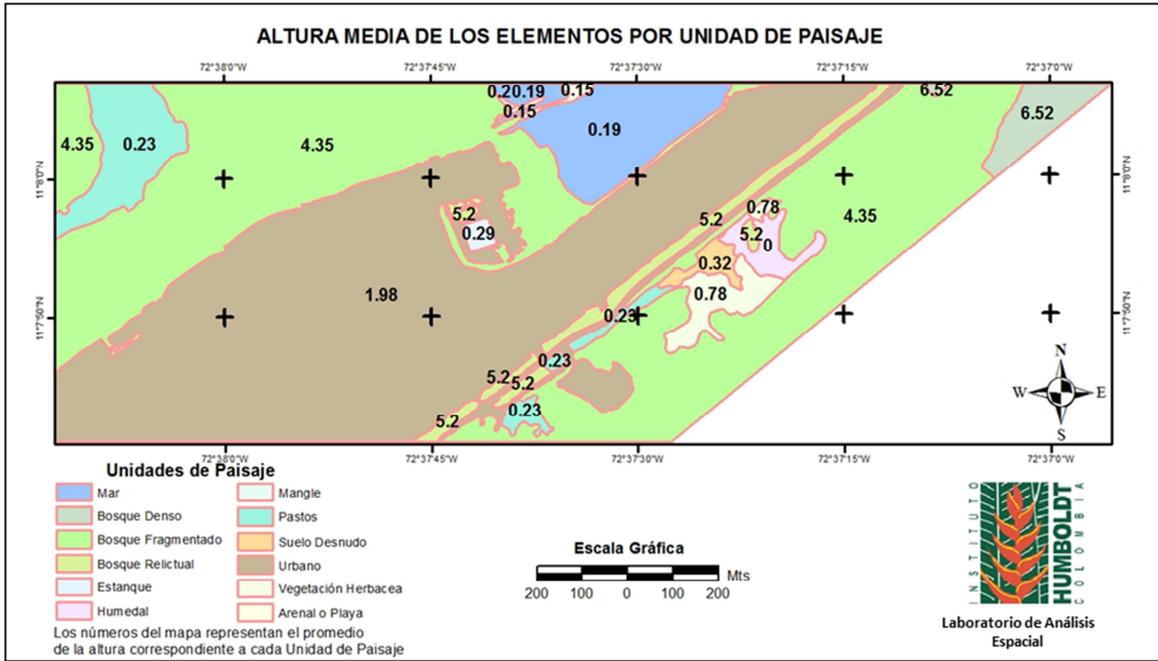
Los mapas generados se observan a continuación.











4. **MODELOS DIGITALES DE TERRENO PARA EL ANÁLISIS HIDROLÓGICO**

Los modelos digitales de terreno son representaciones tridimensionales del terreno como tal, en esto difieren de los modelos digitales de superficie, los cuales son representaciones tridimensionales de los elementos sobre el terreno, tales como árboles, edificaciones, o el terreno en sí mismo en áreas abiertas.

Los modelos digitales del terreno pueden ser generados a partir de diferentes métodos, entre los más convencionales están los métodos de topografía en campo, los métodos fotogramétricos de aerotriangulación y estereocorrelación de imágenes, la interferometría de imágenes de Radar y el escaneo del terreno mediante sensores LiDAR. En el último de los casos, que es el que atañe de manera más estrecha al presente documento, los modelos digitales de terreno son generados mediante algoritmos de interpolación empleando como base los puntos clasificados como suelo, que son, usualmente, los correspondientes al último retorno, tal como se describe en la sección 2.4.

Una vez obtenidos los modelos digitales de terreno es posible hacer diferentes tipos de análisis espaciales 3D, como por ejemplo determinar el área de inundación bajo una cota altimétrica determinada, con base en esto se puede establecer el área de inundación en una zona específica. En la Figura 6 se pueden observar diferentes áreas de inundación a modo de ejemplo, en la zona del Golfo de Urabá al aumentar el nivel del mar entre 1 y 5 metros, este mapa se obtiene al reclasificar los valores de altura del modelo digital del terreno.



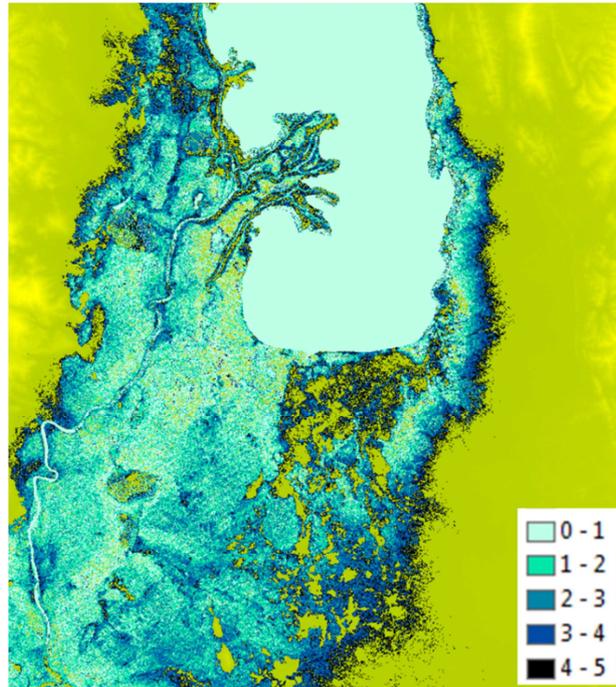


Figura 6: niveles de inundación ante el aumento del nivel del mar (en metros). Golfo de Urabá

Los modelos digitales del terreno permiten hacer análisis más complejos integrando datos hidrológicos. En la siguiente sección del documento se ilustra una aplicación desarrollada con el software libre HEC-RAS², creado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos. En esta aplicación se empleó el modelo digital de terreno ASTER, editado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), que tiene una resolución espacial de 30 metros, convertido a formato TIN; el análisis se aplica a un transecto del Río Porce de 7500 metros en límites entre los municipios de Anorí y Amalfi, Departamento de Antioquia. La parte inicial, al emplear este software y con la aplicación propuesta, se lleva a cabo con la Herramienta HEC GeoRAS, que funciona como una herramienta de ArcGIS, mientras que posteriormente el trabajo se desarrolla propiamente en el programa HEC-RAS; al final algunos mapas se generan de nuevo en ArcGIS con la herramienta HEC GeoRAS.

4.1. El modelamiento hidrológico y la biodiversidad

Con la presente aplicación se generan diferentes variables físicas que describen el comportamiento hidrológico bajo diferentes escenarios, entre ellas se ha considerado de particular importancia la extensión, la profundidad y la velocidad. Estas variables han sido ampliamente utilizadas en estudios que tienen por objeto explicar la disponibilidad y la

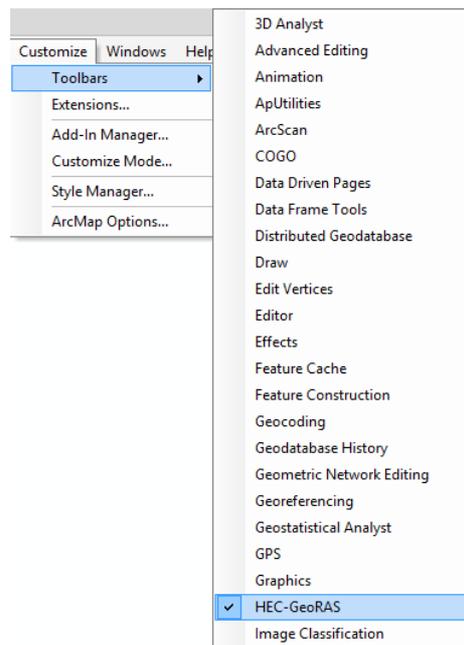
² Hydrologic Engineering Centers River Analysis System. El programa se puede descargar en: <http://www.hec.usace.army.mil/software/>



distribución de especies acuáticas en diferentes regiones alrededor del mundo (Vanhatalo, Veneranta, & Hudd, 2012; Zarkami, Sadeghi, & Goethals, 2012). En el caso específico de la extensión, es un aspecto clave para identificar cómo se puede dar la conectividad hídrica superficial, los sensores remotos permiten determinar esta variable, sin embargo los vacíos de imágenes temporal o espacialmente aptas, pueden limitar su aplicación (Davidson & Finlayson, 2007). En este sentido, el modelamiento hidrológico se constituye en una alternativa de gran utilidad para el mapeo de los humedales y de variables asociadas que inciden en su funcionamiento y biodiversidad.

4.2. Trabajo en HEC GeoRAS – ARCGIS

El trabajo con estas dos herramientas de software consiste en crear todos los elementos geométricos que conforman el proyecto así como sus atributos. Entre los elementos que se pueden crear están: ríos, secciones de ríos, puentes, diques, cubetas y líneas de corte entre otros. En la parte operativa se debe, inicialmente, instalar HEC-GeoRAS, crear un proyecto de MXD de ArcGis con el que se va a generar una *Geodatabase* en la cual quedan almacenados los archivos que se generan, y cargar la herramienta HEC-GeoRAS en la barra de herramientas de ArcGIS³.



4.2.1. Aparece entonces la barra de herramientas de HEC Georas:

³ Cabe anotar que para trabajar con este programa se requiere configurar el equipo para que tome el punto, en vez de la coma, como separador de decimales.





Lo que sigue es crear los elementos geométricos que configuran la zona hidrográfica. Para tal fin se ingresa por *RAS Geometry/ Create RAS Layers*, y se despliega la lista de objetos que el software permite crear.

Los elementos a crear en esta aplicación son:

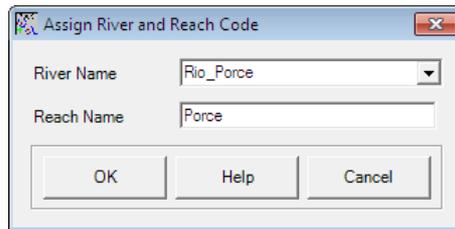
- *Stream Center Line*: línea que describe el eje del río objetivo
- *Bank Lines*: líneas que describen las márgenes del río objetivo, o que limitan al canal propiamente dicho.
- *Flow Path Center Lines*: son líneas que describen la dirección de flujo del río objetivo
- *XS Cut Lines*: son líneas de corte transversales a la dirección del río que se efectúan para generar perfiles del terreno

Una vez definidos los objetos es necesario digitalizarlos espacialmente, para esto se puede tomar como referencia datos previamente georeferenciados tales como mapas topográficos, fotografías aéreas o modelos digitales de elevación. En cualquier caso es necesario disponer de un modelo digital de terreno en formato TIN⁴ que posteriormente es usado para asignar propiedades altimétricas a los objetos digitalizados. La exactitud de posición vertical y horizontal de los componentes del modelo de terreno y su resolución, son aspectos claves a considerar en los resultados del modelo hidrológico resultante, dado que afectan la certidumbre en la información que proporcionan.

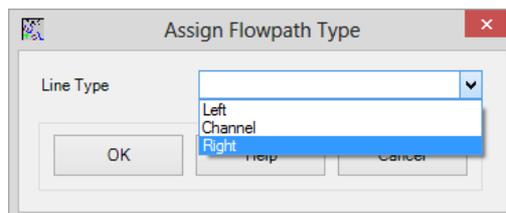
4.2.2. Una vez definidos los elementos espaciales del modelo, se pueden digitalizar usando las herramientas convencionales de ArcGis (*Editor*). Usualmente se digitalizan, en primer lugar, los ríos, lo que se debe hacer en la dirección de flujo. Para asignar un nombre a la capa que corresponde al río (o sección) se da clic en el icono *Assign River Code and Reach Code to River*  de la barra de herramientas de Hec-GeoRAS (el programa pide previamente que se guarden las ediciones realizadas).

⁴ *Triangulated Irregular Network.*





4.2.3. Posteriormente se pueden digitalizar los demás elementos, como las líneas que describen las márgenes del río (*Bank Lines*) y las direcciones de flujo. En el caso de las direcciones de flujo es necesario indicar la que está al margen derecho e izquierdo del río⁵, esto se hace accediendo a la ventana *Assign Flowpath Type* mediante el icono .



4.2.4. Efectuado el paso 4.2.3, se digitalizan las líneas de corte transversales que se deseen generar (*XS Cut Lines*). El trazado de éstos tiene cuatro reglas, básicamente (Cameron & Ackerman, 2009):

- No debe haber intersección entre líneas de corte.
- Deben cortar la línea de flujo y ser perpendiculares a ésta.
- No deben ir más allá del modelo de terreno
- Se deben digitalizar desde la margen izquierda a derecha del río

Si se desea o requiere generar perfiles de manera automatizada con una longitud determinada y con una separación entre sí definida, se puede emplear la herramienta *Construct XS Cut Lines* a la que se accede con el icono . En todo caso se requiere que se cumpla con las reglas de trazado ya mencionadas. Al final de digitalización el aspecto debe ser similar al que se ve en la Figura 7.

⁵ Derecho o izquierdo se define según la dirección de la corriente.



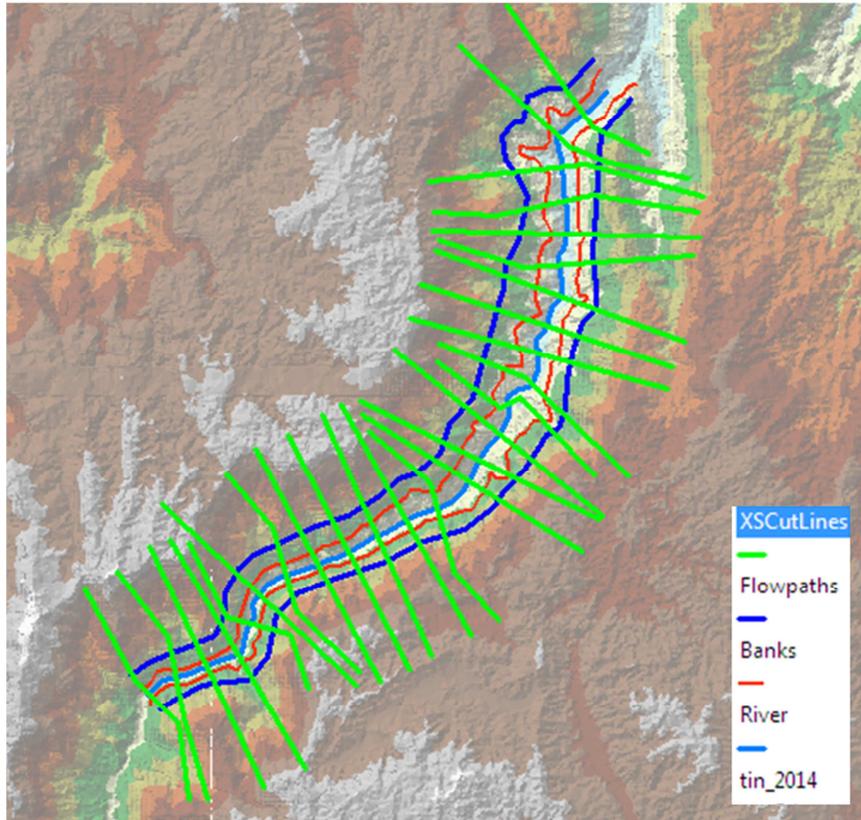
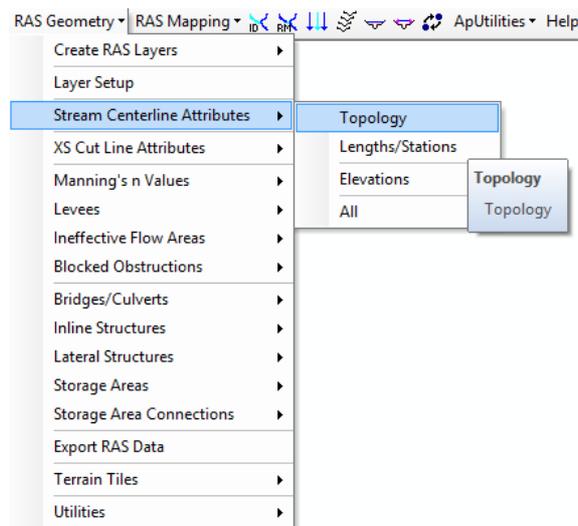
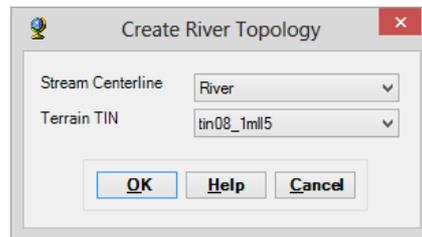


Figura 7: aspecto visual del proyecto

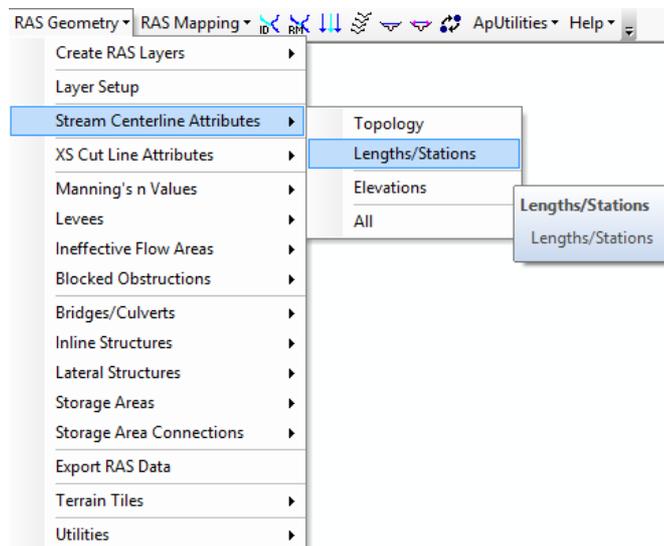
4.2.5. Después de digitalizados los elementos se deben definir sus atributos geométricos y topológicos. Inicialmente se le corre la topología al río, por medio de *RAS Geometry*, que se encuentra igualmente en la barra de herramientas de HEC-GeoRAS.



En la ventana de topología que se despliega pregunta si acepta llevar a cabo el proceso, a lo que se le debe indicar que sí para luego vincular la capa de ríos al modelo TIN de referencia.

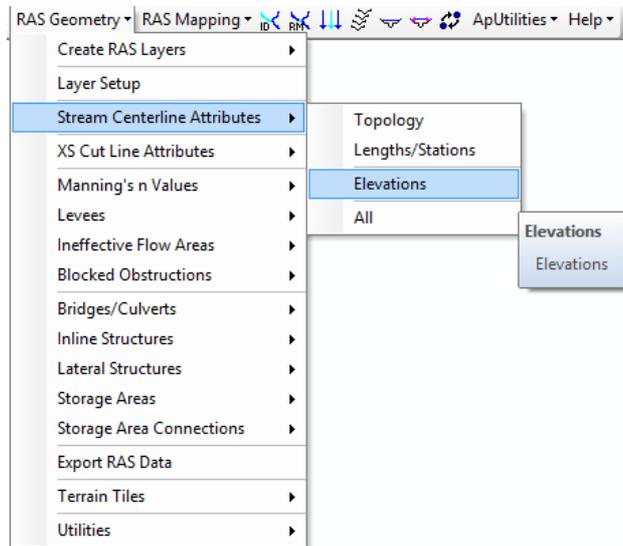


4.2.6. Luego se deben calcular los atributos geométricos del río (o ríos), fundamentalmente su Longitud, mediante la operación *Length/stations*. Con esta operación también se determina la dirección de flujo.

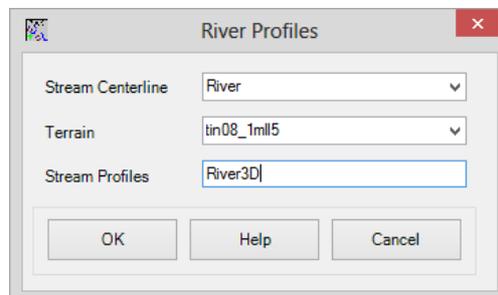


4.2.7. Luego se deben asignar atributos altimétricos a la capa de ríos. Esto se hace igualmente con el modelo TIN.



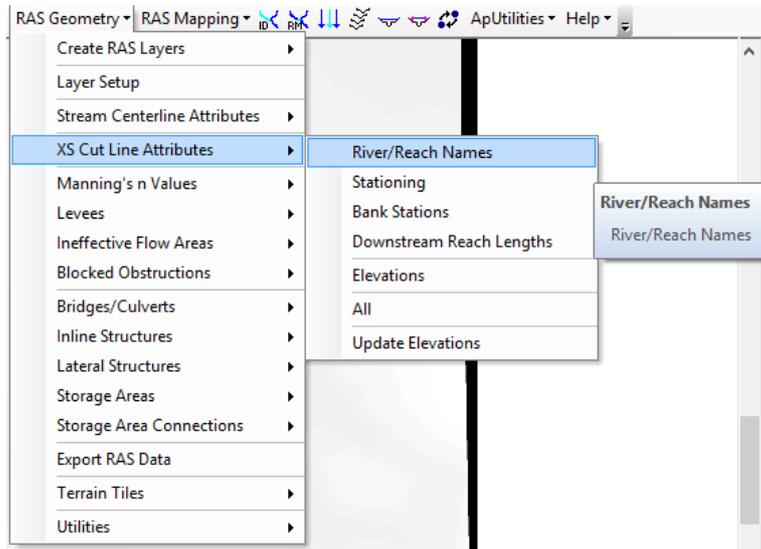


En la ventana que se despliega se debe definir el modelo TIN como elemento de entrada que le da el carácter tridimensional a los ríos:

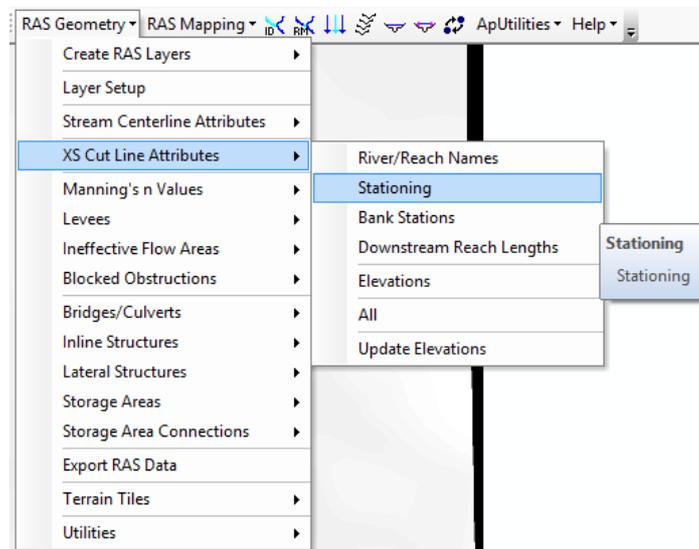


4.2.8. Posteriormente se deben vincular las líneas de corte (*XS Cut Lines*) a la capa de ríos:





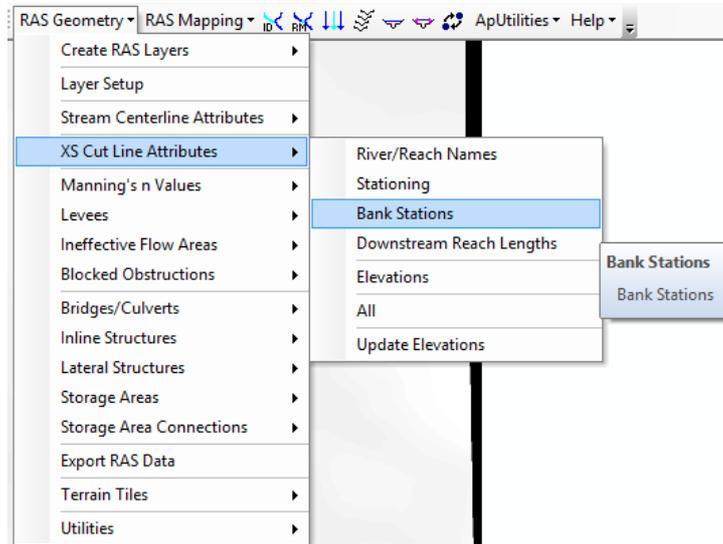
Después se deben fijar a las líneas de corte el atributo *Station*, que es el número de perfil y que a su vez corresponde a la distancia entre el nodo más bajo del río y el perfil en el punto en el que se intersecta con el mismo.



4.2.9. Igualmente se debe determinar, en cada línea de corte, la ubicación del punto



correspondiente a la intersección entre ésta y la línea de margen izquierda como derecha.



La posición queda registrada en la tabla de atributos de las líneas de corte como porcentaje recorrido de la línea de corte respecto al nodo izquierdo de ésta hasta llegar a cada punto de intersección, tal como se observa en la Figura 8.

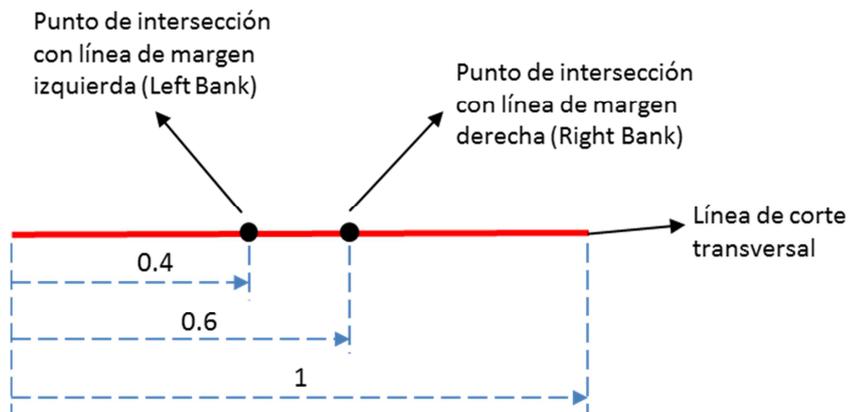
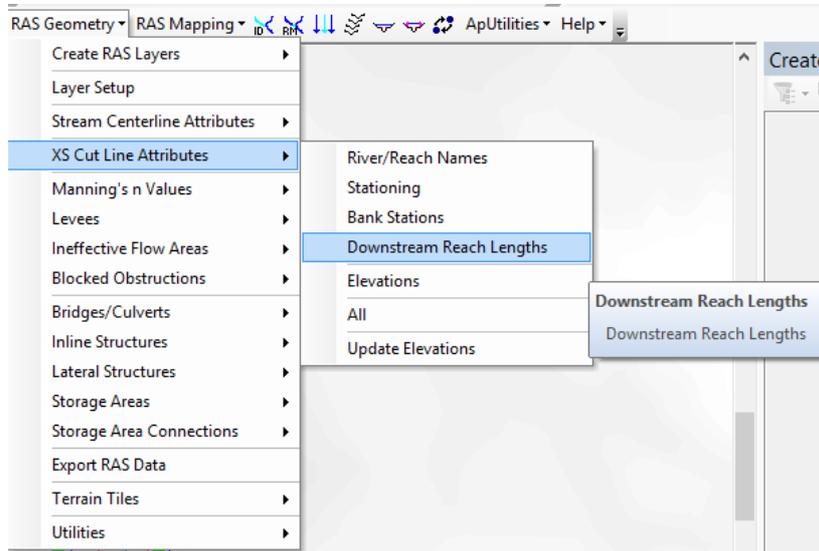


Figura 8: en este ejemplo la ubicación quedaría registrada como 0.4 (en *Left Bank*) y 0.6 (en *Right Bank*).
Fuente: Elaboración propia.

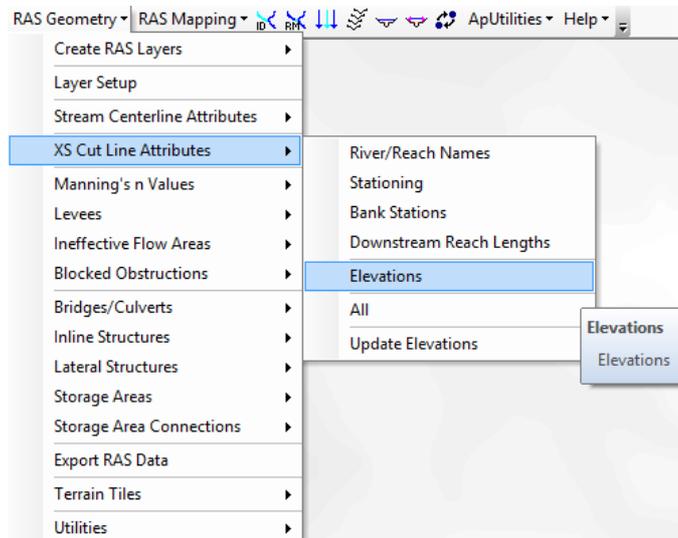
4.2.10. Posteriormente se fija la distancia entre cada perfil y el siguiente aguas abajo, tanto a lo



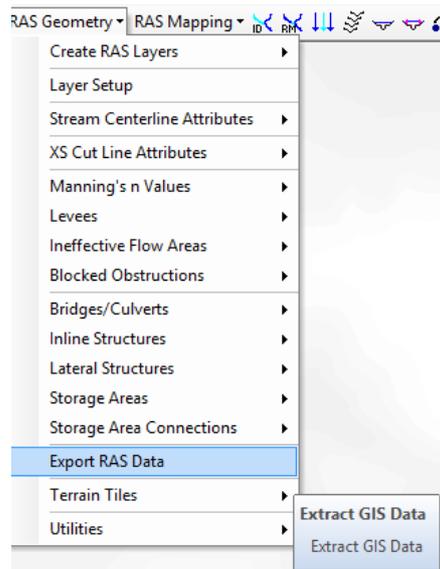
largo de la línea de margen izquierda, como derecha y eje del cauce.



Y finalmente se les asignan a las líneas de corte transversal atributos altimétricos con base en el modelo TIN.

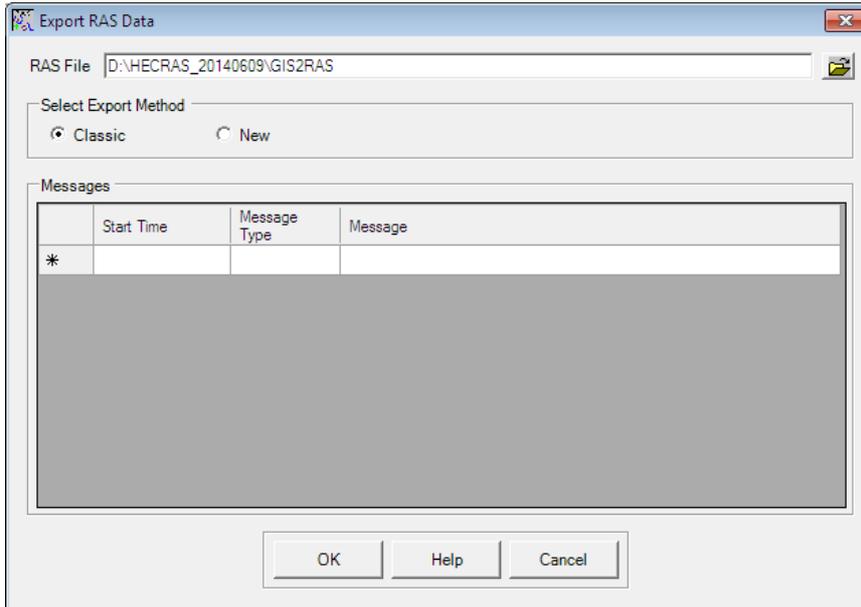


4.2.11. El conjunto de datos geométricos debe ser exportado a HEC-RAS para continuar con el análisis, en este procedimiento el conjunto de elementos creados debe quedar en formato *.sdf. Cabe anotar que para HEC-RAS las capas indispensables son solo la del río y líneas de corte transversales tanto bidimensionales como tridimensionales, los demás objetos digitalizados son opcionales. El procedimiento para exportar se efectúa mediante *RAS-Geometry/Export RAS Data*:

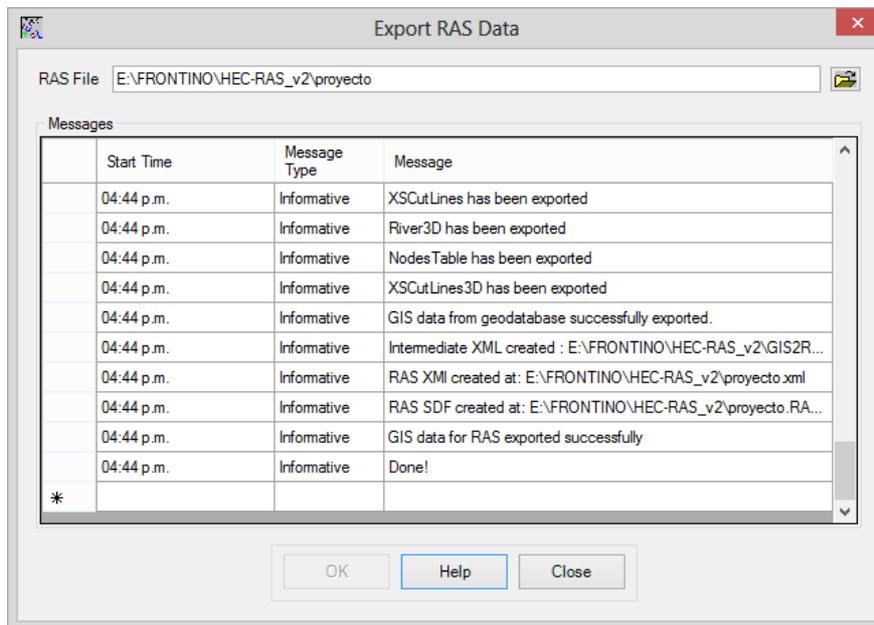


Se despliega entonces la ventana *Export RAS Data* en la que se debe ingresar el archivo a crear y dar *OK*.





Una vez efectuado el procedimiento, la ventana debe verse así:

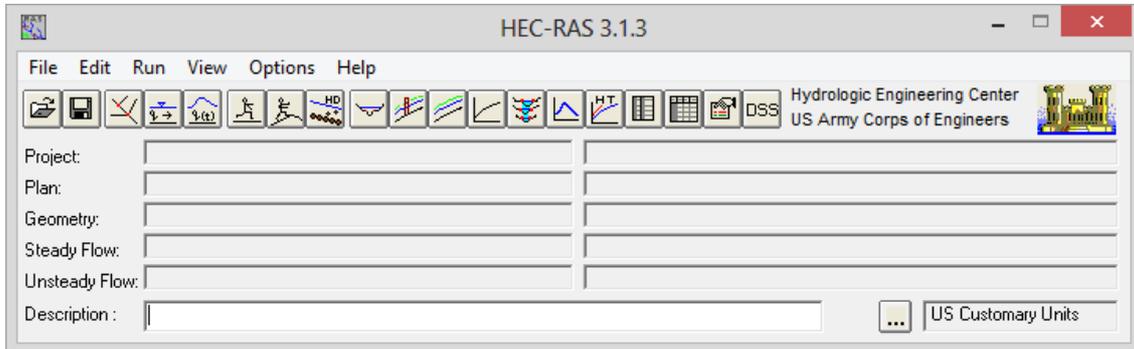


4.3. Trabajo en HEC-RAS

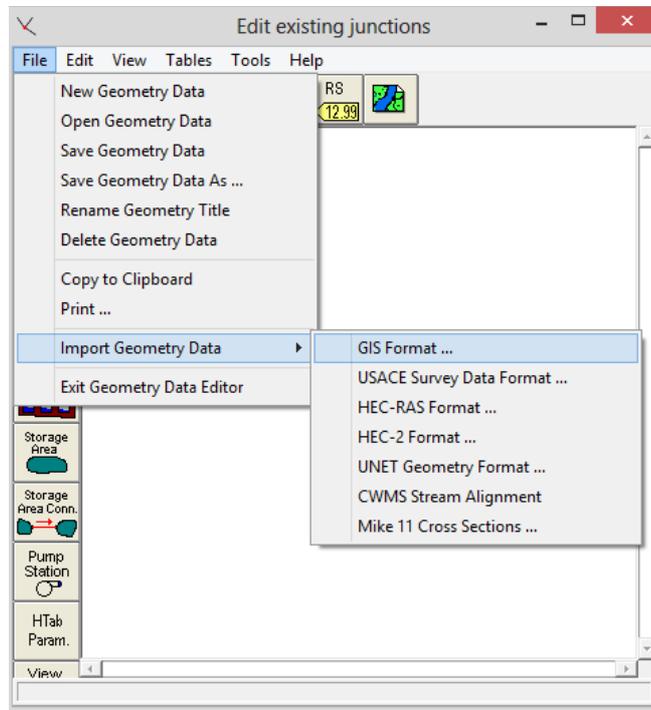
Después de creados los elementos espaciales que configuran el proyecto, es necesario efectuar el modelamiento hidrológico, lo que se hace directamente en el programa HEC-RAS. Inicialmente se



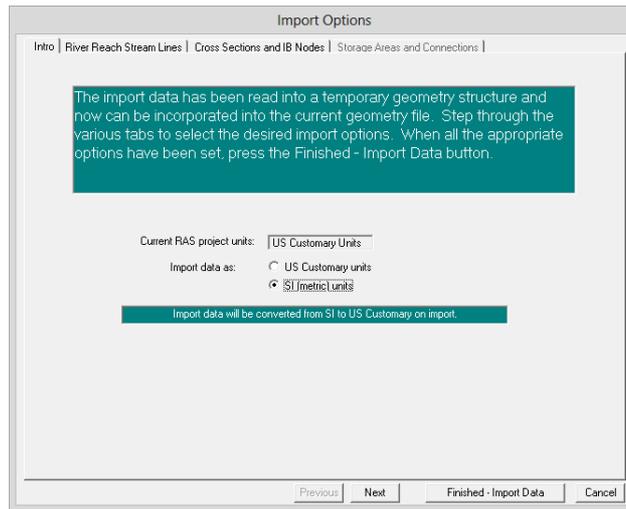
debe crear un nuevo proyecto a través del menú de la ventana principal del programa (*file/save as*).



4.3.1. Luego se debe integrar la geometría, es decir, los elementos espaciales que configuran el proyecto. Como éstos fueron creados previamente en ArcGIS, se importa entonces el archivo *.sdf generado. Inicialmente se debe ingresar a la ventana *Edit Existing Junctions* mediante el ícono , luego se importa el archivo desde el directorio en el que fue creado.

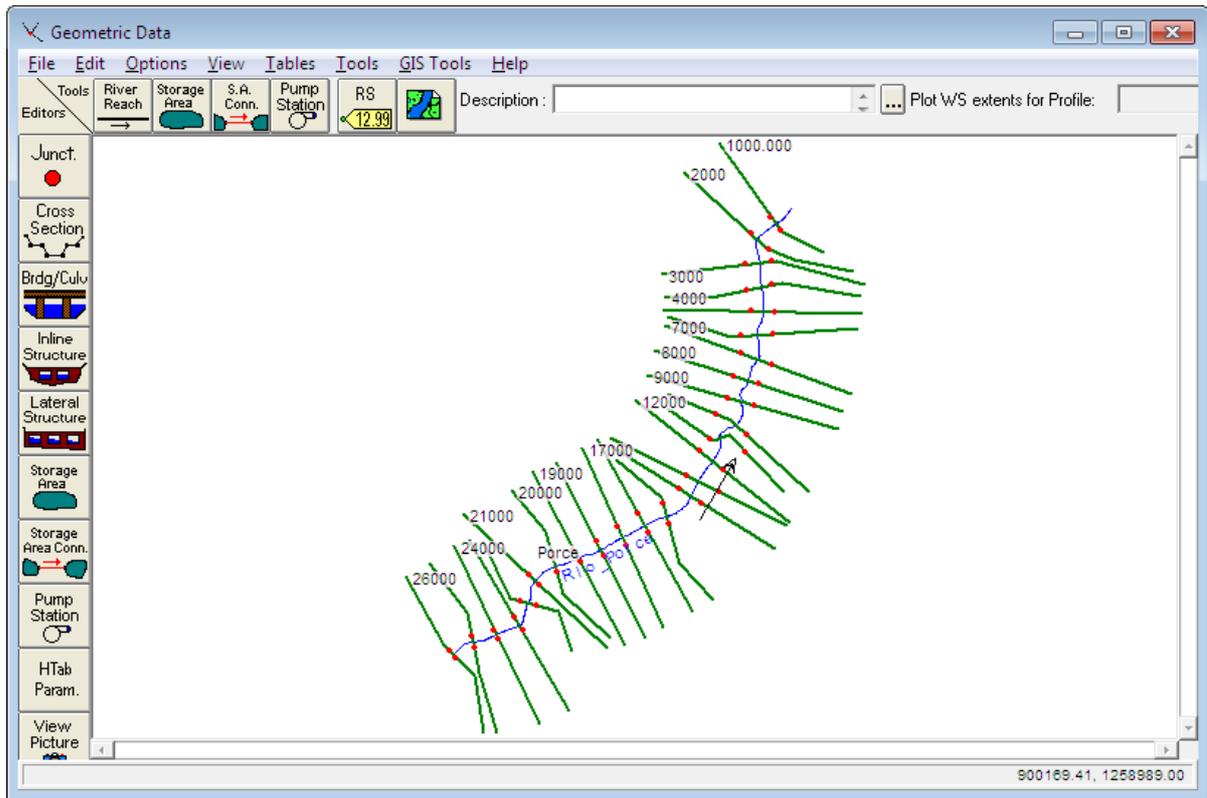


4.3.2. El programa da la opción de trabajar en sistema métrico internacional o en sistema anglosajón de unidades. Se escoge preferiblemente como sistema de medición el sistema métrico internacional:



Una vez seleccionado el sistema métrico se despliegan los elementos espaciales creados en ArcGis.





Esta geometría se debe guardar, desde la misma ventana de *Geometric Data* (*file/Save Geometry Data As*).

4.3.3. En esta interfaz se pueden crear nuevos elementos o editar los existentes, pero además

se puede hacer el análisis de los perfiles, dando clic en el ícono *Cross Section* , y entrando entonces a la ventana *Cross Section Data*, en la que se pueden observar los cortes transversales creados y los parámetros que fueron previamente calculados en ArcGis (ver Figura 9).



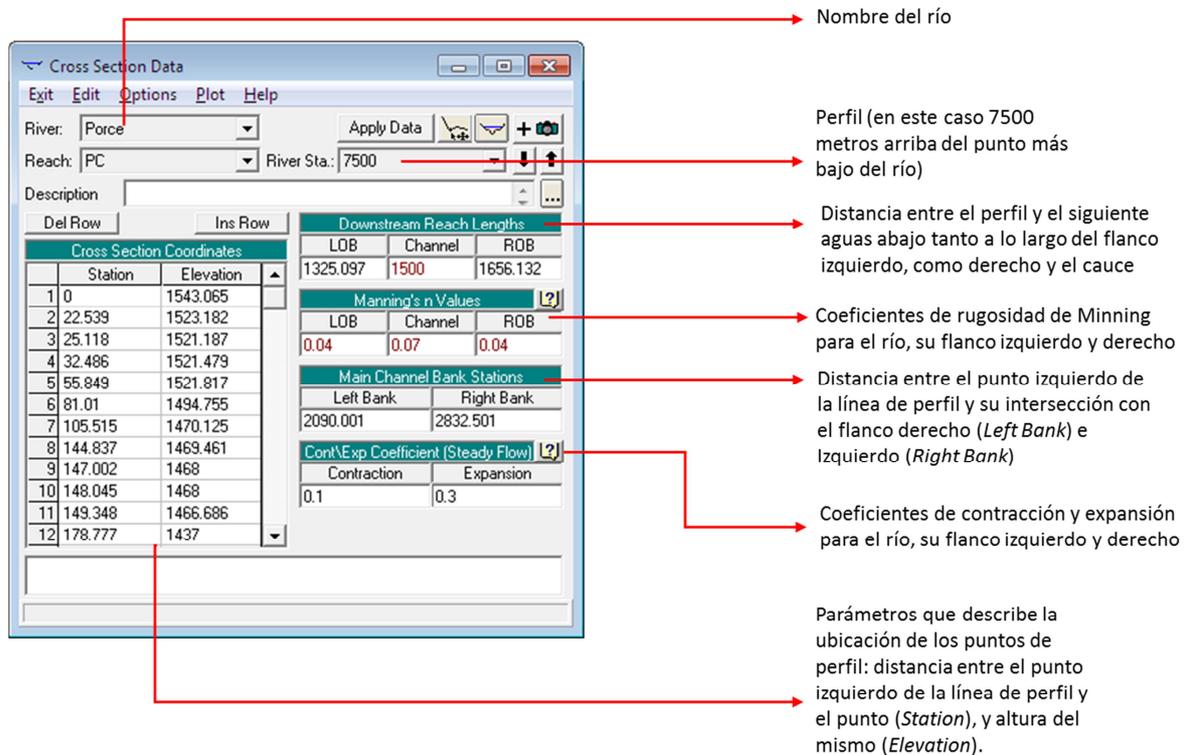


Figura 9: parámetros que describen las características de los cortes transversales

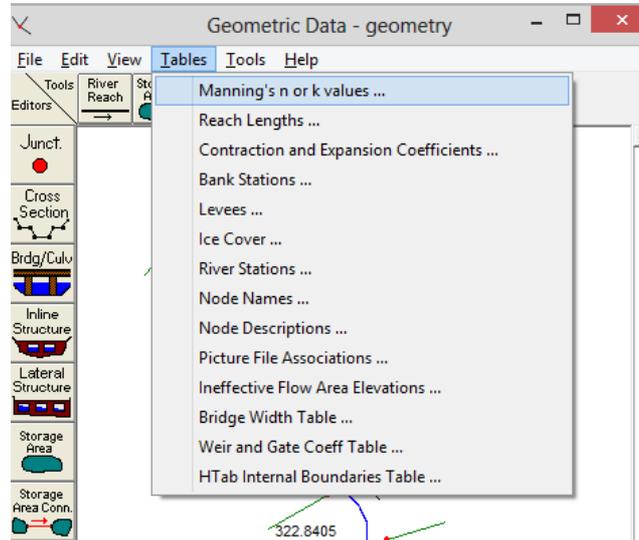
En cada uno de los perfiles deben quedar Stations consignados los datos:

- *Downstream Reach Lengths*, es decir la distancia respecto al siguiente perfil aguas abajo en la línea de dirección de flujo, tanto en la línea de margen izquierda (LOB) y derecha (ROB), como del eje del río (*Channel*).
- *Manning's n Value*, los valores de Manning describen la fricción de la ladera en el escurrimiento de aguas, los coeficientes más adecuados pueden ser consultados en el signo de interrogación de la ventana y deben definirse para los costados del río y su eje central.
- *Main Channel Bank Stations*: Son la distancia entre el punto izquierdo del corte transversal y el punto en el que se cruza con la línea de margen izquierda y derecha del río.
- *Contraction/expansion coefficients*: coeficientes de expansión/contracción de flujo, que describen este fenómeno usualmente debido a la pérdida de energía del flujo (Brunner, 2010). Los coeficientes más adecuados pueden ser consultados en el signo de interrogación de la ventana.

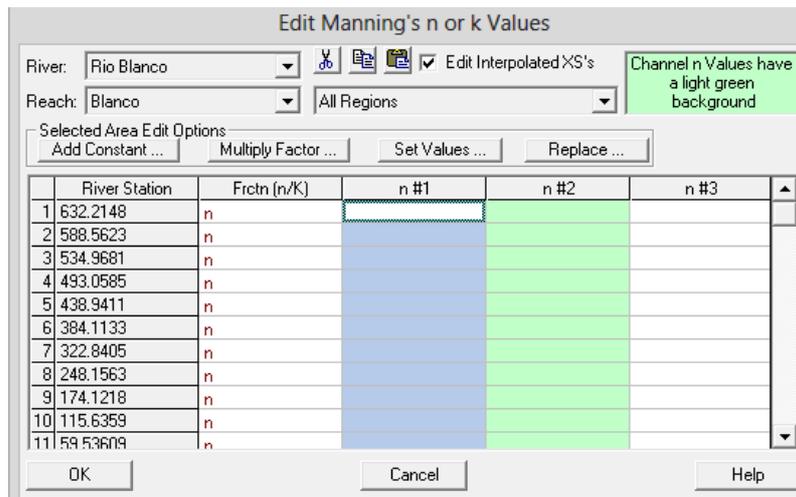
Realmente la mayoría de estos valores son determinados a través de los procedimientos efectuados en ArcGIS, incluso los coeficientes de Manning, si se cuenta con una capa de cobertura de la tierra. Cuando los coeficientes de Manning no han sido creados en ArcGIS y se quiere dar un



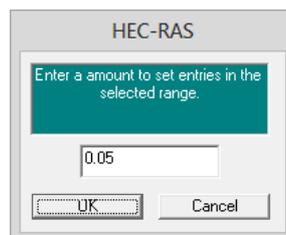
mismo valor para todos los perfiles de una manera rápida se puede acceder al menú de la ventana *Geometric Data/Tables/Manning's n or k values*:



Aparece entonces la ventana:



Aquí se selecciona la columna a editar, se oprime el botón *set values* y en la ventana que aparece se escribe el coeficiente de Manning.



Al final la tabla queda así:

	River Station	Froth (n/K)	n #1	n #2	n #3
1	632.2148	n	0.05	0.03	0.05
2	588.5623	n	0.05	0.03	0.05
3	534.9681	n	0.05	0.03	0.05
4	493.0585	n	0.05	0.03	0.05
5	438.9411	n	0.05	0.03	0.05
6	384.1133	n	0.05	0.03	0.05
7	322.8405	n	0.05	0.03	0.05
8	248.1563	n	0.05	0.03	0.05
9	174.1218	n	0.05	0.03	0.05
10	115.6359	n	0.05	0.03	0.05
11	59.53609	n	0.05	0.03	0.05

Para editar los valores de contracción y expansión el procedimiento es similar (ventana *Geometric Data/Tables/ Contraction and Expansion Coefficients*). Al terminar de definir estos parámetros se deben guardar los cambios efectuados en la geometría (ventana *Geometric Data/Save Geometry Data*) y cerrar la ventana.

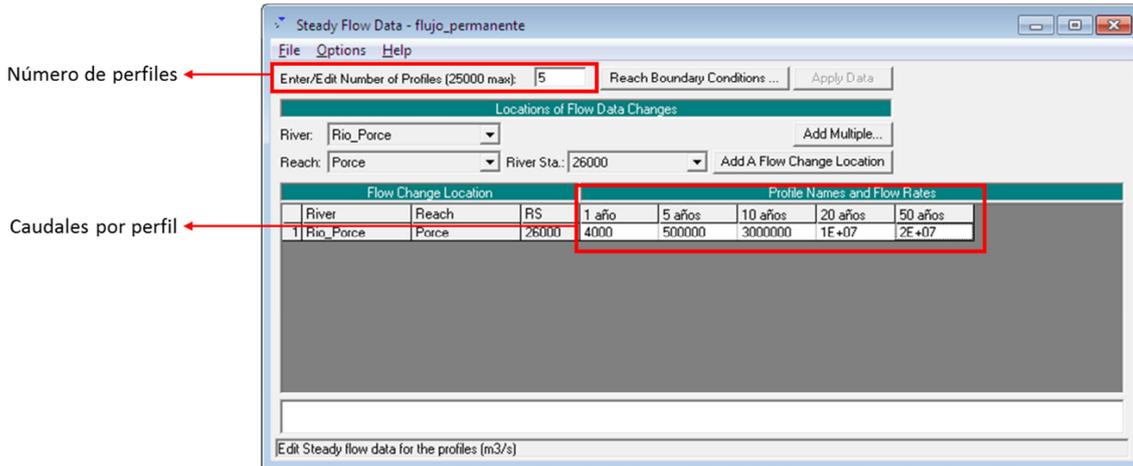
4.3.4. El paso siguiente es crear y definir los parámetros de los perfiles. Con “perfiles” se hace referencia a escenarios posibles, que corresponden usualmente a diferentes caudales correspondientes a su vez a diferentes periodos de retorno. El programa da la posibilidad de hacer análisis de perfil bajo flujo constante, flujo no constante o flujo cuasi no constante⁶. En la presente aplicación se efectúa un análisis de flujo constante, en este sentido los parámetros se fijan en la ventana *Steady Flow Data* del menú principal de HEC-RAS a la que se accede por el ícono

4.3.5. Se debe entonces definir el número de perfiles que se desean generar, en la presente

⁶ Los flujos constantes son aquellos cuyas propiedades de magnitud y dirección permanecen constantes a través del perfil de un cauce y del tiempo, mientras que flujos no constantes son aquellos cuyas propiedades de magnitud y dirección varían a través del perfil de un cauce y del tiempo. (ASCE, 1996 y <https://riverrestoration.wikispaces.com/Hydraulics>. Consultado el 17 de junio de 2014).



aplicación se generan 5 y a cada uno de éstos se les debe definir un caudal determinado⁷.



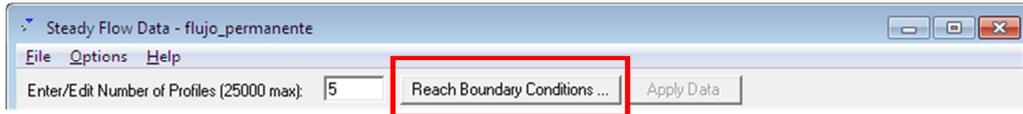
Los nombres para cada perfil asignados por defecto en el programa son PF1, PF2...PF n. Para editar tales nombres se debe, en el menú de la ventana *Steady Flow Data*, dar clic sobre *Options/Edit Profile Name*. Aparece entonces la ventana en la que se efectúa la edición.



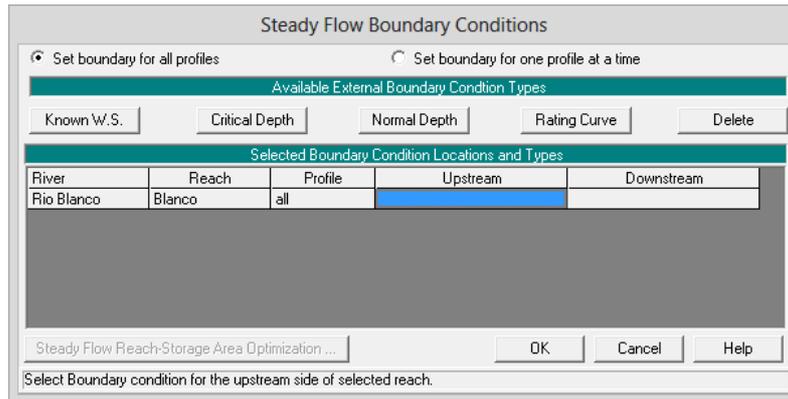
4.3.6. Otro de los parámetros que se requiere para el análisis de los perfiles es las características aguas arriba y aguas debajo de la sección en estudio. En la ventana *Steady Flow Data* se debe dar clic sobre el botón *Reach Boundary Conditions*.

⁷ Los datos de caudal aquí consignados se exageran para hacer más notorias las diferencias entre perfiles.





Aparece entonces la ventana *Steady Flow Boundary Conditions*:

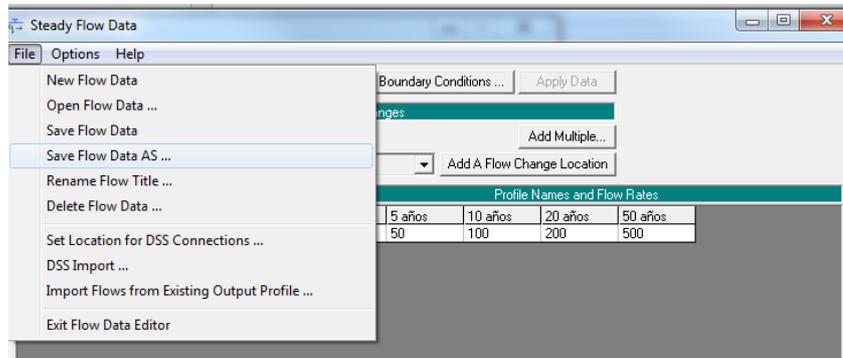


Las condiciones del río aguas arriba y abajo se pueden definir de manera individual para cada uno de los perfiles, o para todo el conjunto (opciones: *set boundary for all profiles* o *set boundary for one profile at time*). Por otra parte tales condiciones pueden ser descritas por diferentes tipos de datos (Brunner, 2010):

- Nivel de agua conocido (*Known W.S.*): para esta condición se debe introducir un nivel de agua conocido en cada uno de los perfiles a ser calculados.
- Profundidad crítica (*Critical Depth*): para esta condición no se exige ningún dato adicional; el programa calcula la profundidad crítica para cada uno de los perfiles y toma tal dato calculado como condiciones de contorno.
- Profundidad Normal (*Normal Depth*): para este tipo de condición, se requiere introducir la pendiente, que es usada por el programa para calcular la profundidad normal en el contorno de la sección. Si la pendiente es desconocida, se puede dar un valor aproximado ya sea de la pendiente de la superficie o del fondo preferiblemente en las secciones límite aguas arriba y aguas abajo.
- Curva de Gasto (*Rating Curve*): con esta opción se deben introducir datos de nivel y caudal.



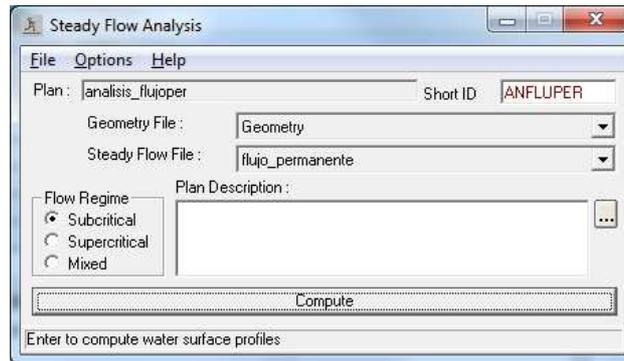
Una vez definidas las condiciones se debe guardar el archivo en la ventana *Steady Flow Data*:



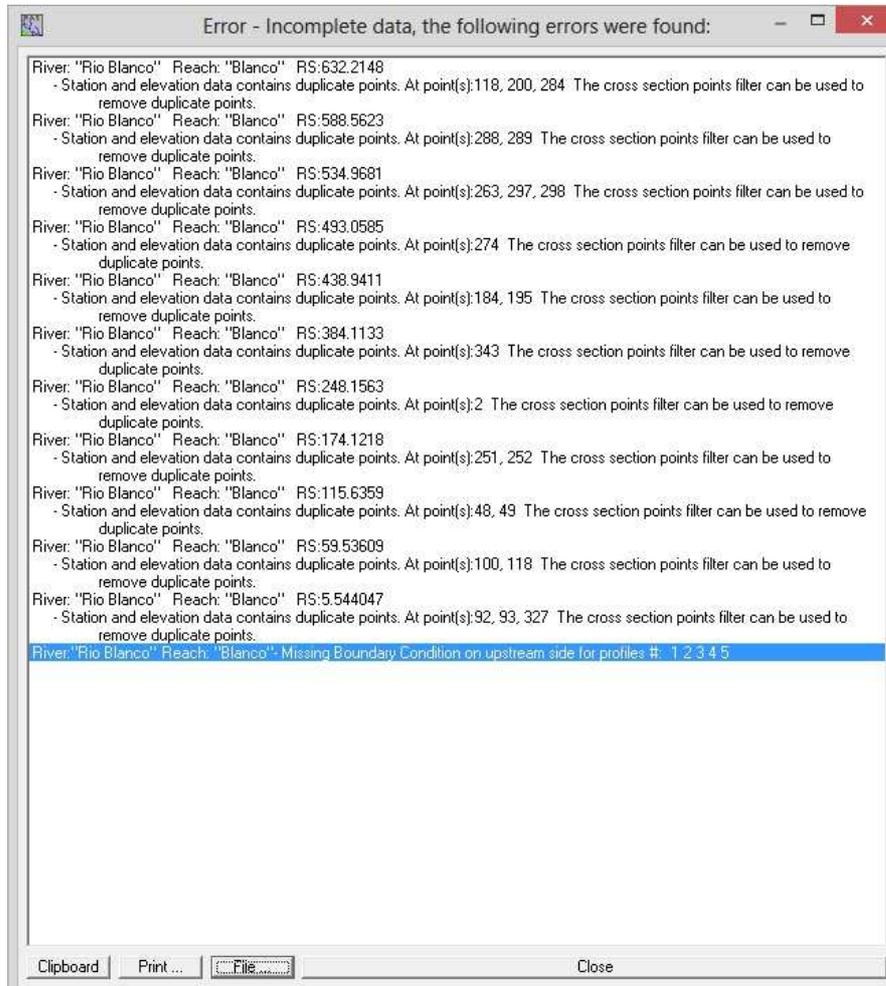
4.3.7. Con la geometría definida y los parámetros para cada perfil que se desea generar, se puede hacer el análisis de flujo permanente. Esto se hace accediendo a la ventana *Steady Flow Analysis* a través del ícono . En la ventana se debe definir los archivos de geometría (*File Geometry*) y el de parámetros de perfil de flujo uniforme, creado en los pasos 4.3.4 a 4.3.6. Se debe también definir el régimen de flujo⁸ y guardar el archivo correspondiente al análisis, posteriormente el modelo se ejecuta.

⁸La clasificación de los flujos de agua en críticos, sub-críticos o supercríticos depende de la relación entre las fuerzas de inercia y de gravitación de flujo. Esta relación se representada mediante el número de Froude, cuando éste es igual a 1, el flujo es crítico. Si por el contrario es mayor a 1, se considera que el flujo es supercrítico. Los flujos supercríticos tienen velocidades relativamente altas y poca profundidad, y son controlados por condiciones que se dan corriente arriba y que se transmiten corriente abajo. Este es el caso por ejemplo de ríos con en zonas de alta pendiente como los ríos de montaña. Por otro lado, si el número de Froude es menor a 1, el flujo se cataloga como sub-crítico. Los flujos sub-críticos son de velocidades bajas y altas profundidades, y además son controlados por las condiciones que se dan corriente abajo y que se transmiten corriente arriba. Este puede ser el caso de ríos de llanura. (Fuente: <http://mecanicafluidos7mo.blogspot.com/2008/04/flujo-en-canales-abiertos.html>. Consultado el 17 de junio de 2014.



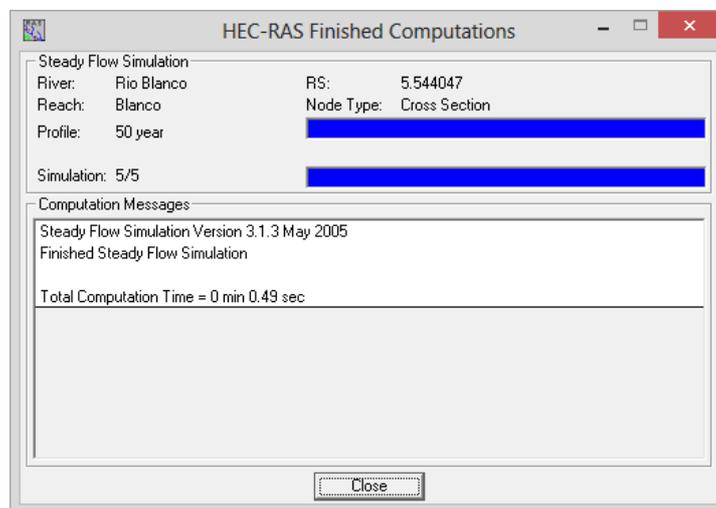


4.3.8. Es posible que al ejecutar el análisis de flujo se presenten errores relacionados con el modelo de terreno empleado, cuando un punto presenta dos alturas en los cortes transversales; aparece entonces una ventana de error.



En este caso se requiere regresar a la interfaz de geometría , y editar los puntos con error manualmente en la ventana *Cross Section* , en donde para cada perfil se seleccionan los puntos con error (de acuerdo al reporte de error) y se oprime el botón *Del Row*, eliminando así los puntos duplicados. Se puede hacer también de manera automatizada aplicando un filtrado por medio del menú de la ventana *Geometric Data/Tools/Cross Section Point Filter*.

4.3.9. Una vez corregidos los errores en los cortes, se corre de nuevo el análisis de flujo permanente. Al correr de manera correcta se debe ver así:



4.3.10. Una vez efectuado el proceso se pueden hacer diferentes tipos de análisis, para lo cual una herramienta de bastante utilidad es las representaciones graficas que el programa genera. A través del ícono *View 3D Multiple Cross Section Plot* , por ejemplo se pueden ver para cada perfil la superficie de inundación en perspectiva tridimensional, tal como se observa en la Figura 10.



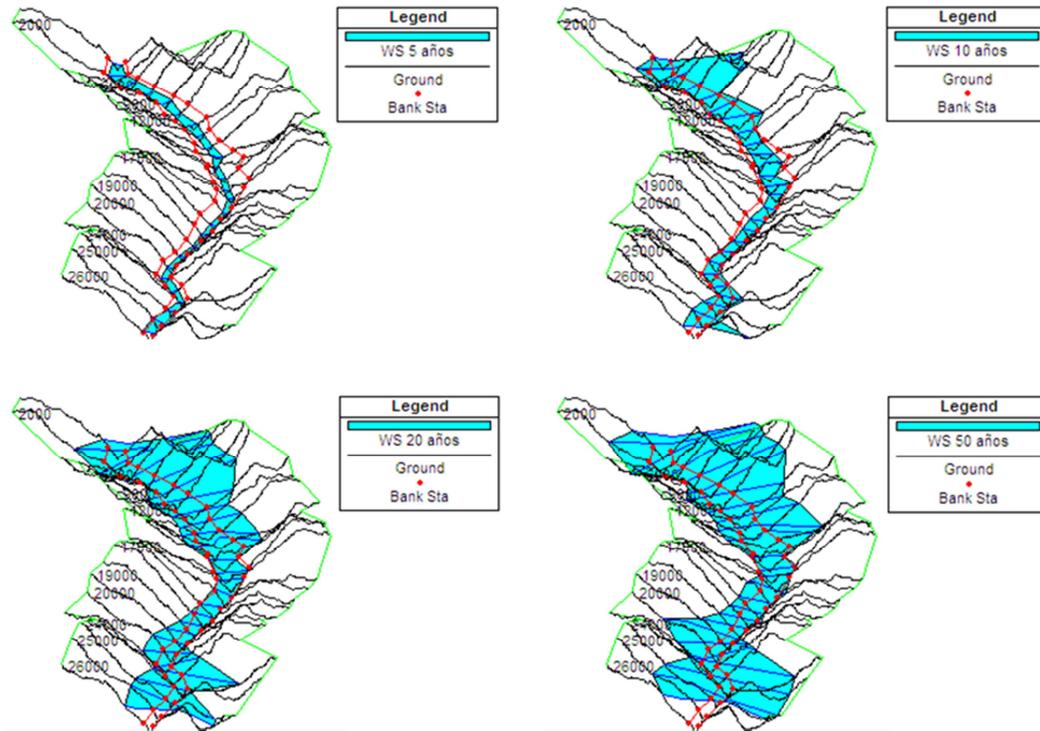


Figura 10: perspectiva tridimensional de superficies de inundación para cada perfil.

Mediante el ícono *View Profiles*  se pueden ver diferentes tipos de variables, en la Figura 11 se observa la altura de la superficie de inundación para cada perfil.

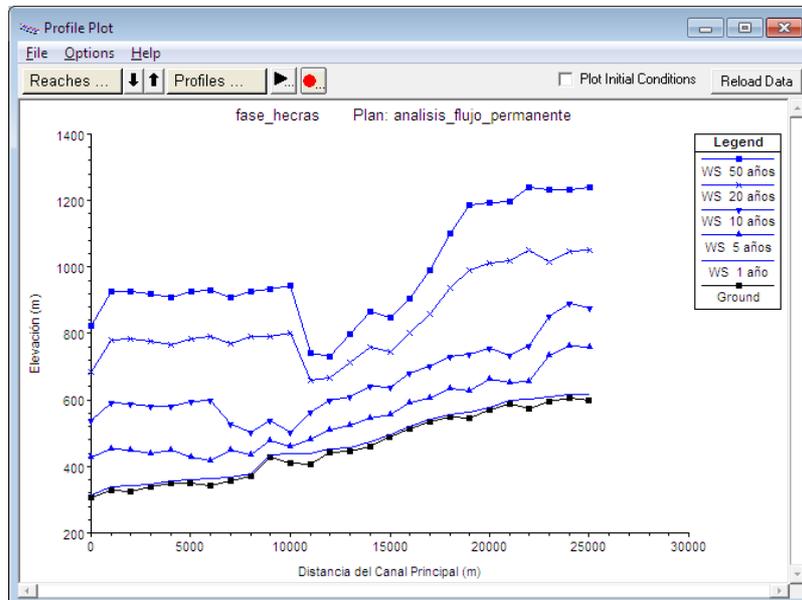


Figura 11: elevación de la superficie de agua para los diferentes perfiles.



Una gama más amplia de variables se puede desplegar mediante el ícono *View General Profile Tool* , en la Figura 12 se puede observar la velocidad en los cortes transversales del río para los diferentes perfiles generados.

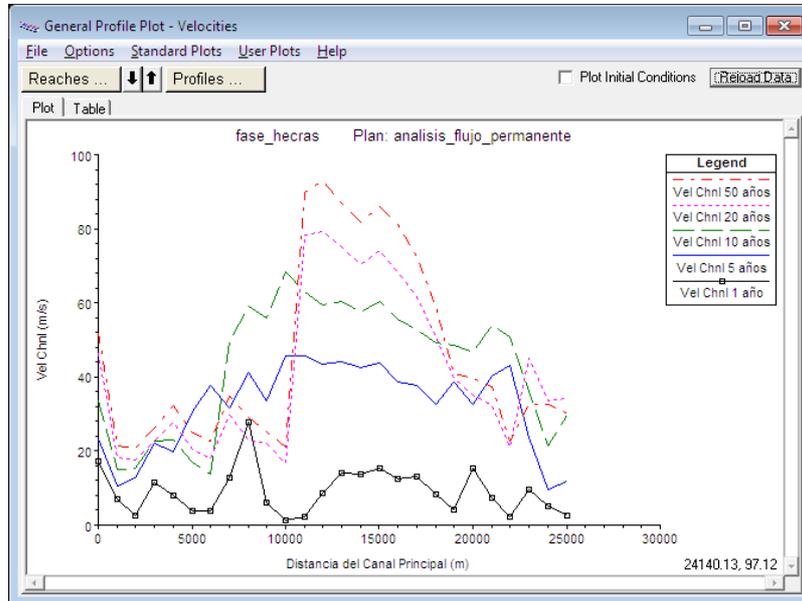


Figura 12: velocidad para los diferentes transectos del río en los perfiles de agua generados

Mediante el ícono *View Cross Section* , se pueden observar los diferentes perfiles desde la perspectiva de los cortes transversales.

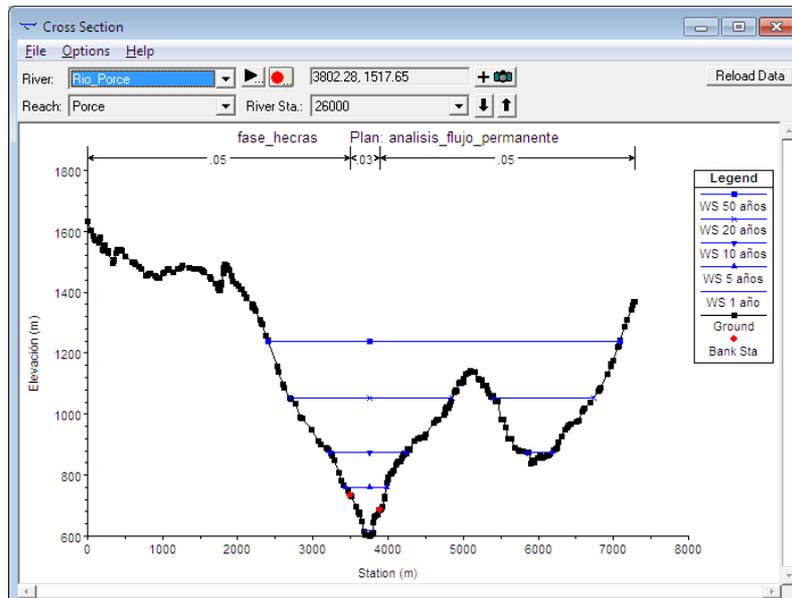


Figura 13: altitud de la superficie de agua para cada perfil generado en el corte transversal 26000.



Los análisis se pueden hacer también con base en los datos generados a través de la ejecución del modelo, los cuales quedan consignados en las tablas resultantes. Mediante el ícono *View Detail Output at Xs, Culvert, Bridges, etc.* , se pueden ver una gama amplia de datos hidrológicos para diferentes elementos geométricos creados, en un perfil y corte determinado; en la Figura 14 para el corte transversal 2000 con perfil a un año. En la parte inferior de la ventana se señalan los errores o alertas (por perfil y elemento, en este caso corte 2000 y perfil de 1 año), éstos deben ser tenidos en cuenta para detectar comportamientos atípicos, así como para mejorar el modelo y/o conocer sus limitaciones.

Plan: ANFLUJOPER Rio_Porce Porce RS: 2000 Profile: 1 año					
E.G. Elev (m)	342.08	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	2.60	Wt. n-Val.		0.030	
W.S. Elev (m)	339.48	Reach Len. (m)	1466.16	1000.00	846.98
Crit W.S. (m)	339.48	Flow Area (m ²)		559.93	
E.G. Slope (m/m)	0.005477	Area (m ²)		559.93	
Q Total (m ³ /s)	4000.00	Flow (m ³ /s)		4000.00	
Top Width (m)	110.25	Top Width (m)		110.25	
Vel Total (m/s)	7.14	Avg. Vel. (m/s)		7.14	
Max Chl Dpth (m)	9.99	Hydr. Depth (m)		5.08	
Conv. Total (m ³ /s)	54049.7	Conv. (m ³ /s)		54049.7	
Length Wtd. (m)	1000.00	Wetted Per. (m)		113.62	
Min Ch El (m)	329.49	Shear (N/m ²)		264.68	
Alpha	1.00	Stream Power (N/m s)	391380.50	0.00	0.00
Frcn Loss (m)	5.52	Cum Volume (1000 m ³)		396.68	
C & E Loss (m)	0.15	Cum SA (1000 m ²)		79.31	

Errors, Warnings and Notes	
Warning:	The energy equation could not be balanced within the specified number of iterations. The program used critical depth for the water surface and continued on with the calculations.
Warning:	The velocity head has changed by more than 0.5 ft (0.15 m). This may indicate the need for additional cross sections.
Warning:	The energy loss was greater than 1.0 ft (0.3 m) between the current and previous cross section. This may indicate the need for additional cross sections.
Warning:	During the standard step iterations, when the assumed water surface was set equal to critical depth, the calculated

Enter to move to next upstream river station location

Figura 14: parámetros hidrográficos calculados para el corte transversal 2000 y perfil a un año.

Con el ícono *View summary output tables by profile*, se pueden observar también diferentes datos hidrológicos pero por perfil, tal como se observa en la Figura 15.



Profile Output Table - Standard Table 1												
HEC-RAS Plan: ANFLUJOPER River: Rio_Porce Reach: Porce Profile: 1 año												Reload Data
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Porce	24000	1 año	4000.00	595.54	609.79	609.79	614.37	0.005643	9.48	422.06	46.05	1.00
Porce	23000	1 año	4000.00	575.27	601.70	588.60	601.96	0.000136	2.27	1762.39	107.85	0.18
Porce	22000	1 año	4000.00	586.90	598.64	598.64	601.32	0.005355	7.25	552.06	104.29	1.01
Porce	21000	1 año	4000.00	569.52	577.72	581.24	589.88	0.029090	15.45	258.97	54.06	2.25
Porce	20000	1 año	4000.00	546.68	561.82	556.38	562.77	0.000814	4.30	929.89	89.23	0.43
Porce	19000	1 año	4000.00	547.46	557.47	557.47	560.86	0.005115	8.16	490.34	72.72	1.00
Porce	18000	1 año	4000.00	535.96	542.02	544.58	550.55	0.025753	12.94	309.11	79.92	2.10
Porce	17000	1 año	4000.00	512.29	521.49	524.01	529.55	0.017233	12.58	318.06	61.17	1.76

Total flow in cross section.

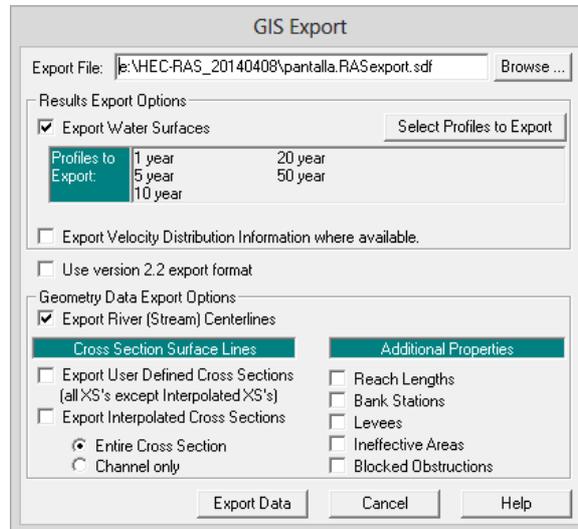
Figura 15: datos hidrológicos para perfil de un año

4.4. Fase final en HEC-GeoRAS- ArcGIS

El análisis se puede complementar mediante las herramientas de análisis espacial de software SIG, para tal fin es necesario transferir los resultados a ArcGIS, los procedimientos se describen a continuación.

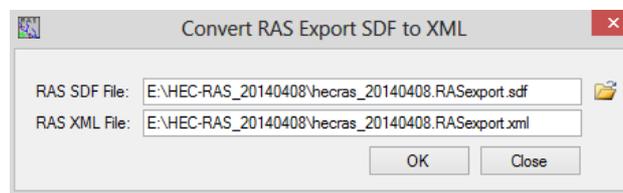
4.4.1. En el menú de la ventana principal de HEC-RAS, se exporta el proyecto a formato *.sdf (*File/Export Gis Data*), aparece la siguiente ventana en donde se da la opción de exportar lo que se desee, en este caso, para todos los perfiles, el río y los cortes transversales.





4.4.2. Para importar el archivo generado en HEC-RAS, se requiere inicialmente generar, a partir

del archivo *.sdf, un archivo *.xml, esto se hace mediante el icono  (*import RAS SDF File*) de las herramientas de HEC-GeoRAS en ArcGIS. Se despliega la ventana *Convert RAS Export SDF to XML*.



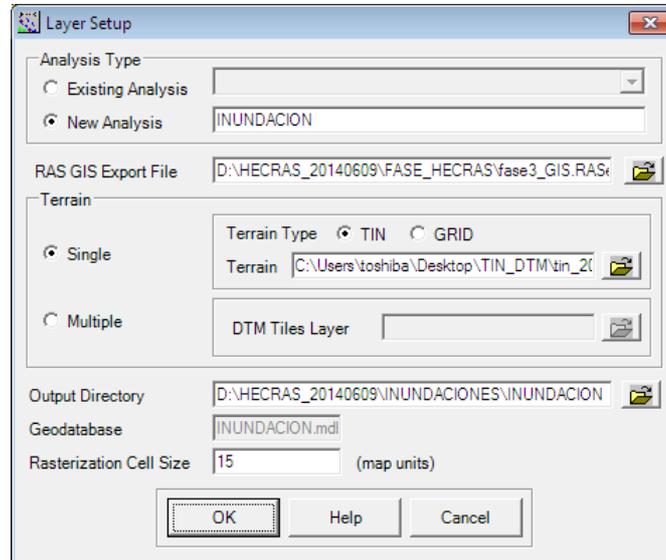
Previamente se debió haber creado un proyecto *.mxd de ArcGIS; se sugiere que éste sea el mismo en el que se digitalizaron los elementos geométricos del proyecto de la fase inicial (sección 4.2).

4.4.3. Posteriormente se debe crear el nuevo análisis a realizar, accediendo a la ventana *Layer*

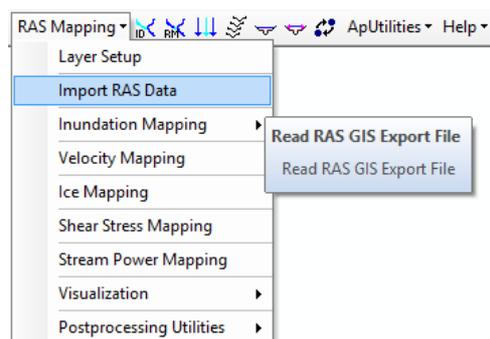
Setup for HEC-RAS PostProcessing. En ésta se definen como archivos de entrada: el modelo creado en HEC-RAS, previamente importado a formato *.xml, y el modelo de terreno que servirá como base para el análisis en ArcGIS; usualmente es el modelo TIN usado en la fase de digitalización de



elementos geométricos (sección 4.2). Adicionalmente se debe definir el directorio de salida y la resolución espacial de las capas raster que se deseen generar posteriormente.

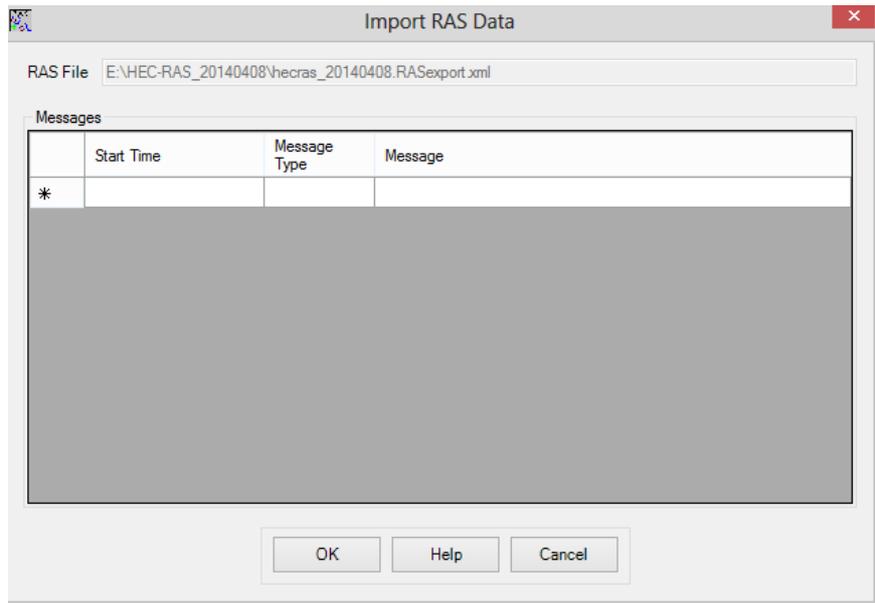


4.4.4. Luego se lleva a cabo en sí el procedimiento de importación del archivo *.xml a formato de archivos georeferenciados de ArcGIS, que son almacenados en una geodatabase con el nombre del proyecto *.mxd creado (sección 4.4.2). Este procedimiento se efectúa desde el menú de HEC GeoRAS.

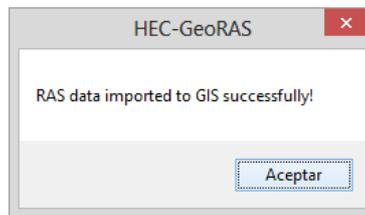


Aparece la ventana *Import RAS Data*, en la cual se identifica el archivo *.xml de manera automática, se da clic en *OK* y se inicia el proceso.





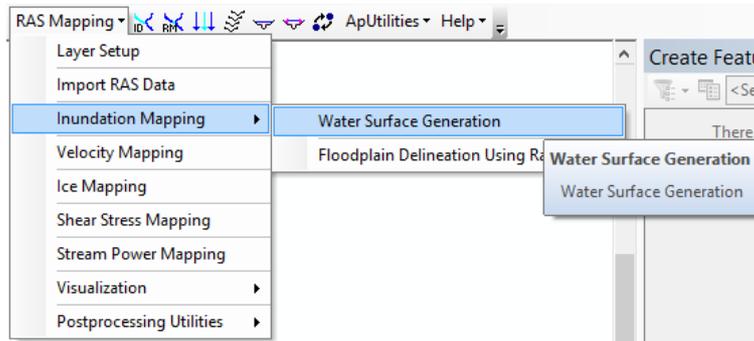
Cuando el proceso de importación termine el programa debe generar un anuncio en el que se indica que el procedimiento termino exitosamente:



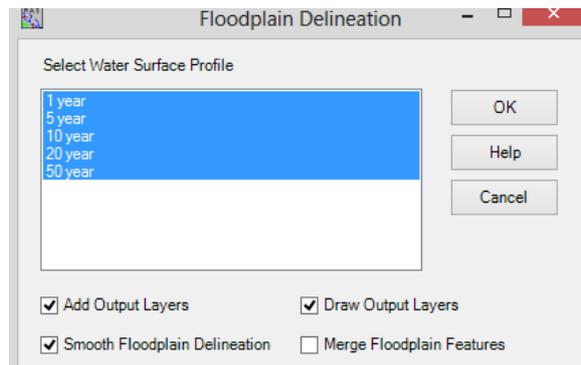
Igualmente el botón *Cancel* de la ventana *Import RAS Data* debe cambiar a *Close*. Se deben desplegar entonces todas las capas en la interfaz gráfica de ArcGis:



4.4.5. Posteriormente se pueden generar las superficies de agua en formato de ArcGIS, a partir del menú de HEC-GeoRAS /RAS Mapping/Inundation Mapping/ Water Surface Generation :

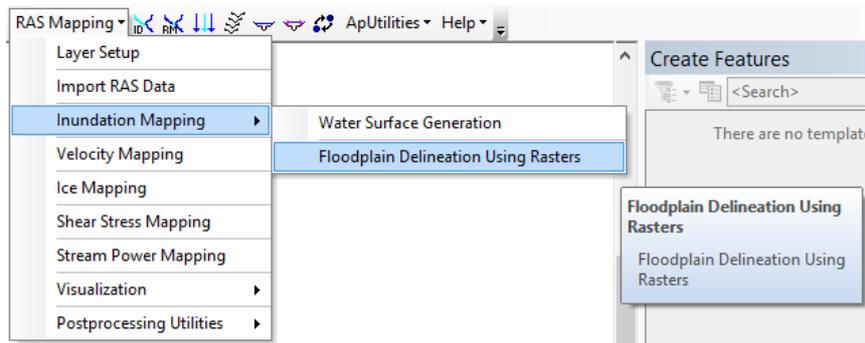


Se seleccionan todos perfiles generados en HEC-RAS sobre los cuales se desee generar la superficie de inundación en formato *shapefile* y se oprime y OK

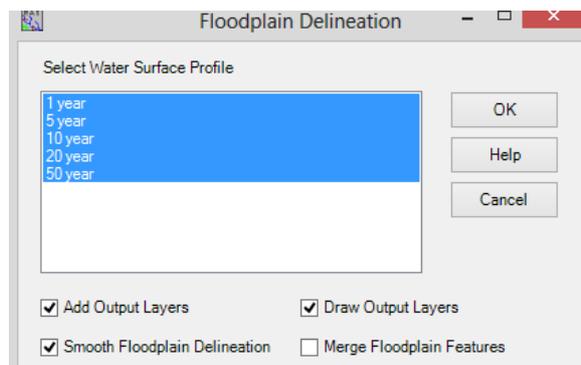


5. Inicialmente se crea un modelo TIN para cada perfil, se debe ir de nuevo a *inundation mapping* y entonces escoger la opción *Floodplain Delineation Using Rasters* para generar el contorno del área inundada y un modelo de profundidad, ambos para cada perfil generado en HEC-RAS.

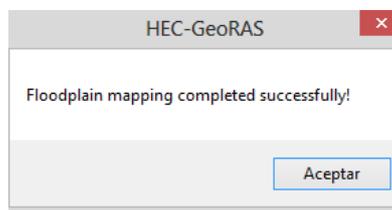




En la ventana *Floodplain Delineation* se seleccionan igualmente los perfiles sobre los cuales se deseen generar las capas de profundidad y áreas de inundación y se oprime *OK*.



Se demora un tiempo relativamente considerable y al final debe confirmar que el proceso se ejecutó exitosamente.



Como resultado se crean 3 archivos por perfil: Un archivo shapefile de polígonos que corresponde al área inundada (b), un archivo TIN de transectos (t), y un archivo raster de profundidad (d). El área del cauce en los diferentes perfiles generados se deben observar de la manera en la que se



muestran en la Figura 16, mientras que la profundidad se debe observar de la manera en la que se muestran en la Figura 17.

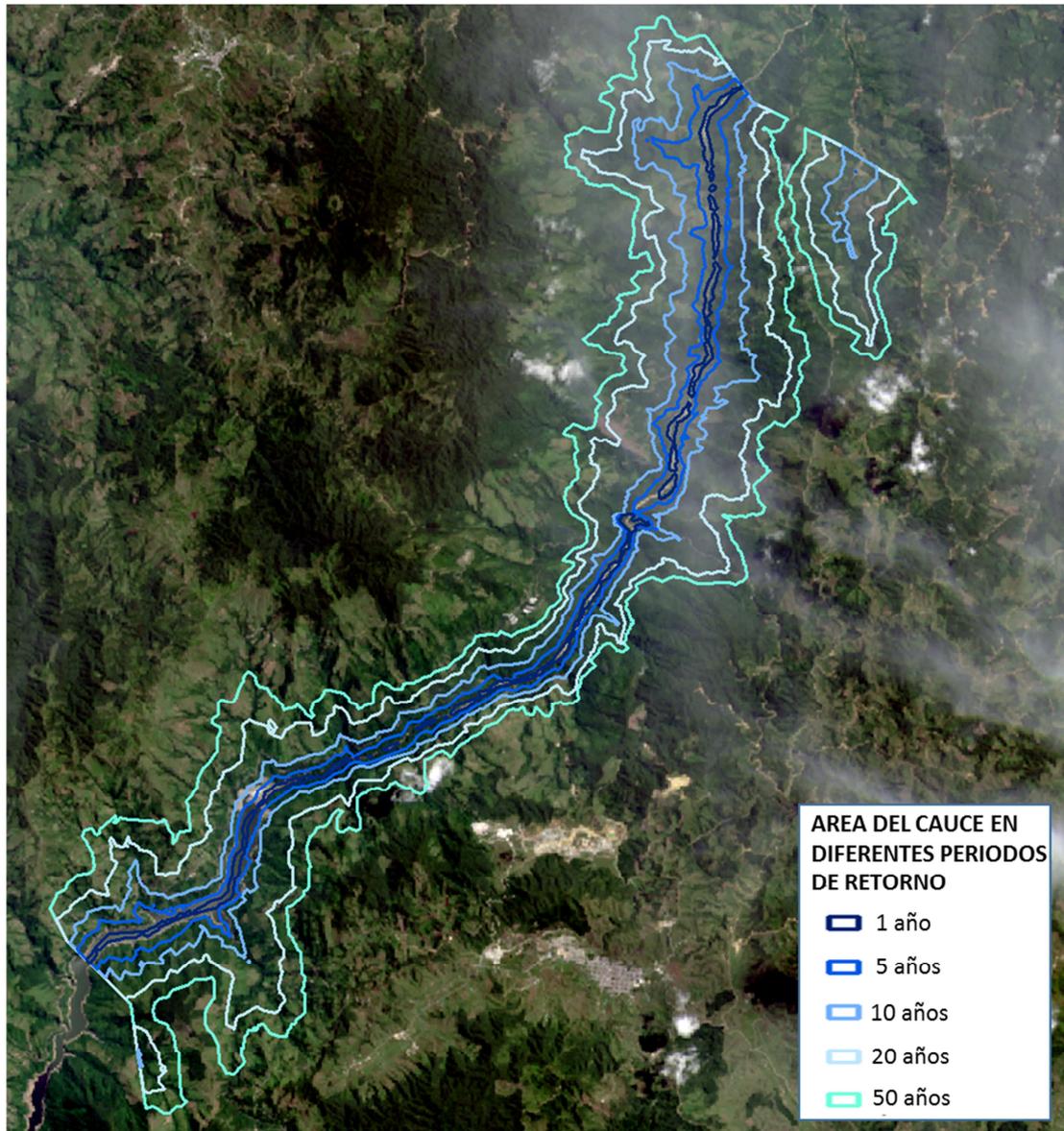


Figura 16: Área del cauce en los diferentes perfiles generados. Imagen de Fondo: Landsat OLI composición en color natural.



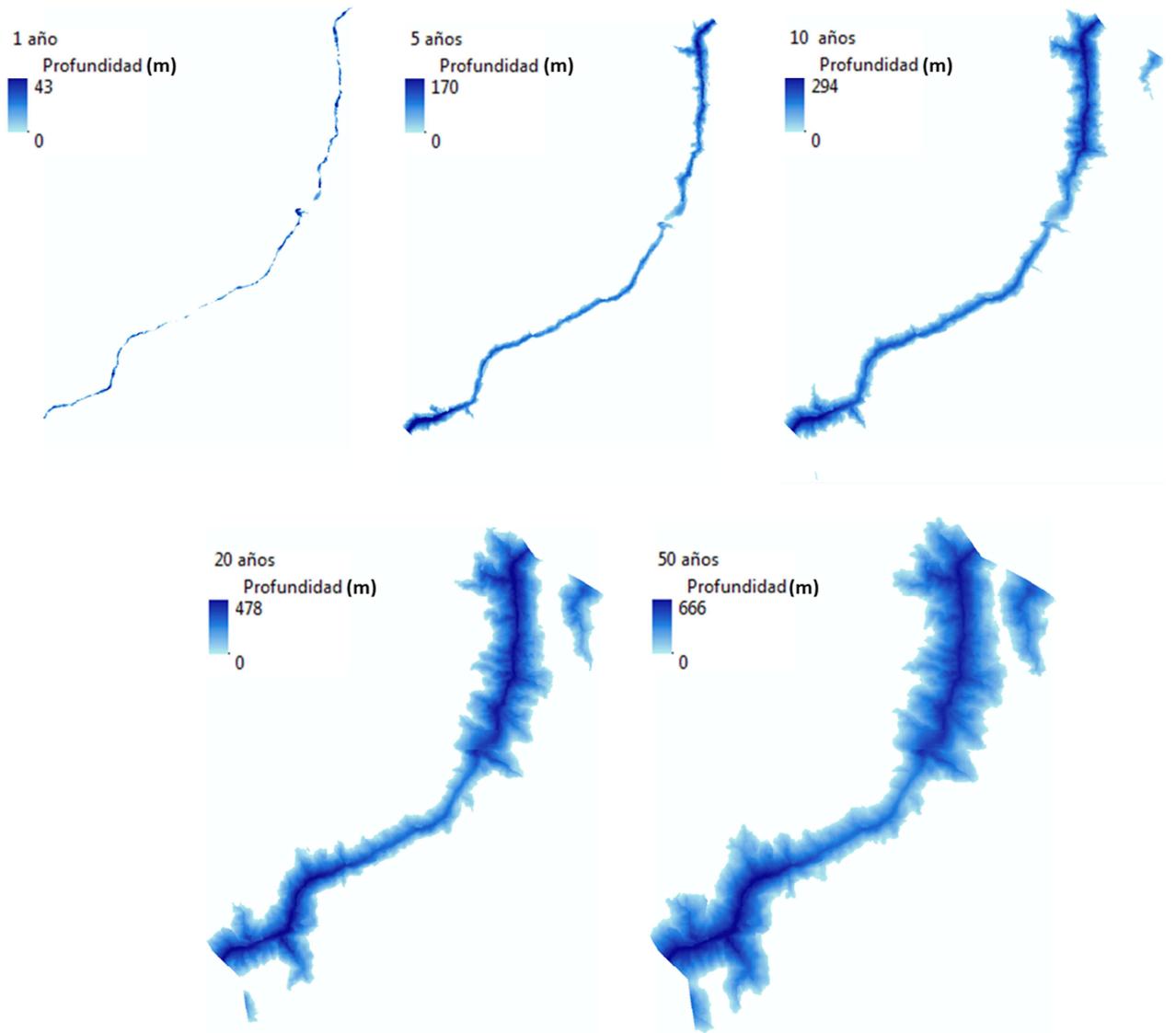


Figura 17: profundidad del río en los diferentes perfiles generados.

5. HERRAMIENTAS Y AYUDAS DE INTERNET



Para finalizar este documento se ha considerado importante señalar algunas de las herramientas y ayudas útiles para desarrollar aplicaciones de LiDAR en biodiversidad, bosques, y humedales a través del análisis hidrológico. A nivel de tutoriales se encuentran por ejemplo:

- http://www.csc.noaa.gov/digitalcoast/_pdf/Lidar-data-handler-ArcGISv10-tutorial.pdf
- <http://www.ign.es/resources/jiide2012/poster/1.Metodolog%C3%ADa%20para%20procesar%20datos%20LiDAR%20con%20ArcGIS%2010.pdf>
- <http://giesn.uc.edu/files/workshops/lidar/Ex1.pdf>
- <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/lidar-analysis-forestry-10.pdf>
- http://www.ndep.gov/USDAFS_LIDAR.pdf

Como tutoriales de análisis hidrológico con HEC-RAS se encuentran:

- www.youtube.com/watch?v=VuOLSM7X8o
- www.youtube.com/watch?v=HWVhEVyqU70
- www.youtube.com/watch?v=QxTfQJM-om0
- www.youtube.com/watch?v=ijk3rSIXBbo
- www.youtube.com/watch?v=VlsTNNi6Kc
- www.youtube.com/watch?v=sQ3rW9KBGA
- http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-georas/documentation/HEC-GeoRAS42_UsersManual.pdf
- http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Users_Manual.pdf

Como herramientas de software LiDAR se pueden utilizar:

Herramienta de análisis y procesamiento LAStools

- <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>

Visualizador libre de Fugro

- <http://www.fugroviewer.com/>

Herramienta de análisis y procesamiento BCAL LiDAR Tools

- <http://bcal.geology.isu.edu/tools/lidar/>
- Herramienta de análisis y procesamiento Fusion
<http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>
- Herramienta de análisis en aplicaciones forestales MCC-LIDAR:
<http://sourceforge.net/projects/mcclidar/>
- Visualizador libre de Merric's Mars
<http://www.merrick.com/Geospatial/Services/MARS-Software>
- Visualizador libre de Quick Terrain
<http://www.appliedimagery.com/download.php>



Respecto a humedales se encuentran herramientas de software como:

- Herramientas de análisis hidrológico desarrolladas por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada estadounidense, en este trabajo se emplearon HEC-GEORAS y HEC-GEORAS

<http://www.hec.usace.army.mil/software/>

- En esta página se encuentran los vínculos para descargar ArcHydro Tools, herramienta que permite hacer diferentes tipos de análisis hidrológicos. (Funciona con ArcGis)

<http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2011/10/12/arc-hydro-tools-version-2-0-are-now-available/>

- Software SAGA, que permite realizar diferentes tipos de análisis hidrológicos y geomorfométricos

<http://www.saga-gis.org/en/index.html>

BIBLIOGRAFÍA

ASCE. (1996). *Hydrology Handbook, Manuals of Practice N° 28* (2nd ed., p. 824). American Society of Civil Engineers.



Brunner, G. (2010). *HEC-RAS River Analysis System User 's Manual* (4.1 ed., p. 790). Davis, CA: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources, Hydrologic Center Engineering Center 8HEC).

Cameron, T., & Ackerman, P. . (2009). *HEC-GeoRAS GIS tool for support of HEC-RAS using ArcGIS. User 's Manual* (4.2 ed., p. 246). Davis, CA: US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources, Hydrologic Center Engineering Center 8HEC).

Davidson, N. C., & Finlayson, C. M. (2007). Earth Observation for wetland inventory , assessment and monitoring, *228*, 219–228. doi:10.1002/aqc

Müller, J., Moning, C., Bässlea, C., Heurich, M., & Brandl, R. (2009). Using airborne laser scanning to model potential abundance and assemblages of forest passerines. *Basic and Applied Ecology*, *10*, 671–681.

Pekin, B., Jung, J., Villanueva-Rivera, L., Pijanowski, B., & Ahumada, J. (2012). Modeling acoustic diversity using soundscape recordings and LIDAR-derived metrics of vertical forest structure in a neotropical rainforest, Volume 27, Pages 1513-1522. *Landscape Ecology*, *27*, 1513–1522.

Vanhatalo, J., Veneranta, L., & Hudd, R. (2012). Species distribution modeling with Gaussian processes: A case study with the youngest stages of sea spawning whitefish (*Coregonus lavaretus* L. s.l.) larvae. *Ecological Modelling*, *228*, 49–58. doi:10.1016/j.ecolmodel.2011.12.025

Zarkami, R., Sadeghi, R., & Goethals, P. (2012). Use of fish distribution modelling for river management. *Ecological Modelling*, *230*, 44–49. doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.01.011



PRODUCTO: ALGORITMOS Y APLICACIONES PARA EL
MONITOREO DE VARIABLES ESENCIALES DE LA
BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES

**DOCUMENTO CONCEPTUAL Y MÉTODOLÓGICO
PARA EL ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN EN
HUMEDALES**

Roberto Carlos Jaramillo Vásquez

Centro de Análisis y Síntesis (CAS) - Laboratorio de Análisis Espacial

Programa de Gestión de Información y Conocimiento

Instituto Humboldt

Julio de 2014



TABLA DE CONTENIDO

1. DIAGNOSTICO DE LOS DATOS POTENCIALMENTE UTILES PARA LA APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS PROPUESTOS PARA EL MONITOREO DE LA FRAGMENTACION Y CONECTIVIDAD HIDRICA SUPERFICIAL	6
1.1. Los sensores remotos en el estudio de la fragmentación y conectividad hídrica en humedales.....	6
1.1.1. Fotografías aéreas.....	7
1.1.2. Imágenes de satélite ópticas	8
1.1.3. Imágenes de radar	10
1.2. Otros datos potencialmente útiles para el monitoreo de la fragmentación y conectividad hídrica superficial en humedales.....	11
1.2.1. Insumos sociales	11
1.2.2. Datos hidrológicos de nivel o caudal	12
1.2.3. Otras imágenes de sensores remotos.....	12
2. INDICADORES Y VARIABLES PARA EL ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN Y CONECTIVIDAD HÍDRICA EN HUMEDALES	13
2.1. Introducción	13
2.2. Marco Conceptual	15
2.2.1. Literatura internacional en fragmentación hídrica en humedales.....	16
2.2.2. Literatura nacional en fragmentación hídrica en humedales	18
3. CRITERIOS, VARIABLES E INDICADORES EN EL ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN Y CONECTIVIDAD HÍDRICA EN HUMEDALES.....	20
3.1. Documentación alrededor de los criterios, variables e indicadores propuestos para el estudio y monitoreo de la fragmentación hídrica en humedales.....	21
3.1.1. Criterios.....	21
A. Dinámica de los cuerpos de agua en el Humedal.....	21
B. Flujos de entrada & salida de agua que alimentan y mantienen el humedal y sus cuerpos de agua. Cuenca aportante	23
C. Estado de la red hídrica y estructura del Humedal.	25



3.1.2.	Variables.....	26
A.	Presencia / Ausencia del agua superficial en el tiempo.....	26
B.	Flujos de agua que alimentan y mantienen el humedal.	27
C.	Presencia de estructuras que modifiquen la hidráulica del humedal.	28
3.1.3.	Indicadores.....	29
A.	Extensión del agua superficial en diferentes fechas.....	29
D.	Evidencia desde lo social de modificaciones al sistema, cambios evidentes en la estructura y red hídrica del humedal.	31
E.	Metros lineales (o por hectárea) de estructuras construidas o drenajes modificados o pérdida de superficie de humedal	32
F.	Nivel o caudal del río que irriga el humedal y determina su dinámica.....	33
G.	Construcción de infraestructura, modificación & obstrucción de flujos de agua.	34
3.2.	Generalidades de los efectos de las perturbaciones y limitaciones en el monitoreo en humedales en el contexto Colombiano	34
4.	BASE DE DATOS GEOGRAFICA QUE CUMPLA CON LOS CRITERIOS DEFINIDOS PARA CORRER LOS ALGORITMOS Y/O APLICACIONES CON LOS CUALES CONSTRUIR INDICADORES Y DEMAS INFORMACION ESPACIAL QUE PERMITA LA CARACTERIZACION, ANALISIS Y MONITOREO DE LA FRAGMENTACION EN HUMEDALES.	37
4.1.	Imágenes de satélite LANDSAT NASA.....	38
4.1.1.	Para la ventana de la zona Río Ariporo	38
4.1.2.	Para la ventana de la Ciénaga de Zapatosa.....	39
4.1.3.	Para la ventana de la Ciénaga de La Virgen.....	40
4.2.	Fotografías aéreas IGAC.....	41
4.3.	Imágenes de radar COSMO SKYMED.....	41
4.3.1.	Para la ventana de la Zona Río Ariporo.....	42
4.3.2.	Para la ventana de la Ciénaga de Zapatosa.....	42
4.4.	Datos de nivel o caudal de los cuerpos de agua	42
4.5.	Objetivo y elaboración de la geodatabase.....	43
5.	MODELOS PARA LA CONTRUCCION DE LOS PRODUCTOS CARTOGRAFICOS O MODELOS GEOGRAFICOS DE FRAGMENTACION Y CONECTIVIDAD HIDRICA SUPERFICIAL.....	44
5.1.	Modelo de Conectividad Hídrica Superficial	44
5.2.	Modelo para el análisis de intervención y perturbación en planicies inundables	45
5.3.	Aplicación de insumos sociales al análisis de fragmentación y conectividad hídrica superficial	46



6.	ESTUDIOS DE CASO – VENTANAS.....	47
6.1.	RÍO ARIPORO.....	50
6.1.1.	Análisis de la conectividad hídrica superficial en el área de estudio Zona Río Ariporo. 50	
6.1.2.	Superposición del modelo de conectividad hídrica superficial y las imágenes de radar 53	
6.2.	CIÉNAGA DE ZAPATOSA.....	54
6.2.1.	Análisis de la conectividad hídrica superficial de la Ciénaga de Zapatosa.....	54
6.2.2.	Superposición del modelo de conectividad hídrica superficial y las imágenes de radar 57	
6.3.	CIÉNAGA DE LA VIRGEN.....	58
6.3.1.	Análisis geográfico de los flujos de la Ciénaga de la Virgen con el mar y las intervenciones en la planicie costera entre la Ciénaga y la Vía de La Cordialidad.	58
6.3.2.	Aplicación del aporte de insumos desde lo social para complementar el análisis de conectividad y fragmentación hídrica en la Ciénaga de La Virgen.....	64
7.	PROTOCOLO PARA EL MONITOREO DE LA FRAGMENTACIÓN EN HUMEDALES.....	69
7.1.	Diagnóstico de los datos potencialmente útiles para el monitoreo de la fragmentación hídrica superficial en humedales.	69
7.2.	Descripción de los indicadores y variables espacializables que informen sobre la fragmentación en humedales en el tiempo y especificando datos de entrada. Contexto teórico de los indicadores propuestos, reconocer sus limitaciones y aplicabilidad.....	71
7.3.	Base de datos geográfica que cumpla con los criterios definidos para correr los algoritmos y/o aplicaciones con las cuales construir indicadores y demás datos geográficos para la caracterización, análisis y monitoreo de la fragmentación y conectividad hídrica en humedales.	73
7.4.	Documento con la descripción y análisis de los resultados de la aplicación de los algoritmos y/o aplicaciones para el análisis de la fragmentación y conectividad hídrica en humedales de las ventanas de trabajo definidas. Productos de cartografía temática.....	74
7.4.1.	Clasificación agua – no agua.....	74
7.4.2.	Capa de conectividad hídrica superficial.....	75
7.4.3.	Interpretación de intervenciones y perturbaciones.....	76
7.4.4.	Interpretación de la planicie inundable.....	77
7.4.5.	Análisis de flujos de agua.....	77
7.4.6.	Insumos desde lo social para complemento del análisis con sensores remotos y SIG. 78	



7.4.7. Geodatabase GDB y estructura 79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Detalles de algunos sensores remotos disponibles 9
 Tabla 2 Criterios, Variables e Indicadores en el análisis de la conectividad y fragmentación hídrica en humedales. 20
 Tabla 3 Generalidad de efectos de las perturbaciones en los humedales 35
 Tabla 4 Imágenes Landsat NASA, zona Río Ariporo 39
 Tabla 5 Imágenes Landsat NASA, Ciénaga de Zapatosa 40
 Tabla 6 Imagen Landsat NASA Ciénaga de La Virgen 41
 Tabla 7 Fotografía aérea IGAC, Ciénaga de La Virgen 41
 Tabla 8 Estaciones Paz Ariporo 43
 Tabla 9 Estaciones Ciénaga de Zapatosa 43
 Tabla 10 Longitud de las intervenciones registradas entre 1991 y 2014 en el área de estudio. 61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Flujos y relaciones en el humedal y planicie inundable. Adaptado de Brooks et al. 2009. 23
 Figura 2 Muestra de diferentes niveles de agua en una planicie inundable 30
 Figura 3 Imágenes Landsat TM y ETM 6-56 NASA. 39
 Figura 4 Imágenes Landsat TM 854 NASA composición RGB 453. 40
 Figura 5 Diagrama de flujo - modelo de conectividad hídrica superficial 45
 Figura 6 Diagrama de flujo - modelo para la construcción de capas temáticas de intervención y perturbación 46
 Figura 7 Cartografía base IGAC para la ventana de la zona Rio Ariporo.
<http://ssiglwps.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=7&title=Mapa%20Base> 49
 Figura 8 Cartografía base IGAC para la ventana de la Ciénaga de Zapatosa.
<http://ssiglwps.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=7&title=Mapa%20Base> 49
 Figura 9 Cartografía base IGAC para la ventana de la Ciénaga de La Virgen.
<http://ssiglwps.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=7&title=Mapa%20Base> 50
 Figura 10 Vista general zona Río Ariporo, ejercicio de conectividad hídrica superficial y detalle figuras 11 (a la derecha) y 12 (a la izquierda) 51
 Figura 11 Conectividad hídrica superficial, zona Río Ariporo 52
 Figura 12 Conectividad hídrica superficial, zona Río Ariporo 52
 Figura 13 Superposición del modelo de conectividad hídrica superficial con la imagen de radar Cosmo-SkyMed 54



Figura 14 Vista general Ciénaga de Zapatosa, ejercicio de conectividad hídrica superficial y detalle figuras 11 (arriba) y 12 (abajo).	55
Figura 15 Detalle de la parte central de la Ciénaga de Zapatosa.	56
Figura 16 Detalle de la parte sur de la Ciénaga de Zapatosa.	57
Figura 17 Superposición modelo de conectividad hídrica superficial con imagen de radar COSMO58	
Figura 18 Imagen Landsat OLI 13 Mayo 2013, NASA composición RGB 741 <i>stretch</i> izquierda y decoloración derecha.	59
Figura 19 Foto bocana y dique divisor de entrada y salida de agua.	59
Figura 20 Parte de la planicie inundable ciénaga de La Virgen, Cartagena Bolívar.	60
Figura 21 Interpretación de las intervenciones en parte de la planicie de la Ciénaga de La Virgen.	62
Figura 22 Intervenciones interpretadas para 1991 - izquierda y 2014 – derecha.	63
Figura 23 Detalle de intervenciones en la planicie costera de la Ciénaga de La Virgen. Fuente: Digital Globe, disponible en Google Earth.	64
Figura 24 Detalle La Boquilla 2014, Digital Globe disponible en Google Earth.	66
Figura 25 Foto de La Boquilla	66
Figura 26 Zona Norte, Ciénaga de La Virgen, recuadros figuras 20 (abajo) y figura 23 (arriba).	67
Figura 27 Detalle Canal natural Villa Gloria, Google Earth.	68
Figura 28 Inundación 2011 Villa Gloria, Foto Viviana Mourra, Google Earth	68
Figura 29 Visualización ventana de Zapatosa (Izquierda) y Ariporo (derecha)	76
Figura 30 Estructura de la Geodatabase elaborada.	80



1. DIAGNOSTICO DE LOS DATOS POTENCIALMENTE UTILES PARA LA APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS PROPUESTOS PARA EL MONITOREO DE LA FRAGMENTACION Y CONECTIVIDAD HIDRICA SUPERFICIAL

La utilidad potencial que tienen una serie de datos para una aplicación, depende de cada caso. Para este caso en el que el objetivo es el monitoreo de la fragmentación hídrica en humedales, el potencial de los datos se basa en la capacidad para reflejar el estado del agua superficial, en otras palabras si se encuentra el agua o no en las diferentes partes del territorio estudiado. La segunda realidad que debe registrar y reflejar, es la de las intervenciones o perturbaciones que el territorio estudiado tiene y como han ocurrido en el tiempo y espacio. Estas intervenciones tienen como resultado la presencia y ausencia del agua superficial actual y cómo se comporta en el escenario actual.

Para estudiar la fragmentación y conectividad hídrica superficial en humedales y planicies inundables los datos potencialmente útiles son las imágenes de sensores remotos, las series hidrológicas con la medición del comportamiento de los cuerpos de agua e insumos sociales que den cuenta del estado y cambios producto de las intervenciones. Los algoritmos propuestos están orientados a conocer y establecer la extensión del agua superficial en diferentes momentos, la infraestructura construida y demás intervenciones que generen perturbación sobre el estado original y flujos de agua en las zonas de interés.

1.1. Los sensores remotos en el estudio de la fragmentación y conectividad hídrica en humedales



Para el estudio de la fragmentación & conectividad hídrica en humedales, la aplicación de imágenes de sensores remotos es de gran utilidad al poder captar el estado de la superficie de la tierra y el agua en diferentes momentos. Como primera diferenciación general de los datos útiles en sensores remotos para las aplicaciones objeto de estudio, se separan las fotografías aéreas de las imágenes de satélite ópticas y de radar. Por lo general las fotografías aéreas han sido tomadas desde aviones desde su principio, dependiendo de la tecnología las fotografías aéreas se encuentran disponibles de manera análoga y/o pancromática. Con la inclusión de cámaras digitales se hace posible la toma de escenas a color. Las imágenes de satélite como su nombre lo indica, están captadas por sensores montados sobre los satélites que están en órbita alrededor de la tierra. Los datos se encuentran disponibles de manera digital.

1.1.1. Fotografías aéreas

Para Colombia el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC es el encargado de generar y ofrecer este tipo de base de datos geográficos de manera oficial. Las fotos aéreas tienen un gran potencial en el estudio de la superficie de la tierra al registrar los rasgos de interés en diferentes momentos. Las fotografías aéreas se encuentran disponibles para muchas partes del país desde alrededor de 1950, esta serie de tiempo hace posible reconstruir escenarios, en la mayoría de los casos, con niveles de perturbación inferiores a los actuales.

La resolución espacial de las fotografías aéreas ofrece un excelente nivel de detalle con el cual es posible realizar la fotointerpretación de estructuras construidas que cambian las condiciones en los humedales y planicies inundables (las escalas de las fotos están aproximadamente entre uno en sesenta mil a veinte mil). La posibilidad de visualizar en tres dimensiones suma al valor de las fotografías aéreas al poder visualizar las formas y cobertura de la tierra; sin embargo esto no es exclusivo de las fotografías aéreas, algunas imágenes satelitales pueden ser desplegadas y analizadas en ambiente estereoscópico, como las imágenes Aster, Spot, Ikonos y Quickbird.

Uno de los limitantes de las fotografías aéreas es su disponibilidad, que es un poco restringida debido a que las misiones que se hacen para obtenerlas no tienen continuidad en el tiempo sobre las mismas áreas.



En el mercado nacional hay empresas que pueden ofrecer productos útiles tomados en avioneta, helicóptero y drones recientemente. Estas fotografías pueden ser útiles al ser ajustadas a las necesidades de escala y cobertura, pero solo se pueden tener registros actuales. Pueden ser muy útiles para conocer en detalle el estado actual y monitorear en detalle un área de estudio, complementando series de fotografías anteriores.

1.1.2. Imágenes de satélite ópticas

Como el presente documento va orientado a las Corporaciones Autónomas CAR para que repliquen el análisis en sus jurisdicciones, éstas deben utilizar y sacar provecho de las bases de datos oficiales del orden Nacional. Las imágenes Landsat están disponibles de manera oficial en el Banco Nacional de Imágenes. Las imágenes Landsat como se mencionó anteriormente, empiezan a ofrecer datos detallados desde 1984 con el satélite Landsat TM. El sensor MSS desde 1973 ofrecía datos con menor resolución espacial, de 60 metros por pixel y solo 4 bandas. Los sensores Landsat TM, ETM y OLI ofrecen datos con resolución de 30 metros por pixel, en 6 diferentes longitudes de onda. Cuentan con un sensor termal con resolución de 60 metros por pixel y en ETM y OLI una banda adicional pancromática con 15 metros de resolución por pixel.

La posibilidad que ofrecen los sensores Landsat y otros, de registrar la energía reflejada y emitida de la tierra en diferentes longitudes de onda es uno de los atributos más importantes de estas imágenes y sensores. Por las propiedades físicas de la cobertura, el reflejo de la luz del sol es diferente dependiendo de sus características. Son esas las diferencias en el reflejo de la superficie de la tierra con lo que se trabaja para determinar la cobertura y estado en el momento de la toma de la imagen.

Sensores recientes como Aster y Spot ofrecen datos de gran utilidad para el monitoreo de la cobertura de la tierra. La serie de tiempo de Landsat TM, tiene ventajas importantes en este sentido, dado que tiene más de 30 años de tomas continuas cada 16 días, lo que permite hacer una reconstrucción histórica del territorio y en este sentido establecer un referente sobre el cual analizar y comprender los cambios actuales. Otra de las ventajas de las Imágenes Landsat sobre las Aster y Spot, es su cobertura por escena y la organización estructurada en una grilla con la numeración de las imágenes o escenas que se repiten en todas las misiones de Landsat.



MODIS cuenta con una serie de tiempo de 13 años, las imágenes se encuentran disponibles desde el 2001 y son de pixeles de mayor tamaño, 250 metros en los productos de mayor resolución como MOD13Q1. Las principales bondades de los sensores de MODIS, es su resolución espectral y temporal, que hace posible disponer de imágenes a nivel diario. Los otros sensores con mayor resolución espacial tienen una menor resolución temporal, sin la posibilidad de contar con datos diarios.

Sensores más recientes, como Ikonos y Rapid Eye ofrecen un buen detalle con una alta resolución temporal, desde 5 a 3 días, hasta nivel diario, con la red de monitoreo Rapid Eye, que cuenta con 5 satélites iguales (Tabla 1). Los costos de compra de estas imágenes restringen su acceso periódico en áreas extensas.

Para las aplicaciones de los casos de estudio, se seleccionaron las imágenes Landsat por las siguientes razones: su fácil disponibilidad, la resolución espectral, la resolución espacial, la resolución temporal y serie histórica, las dimensiones de la escena, validadas con décadas de aplicaciones.

En la siguiente Tabla 1 se detallan las características principales de algunos sensores disponibles en el mercado internacional. Para el presente ejercicio se han seleccionado las imágenes Landsat.

Tabla 1 Detalles de algunos sensores remotos disponibles

Satélite	Sensor	Resolución Espacial	Dimensiones	Rango Espectral	Resolución Temporal
Landsat	MSS	68 m x 83 m	185 km x 185 km	Verde, Rojo, IR Cercano Termal-IR	18 días
	TM	30 m, (120 m - termal)	183 km x 172 km	Azul, Verde, Rojo IR Cercano, IR Medio Termal-IR, Med-IR2	16 días
	ETM+	30 m	183 km x 170 km	Azul, Verde, Rojo	16 días
		(60 m - termal, 15 m pan)		IR Cercano, IR Medio Termal-IR, SWIR, Pancromatica	
	OLI &	30 m	183 km x 170 km	Aerosol Costero, Azul, Verde	16 días
	TIRS	(100 m - termal, 15 m pan)		Rojo, IR Cercano, SWIR-1, SWIR-2, Pancromatica, Cirrus Termal-IR 1, Termal-IR 2	
Modis	Aqua / Terra	IR Cercano y Rojo (250 m),	2330 km	-	1-2 días repite
		Azul, Verde y 3 bandas IR (500 m),		459 nm - 14.385 μm	Ciclo repetitivo
		bandas 9-36 (1000 m)		-	
Aster	VNIR	15 m	60 km	Banda 1: 0.52-0.60 um	16 días



Satélite	Sensor	Resolución Espacial	Dimensiones	Rango Espectral	Resolución Temporal
	SWIR	30 m	60 km	Banda 2: 0.63-0.69 μm	16 días
				Banda 3: 0.76-0.86 μm	
				Banda 3B: 0.76-0.86 μm	
				Banda 4: 1.600-1.700 μm	
				Banda 5: 2.145-2.185 μm	
				Banda 6: 2.185-2.225 μm	
				Banda 7: 2.235-2.285 μm	
				Banda 8: 2.295-2.365 μm	
				Banda 9: 2.360-2.430 μm	
	TIR	90 m	60 km	Banda 10: 8.125-8.475 μm	16 días
				Banda 11: 8.475-8.825 μm	
				Banda 12: 8.925-9.275 μm	
				Banda 13: 10.25-10.95 μm	
				Banda 14: 10.95-11.65 μm	
Spot	HRV	Multi espectral (20 m),	60 x 60 km	Verde, Rojo	26 días nadir,
		Pancromatica (10 m)		IR Cercano	4-5 días repite
				Pancromatica	
	HRVIR	Multi espectral (20 m),	60 x 60-80 km	Verde, Rojo	26 días nadir,
		Mono espectral (10 m)		IR - Cercano, SWIR,	4-5 días repite
				Mono espectral	
	VEGETATION	1 km	2,250 km	Azul, Rojo	1 días
	HRG	VIS + IR - Cercano (10 m),	60 x 60-80 km	Verde, Rojo	26 días nadir,
		SWIR (20 m),		IR - Cercano, SWIR,	4-5 días repite
		Pan (5 m o 2.5 m)		Pancromatica	
HRS	10 m	120 km	Pancromatica	26 días	
Rapid Eye	(5 iguales)	5 m	77 km	440 – 510 nm (Azul)	diario y 5 días
				520 – 590 nm (Verde)	
				630 – 685 nm (Rojo)	
				690 – 730 nm (Red borde)	
				760 – 850 nm (IR Cercano)	
Ikonos	Ikonos	Pancromatic 0.82 m, Multi espectral 4.0 m	15,2 km	0.45 - 0.853 μm	3 días

1.1.3. Imágenes de radar

Las imágenes de radar presentan un valor adicional potencialmente útil cuando se aplica en el estudio de sistemas acuáticos y de humedal. La señal de radar al encontrarse con agua o humedad, genera una señal de retorno específica que permite diferenciar su presencia. Este efecto se conoce como retrodispersión especular y se visualiza con tonos negros, cuando hay humedad se presentan tonos gris claro. Al ser sensible de esta manera a la presencia del agua, las imágenes de radar posibilitan la medición de la distribución de la humedad en la superficie



terrestre. El procesamiento es complejo y requiere experticia, el acceso también es restringido por los costos de las imágenes.

Otro punto a favor del uso de las imágenes de radar está relacionado con la manera como el sensor registra el reflejo de la tierra. Como no funciona con ondas ópticas, la radiación emitida por el radar y reflejada por la superficie de la tierra, tiene poca interferencia con las nubes. Este hecho da mayor potencial dado que permite contar con imágenes de radar en épocas lluviosas y nubladas, cuando se esperan registrar los mayores niveles y extensiones de cuerpos de agua. En estos momentos nublados las imágenes de satélite ópticas, pierden valor al no poder cumplir con el primer criterio que es ofrecer una escena clara que no induzca al error.

1.2. Otros datos potencialmente útiles para el monitoreo de la fragmentación y conectividad hídrica superficial en humedales.

Como los sensores remotos solo ofrecen una visión limitada a la superficie de la tierra en ciertos momentos y las salidas de campo muestran parte de la realidad actual, es necesario complementar el análisis geográfico con las versiones locales de la comunidad para enriquecer la comprensión del paisaje en la actualidad y como ha venido cambiando. La comunidad local y usuaria de las planicies inundables y humedales, conocen como es el estado actual y que intervenciones se han dado, en muchos casos el efecto que tienen estas intervenciones sobre el entorno. Las narrativas locales dan explicación a situaciones evidenciadas en los sensores remotos.

1.2.1. Insumos sociales

Como complemento al análisis geográfico los insumos sociales deben aportar o en ayudar a conocer la situación actual y pasada, de tendencias de uso y cambio de uso de la planicie inundable y cuerpos de agua. Los datos levantados deben dar explicación o pistas sobre las dinámicas sociales que llevan a la toma de decisiones que tienen efectos directos sobre la planicie inundable y la conectividad de los cuerpos de agua. Se pueden levantar con entrevistas



estructuradas o no estructuradas, depende del caso. Es importante registrar la percepción de cuál fue el impacto generado por la intervención y la posible solución de acuerdo al conocimiento local.

1.2.2. Datos hidrológicos de nivel o caudal

Los datos hidrológicos del estado climático local, niveles del río o cuerpo de agua aportante son importantes tener en cuenta. Los datos medidos de los niveles y caudales de los ríos y cuerpos de agua evidencian su comportamiento y son el más claro indicador del clima aguas arriba. Al estar estudiando la extensión de los cuerpos de agua en el tiempo con imágenes de sensores remotos, es necesario dar representación a estas extensiones de los cuerpos de agua en contexto hidrológico y climático. Es decir, poder establecer en qué momento en el ciclo de niveles es la superficie de agua representativa; si representa el nivel de agua alto, medio o bajo. Como se ha planteado en la aplicación, es ideal tener unas fechas representativas de momentos con niveles bajos, medios y altos. Niveles muy altos son útiles para establecer eventos extremos.

Los datos deben poder representar el comportamiento del cuerpo de agua de interés en el tiempo. Es decir hacer explícitamente geográfico los momentos con niveles altos, medios y bajos que ha tenido el cuerpo de agua. Este tipo de datos se pueden comprar en el instituto IDEAM, encargado de los estudios Hidrológicos y Ambientales del país. Es posible montar estaciones privadas de monitoreo como las tienen algunas entidades o corporaciones ambientales CAR, acueductos y represas para riego, consumo e hidroeléctricas.

Con estos insumos que permite establecer que está pasando y que ha pasado en la planicie inundable, las series históricas de cómo se han comportado los cuerpos de agua y el registro de unidades representativas a estos momentos hidrológicos, se puede empezar a analizar la conectividad y fragmentación hídrica superficial.

1.2.3. Otras imágenes de sensores remotos



Como se recomienda, la mayor cantidad de imágenes de diferentes perspectivas o puntos de vista sobre el área de estudio va a enriquecer el conocimiento de este para la construcción de modelos geográficos o abstracciones de la realidad de manera espacialmente explícita. En este sentido las imágenes disponibles en la plataforma de Google Earth u otras similares, aportan escenas que se pueden incluir al abordar análisis geográficos de conectividad en humedales.

2. INDICADORES Y VARIABLES PARA EL ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN Y CONECTIVIDAD HÍDRICA EN HUMEDALES

2.1. Introducción

En Colombia, la red hídrica superficial se encuentra conformada por 4 de las 214 grandes cuencas a nivel mundial con más de 100.000km², los ríos Magdalena, Caquetá, Guaviare y Meta se destacan a nivel global. El país cuenta con grandes cuencas con superficies de drenaje entre 50 y 100 mil km² como la de los ríos Inírida, Cauca y Putumayo. Sumando al recurso hídrico nacional están otras más de 700 mil microcuencas con áreas menores a 10km², además de 1600 almacenamientos superficiales entre ellos lagunas, lagos y embalses de los cuales 97.5% tienen áreas menores a 100m² y que junto con ciénagas y pantanos cubren un área de casi 3 millones de hectáreas para un total de 17 mil almacenamientos superficiales de agua (SIAC, 2001).

Como dato oficial nacional según el SIAC (2001), existen aproximadamente 1600 cuerpos de agua catalogados como lagos, lagunas, y embalses que cubren una superficie menor al 0.01km² del territorio colombiano de los cuales tan solo 40 son las principales reservas de agua (20 lagos y 20



embalses) acumulando 12.220 millones de m³. Igualmente, existen 13 mil cuerpos de agua no identificados, que presentan características de ciénagas ubicadas en los departamentos de Bolívar y Magdalena que almacenan aproximadamente 15 mil millones de m³.

Los humedales son los sistemas más amenazados del mundo por influencias humanas como la conversión (uso) de coberturas naturales a productivas y el drenaje para adecuación (Verones et al., 2013) de tierras inundables para aumentar su productividad. Como básicamente el humedal es regido por condiciones hidrológicas, cambios en volúmenes de agua y temporalidad en los flujos se convierte en gran amenaza (Verones et al., 2013). La alteración de los ciclos normales presenta una amenaza a los organismos y sistemas productivos asociados, ya que al cambiar las condiciones normales algunos recursos vitales pueden ser escasos.

Es cada vez más común ver en las noticias nacionales e internacionales la ocurrencia de eventos climáticos extremos de falta de agua y exceso, sucediendo con mayor frecuencia. Entre 2010 y 2011 Colombia tuvo unas fuertes precipitaciones durante el fenómeno de la Niña, el cual resultó en eventos extremos de inundación y deslizamientos de tierra que afectaron gran parte del país.

Actualmente en algunas zonas del país se están presentado situaciones de sequía extrema, causando problemas sociales y ambientales. En las zonas urbanas donde escasea el agua, las comunidades locales llegan a extremos de perforar tubos para surtirse de agua, como en Santa Marta. En zonas rurales donde escasea el agua, la presión que ejercer la falta de agua llega a matar grupos e individuos de poblaciones de fauna que no resisten las condiciones. Las zonas objeto de estudio en el Caribe y el Orinoco, Ciénaga de Zapatosa y el Río Ariporo, presentan en este momento un marcado déficit hídrico, incendios forestales y muerte de vida silvestre. El IDEAM ya ha pronosticado que estamos en un momento o año Niño, en el cual se espera la falta de lluvias.

Ante el evidente cambio de condiciones climáticas y sobre todo en los eventos extremos y regímenes cíclicos, la falta de planeación para afrontar estas situaciones, causa un fuerte impacto socioeconómico y ambiental. El conocer qué está pasando y poder prever situaciones problemáticas es de gran valor para un adecuado manejo y gestión territorial, ambiental y social.

El conocimiento de la dinámica de los humedales es entonces una línea importante de investigación y trabajo para las entidades con esa misión. La intervención de los humedales y la



modificación de su estructura y su hidráulica tienen una serie de consecuencias que en últimas terminan afectando al hombre, sus inversiones y condiciones vida.

La alteración del sistema hídrico que mantiene el humedal causa cambios en su estado y función. En general las condiciones de productividad se deterioran y es preocupante debido a la importancia y el “estatus” de los humedales, donde la provisión de servicios ecosistémicos es evidente y reconocida (Millenium Ecosystem Assessment, 2005), (TEEB, 2010). Siendo estos ecosistemas de gran productividad y sostenimiento de las poblaciones que lo aprovechan, deben tener un conocimiento y manejo adecuado (Ramsar).

En el ejercicio del seguimiento del humedal, una de las variables que se puede monitorear y analizar con la ayuda de los sensores remotos, es la conectividad hídrica superficial. La variación de cómo se comporta en el humedal el agua, es útil al mostrar el movimiento que ha tenido el agua en el tiempo y en el espacio estudiado; en épocas altas se puede observar cuanto espacio ocupa y qué zonas inunda, y en aguas bajas cuales son los cuerpos de agua permanentes y las líneas o áreas de comunicación que tienen.

La perturbación en los flujos de agua y como transita en el humedal debe ser analizada, las condiciones iniciales y las actuales, conocer como se ha llegado al estado actual y cómo se comporta el sistema, es básico. El reto aun mayor es poder plantear y modelar escenarios coherentes con la realidad y poder diseñar soluciones a los problemas que enfrenta cada región en el manejo alrededor de sus humedales, sin mencionar el trabajo de implementación de estrategias de adaptación.

2.2. Marco Conceptual

- Humedal (estructura y funcionamiento)
- Fragmentación & conectividad hídrica en humedales
- Monitoreo

Los lagos, ciénagas y humedales presentan características parecidas a los océanos, a diferencia de otros sistemas acuáticos, que pueden presentarlas en menor cantidad. “En ambos, los procesos, adaptaciones, grupos tróficos y poblaciones se estructuran y funcionan de modo similar. Lo más destacado de estos ambientes lénticos es que el transporte de materiales y elementos, las



consecuencias de dicho transporte, los procesos y los efectos derivados de ello, se producen en el gradiente espacial, a diferencia de los sistemas fluviales en los que estos procesos se dan en el gradiente longitudinal u horizontal (N., 267)". En cuanto a la estructura de un lago, al estudiar las comunidades bióticas presentes, éstas pueden reflejar los patrones de comportamiento de diversas variables tanto bióticas como abióticas del sistema.

Los humedales y llanuras de inundación son sistemas naturales para la amortiguación de inundaciones. A su vez, las llanuras de inundación conectan cuerpos de agua, cauces de ríos y ciénagas. Según (Thoms, 2003) las llanuras de inundación son ecotonos que forman una transición entre sistemas acuáticos y terrestres. Éstas facilitan la liberación de material disuelto de carbón orgánico y nutrientes de los sedimentos superficiales haciéndolos disponibles junto con la materia vegetal para ser transportada a los cauces de ríos (Baldwin & Mitchell, 2000). En ecosistemas ribereños con llanuras de inundación, la fragmentación & conectividad hidrológica es facilitada por los pulsos de inundación, creando patrones (secos y mojados) variados en superficies adyacentes (Thoms, 2003)

El desarrollo de infraestructura no solamente aísla grandes partes de superficie de inundación por la construcción de diques y terraplenes, sino que también altera y cambia el carácter del área inundable ya que al despejar la vegetación altera el estado natural liberando la retención de carbono orgánico, en consecuencia influyendo en el acceso y la conectividad hídrica (Thoms, 2003).

A lo largo de la historia humana el concepto de humedal se ha transformado de cuerpos de agua inhóspitos y territorios baldíos, y recientemente a la oportunidad para la conversión en áreas de agricultura, residenciales o industriales (S., 2007). Ha cambiado el concebir esos territorios sin uso a una oportunidad de uso, cambiando o adecuando sus características para diversos fines. Es por esto, que el entendimiento y la protección de humedales es indispensable porque estas grandes porciones y cuerpos de agua son sometidos a grandes presiones (Brooks et al., 2009)

2.2.1. *Literatura internacional en fragmentación hídrica en humedales*

La fragmentación se encuentra definida como cualquier factor natural o inducido por el ser humano que directa o indirectamente causa un cambio en un ecosistema así como cualquier



variación en el estado, producción o estructura del mismo. La principal consecuencia de la fragmentación es que los hábitats se segmentan y se dividen ya sea en parches o en islas generando pérdidas en la productividad natural del sistema (Landeros, 2007)

Los diferentes tipos de humedales como ríos, lagos, lagunas, estuarios y pantanos son ecosistemas de gran importancia por las varias funciones ecológicas tienen como el reciclaje de nutrientes, la purificación del agua, son hábitat de gran número de organismos así como el aumento y mantenimiento del flujo de la corriente de agua. Este último crea vínculos temporales o permanentes entre los diferentes cuerpos de agua y a través de la conectividad hídrica se proporciona un apoyo permanente en la funcionalidad del ecosistema acuático dentro de la cuenca (Mao & Cui, 2012) y planicies de inundación.

La fragmentación hídrica en humedales se encuentra relacionada directamente con la fragmentación del paisaje (Etter, McAlpine, Wilson, Phinn, & Possingham, 2006). La fragmentación en paisajes inducida por el hombre ha generado pérdida de lagos, lagunas, ciénagas y humedales, reduciendo la conectividad de corredores naturales y la posibilidad de recolonización de plantas y animales con bajas capacidades de dispersión. Asegurar la conectividad hídrica es indispensable en el manejo de ecosistemas acuáticos, ya que mantiene la dispersión de organismos (Abell et al., 2008; Søndergaard & Jeppesen, 2007). La fragmentación hídrica en ecosistemas de agua dulce definidos por ríos y llanuras son facilitados por los pulsos de inundación creando patrones naturales pero variables en el tiempo a través de procesos de sequía e inundación en las superficies de llanuras (Thoms, Southwell, & McGinness, 2005)

En sistemas de planicies inundables como humedales y ciénagas, la falta de conectividad entre afluentes por el acelerado desarrollo de infraestructura humana genera cambios en los periodos de conexión hídrica, así como parches de inundación en áreas no deseadas. Según C.M. Pringle (2001) la conectividad hidrológica se refiere a la transferencia por medio del agua, materia, energía y organismos dentro o entre el ciclo de los elementos hidrológicos. La conectividad hidrológica es importante para la integridad ecológica de los paisajes y sistemas terrestres y acuáticos (C. Pringle, 2003). Factores como el transporte de sedimentos, lluvia ácida, y propagación de patógenos y especies invasoras a lo largo de ríos y corredores riparios no solo afectan la conectividad hidrológica, sino que sus efectos se ven agravados por los cambios en las características del ecosistema. En los ecosistemas hídricos de agua dulce la conectividad hídrica



mantiene el vínculo de los sistemas adyacentes y está definida por tres espacios dimensionales que interactúan en los ríos: en términos longitudinales (estuarinos, río aguas arriba y abajo), laterales (planicie de inundación ribereña) y vertical (aguas subterráneas y atmosféricas) combinados con el clima y la precipitación (Castello et al., 2013; C. Pringle, 2003; Ward J.V. Stanford J.A, n.d.) También describen el concepto de conectividad hídrica como la transferencia de agua entre los canales de agua y las planicies de inundación entre la superficie y compartimientos del subsuelo, teniendo implicaciones en los patrones de biodiversidad.

El concepto de conectividad hídrica, también denominada “River Continuum Concept” por Vannote y colaboradores (1980) hace referencia a la red de ecosistemas ribereños como un ecosistema continuo en donde se integran procesos físicos y de recursos en un gradiente que regulan la biota y los procesos ecosistémicos. La relevancia del concepto se debe a los procesos dependientes como flujo de carbono, ciclo de nutrientes, ensamblaje biótico de diversidad, productividad de peces, biomasa cosechable entre otros (Sedell J.R. Richey J.E. Swanson F.J., 1989). Los cambios graduales en las comunidades a lo largo de ríos son producto de estrategias de resiliencia de las especies que se adaptan de manera funcional o por dinámicas de metapoblaciones que resulta en intercambio y estrategia de especies (Looy & Looy, 2007). Mientras tanto Golden y colaboradores (2014) conceptualizan la conectividad hidrológica como en el caso del flujo entre diferentes cuerpos de agua conectados a través de su sistema de hídrico superficial, subterráneo, escorrentías, o flujos subsuperficiales.

Se ha podido establecer que gran parte de la configuración de la superficie del paisaje se atribuye a su red de drenajes, como de ríos que forman un patrón que afecta las cuencas en términos estructurales, de topografía, geoquímica, vegetación y clima (C. M. Pringle, 2001) dado que la conectividad en humedales, ciénagas y lagunas es de vital importancia (Cottenie & Meester, 2003; Magnuson, Benson, & Kratz, 2004; Søndergaard & Jeppesen, 2007).

2.2.2. *Literatura nacional en fragmentación hídrica en humedales*

El tema de conectividad y fragmentación hídrica a nivel nacional se ha desarrollado poco y se destacan para la recopilación bibliográfica de trabajos nacionales, temas que tengan relación con el tema de interés. Los humedales y ciénagas son el elemento básico constituyente del plano inundable, estos son los grandes receptores del total de agua proveniente de lluvias o escorrentía



a lo largo de cuencas, ciénagas y diferentes tributarios, por lo que su importancia radica en mantener conexiones con ríos principales a través de canales meandriformes (IDEAM, 1998)

En Colombia, existen tanto condiciones hidrológicas como topográficas que garantizan la oferta de agua del territorio a través de una densa red hídrica pero no hay ordenamiento para el uso de los recursos hídricos, es decir, aunque el aprovechamiento del recurso para los acueductos urbanos proviene en más del 80% de ríos pequeños, quebradas y arroyos cercanos, no existen programas de conservación de cuencas, o sistemas de regulación y almacenamiento, transporte o tratamiento ni los recursos económicos necesarios para su realización (IDEAM, 1998). Según el (SIAC, 2001) la riqueza hídrica del país se demuestra a través de la calidad favorable del almacenamiento superficial de agua en los sistemas lenticos y por la presencia de grandes extensiones de humedales, los cuales tienen una importancia ecológica ya que son zonas de amortiguación de niveles de aguas altas y lugares de refugio ecológico transitorio de especies migratorias y de alta productividad biológica.

La fragmentación en el paisaje Colombiano se debe principalmente al uso de la tierra, si bien es cierto que las coberturas más importantes de la categoría basal son la selva con un 46%, los agro ecosistemas con 24%, las sabanas con 19% y los cuerpos y cauces de agua, las áreas insulares y bosques riparios con el restante 11% (IDEAM, 1998) no solo los agro ecosistemas sino también la minería a gran escala y a cielo abierto modifica la morfología del suelo alterando indirectamente los cursos de agua, lo que genera la formación de lagunas para el material de descarte y consecuentemente aumenta el nivel de sedimentación de los ríos por la erosión y amontonamiento de residuos estériles así como el envenenamiento de la vida acuática (SIAC, 2001). A su vez, teniendo en cuenta que la oferta hídrica superficial de los sistemas lenticos no se encuentra distribuida homogéneamente en el territorio existe mayor riesgo de fragmentación en la fluidez de los sistemas lenticos con las corrientes y cauces de agua.

Como aplicación específica en la conectividad hídrica superficial, la Fundación Alma (Alma, 2014) desarrollo entre el 2013 y 2014 un proyecto donde se replicó la metodología propuesta para la construcción de la conectividad hídrica superficial. En ese caso mostro como se daba la comunicación entre el Río Magdalena y los complejos de humedales asociados. Los aportes del componente social y biológico en campo fueron importantes al complementar el análisis



geográfico. El levantamiento de la toponimia, intervención de comunicaciones entre cuerpos de agua y zonas importantes para la comunidad fueron georeferenciadas en campo.

3. CRITERIOS, VARIABLES E INDICADORES EN EL ANÁLISIS DE LA FRAGMENTACIÓN Y CONECTIVIDAD HÍDRICA EN HUMEDALES.

Con el ejercicio de documentación alrededor de la fragmentación y conectividad hídrica en humedales, se genera un soporte para la propuesta de criterios, variables e indicadores para el monitoreo y análisis en los humedales y planicies inundables (Tabla 2). Un paso previo y al inicio de la revisión de la literatura y lectura de documentos, fue el planteamiento de los criterios, variables e indicadores que serían aplicados en el ejercicio práctico. El planteamiento inicial, se corroboró y construyó apoyado en la literatura revisada.

Tabla 2 Criterios, Variables e Indicadores en el análisis de la conectividad y fragmentación hídrica en humedales.

CRITERIO	VARIABLE	INDICADOR
Dinámica de los cuerpos de agua en el Humedal	Presencia / Ausencia del agua superficial en el tiempo	Extensión del agua superficial en diferentes fechas
Flujos de entrada & salida de agua que alimentan y mantienen el humedal y sus cuerpos de agua. Cuenca aportante.	Flujos de agua que alimentan y mantienen el humedal	Nivel o caudal del río que irriga el humedal y determina su dinámica
Estado de la red hídrica y estructura del Humedal.	Presencia de estructuras que modifiquen la hidráulica del humedal y condiciones de humedad	Evidencia desde el SIG & Sensores Remotos, complementado con insumos desde lo social de modificaciones al sistema, cambios evidentes en la estructura y red hídrica del humedal. Metros lineales (o por hectárea) de estructuras construidas o drenajes modificados o pérdida de superficie de humedal. Intervenciones o



CRITERIO	VARIABLE	INDICADOR
		perturbaciones.

3.1. Documentación alrededor de los criterios, variables e indicadores propuestos para el estudio y monitoreo de la fragmentación hídrica en humedales.

3.1.1. Criterios

A. Dinámica de los cuerpos de agua en el Humedal

Los ecosistemas de humedal son sistemas abiertos, ya que intercambian materia y energía con su entorno y dependen de los procesos de intercambio para sobrevivir (IDEAM 1998). La dinámica fluvial de las inundaciones juega un papel importante en el mantenimiento de la diversidad de hábitats lénticos cada uno representado por una diversidad de etapas de sucesión (Ward et al. 1999).

Las dinámicas de los humedales y llanuras inundables son los cambios sucesivos en las relaciones estructurales y funcionales en el tiempo (IDEAM, 1998). Dinámicas de pulso de flujo, pulso de inundación y concepto de parches dinámicos (Figura 2) indican relaciones funcionales entre los ríos y el mosaico de vegetación en el área de inundación (Figura 1), en donde los patrones de diversidad resultan de las respuestas a disturbios de las comunidades y especies presentes en el sistema (Looy & Looy, 2007).

Para el análisis de parches y demás unidades del paisaje se pueden aplicar varios modelos por explorar, los programas mencionados están diseñados y aplicados en estudios para conectividad entre coberturas terrestres y no se conocen casos en la aplicación de la conectividad hídrica. Por ejemplo para métricas del paisaje el FRAGSTATS del Laboratorio de Ecología de la Universidad de Massachusetts o GUIDOS que a partir de una capa de bosque no bosque genera una serie de elementos entre corredores y núcleos, base del discurso de conectividad. Este último con sus siglas traduce, Interface Grafica para la Descripción de Objetos y Formas en las Imágenes, un programa con diferentes aplicaciones para análisis de patrones espaciales a partir de las formas y los objetos establecidos. En el mercado se encuentran gran número de programas similares, lo importante es contar con los datos y criterios para alimentar y poder construir modelos



geográficos que representen las conectividades que se quieren demostrar. No se desarrolla el tema de métricas del paisaje al considerarse una aplicación posterior hecha a las capas temáticas construidas, ejercicios de análisis particulares a cada estudio. En el presente caso no tuvo como objeto el análisis métrico de las capas de conectividad construidas, sino la conceptualización y espacialización de la conectividad hídrica superficial. El análisis métrico puede ser hecho posterior y con más datos de los organismos que se están moviendo y la estructura por donde se mueven, lo que demuestra la utilidad del aporte metodológico a las iniciativas de conocimiento y manejo de las dinámicas actuales de territorios de interés.

Las inundaciones y las migraciones entre canales de agua mantienen la biodiversidad de los sistemas lénticos, así como cuerpos de agua, ciénagas y humedales en las planicies de inundación, lo que crea mosaicos diversos de vegetación riparia a través del paisaje ribereño (Ward, Tockner, & Schiemer, 1999) o húmedo. En cuanto a la estructura y función de los ecosistemas acuáticos como humedales y ciénagas se encuentra el componente abiótico y el componente biótico, los cuales se tienen diferencias en la productividad. Esta es más elevada en ecosistemas acuáticos que en ecosistemas terrestres y se destacan sus productores principales como el fitoplancton (IDEAM, 1998). A su vez, la función en cuerpos de agua se encuentra asociada a las velocidades de tasas de cambio de los nutrientes o de los ciclos biogeoquímicos (IDEAM, 1998). La calidad de agua se vuelve importante de monitorear con sensores remotos y programas en campo al estar relacionadas con la conectividad y fragmentación hídrica.

La dinámica de los ecosistemas de humedal se encuentra regida por la función fundamental de regulación en los ríos, ya que entra agua dulce al sistema, se procesa a través de ellos la carga de materia, energía y nutrientes y luego se descarga a los océanos (Papa, Prigent, Durand, & Rossow, 2006). Como se puede observar en la Figura 1, los ecosistemas de humedal junto con las zonas riparias y ribereñas posee una dinámica especial donde todo se encuentra interconectado (Bolker et al., 2009).



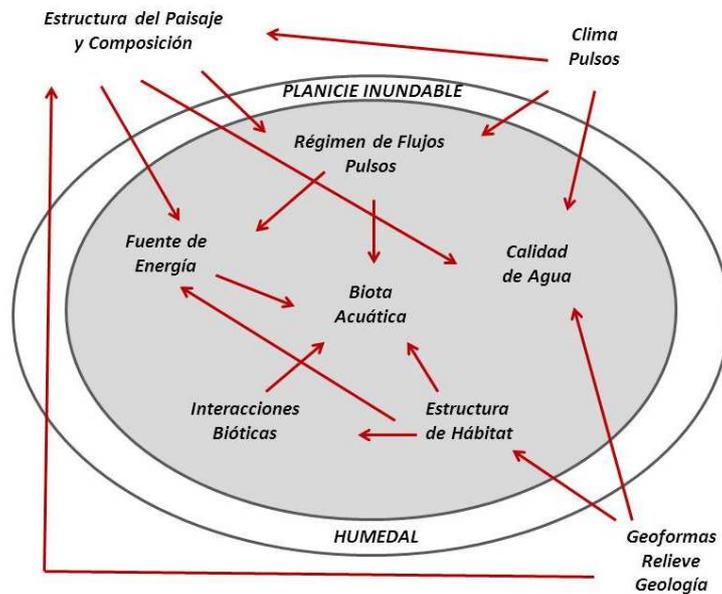


Figura 1 Flujos y relaciones en el humedal y planicie inundable. Adaptado de Brooks et al. 2009.

De la figura anterior se puede destacar como el clima rige sobre unos pulsos hídricos que determinan la dinámica en la planicie inundable y los humedales. Sobre la estructura del paisaje y composición biótica y abiótica también es determinante el clima. La geología, relieve y geoformas son igualmente aportantes y determinantes sobre el paisaje y composición. El clima, material parental y relieve ejercen a su vez determinantes sobre la calidad de agua, el régimen de flujos o pulsos, teniendo en cuenta como el agua que entra y sale de la unidad estudiada. Las unidades de paisaje y su composición también determinarían las fuentes de energía, las interacciones bióticas y biota como tal. En resumen es una red de relaciones ecológicas que se dan y caracterizan uno u otro tipo de ecosistema. Se puede destacar también como los pulsos y régimen de flujos de agua los resultantes del clima y al interior de la planicie inundable, son dinamizadores y determinantes en sus relaciones y sistemas emergentes. Al intervenir o perturbarse estas conexiones o flujos, se verá afectada una cadena de sucesos y relaciones ecológicas.

B. Flujos de entrada & salida de agua que alimentan y mantienen el humedal y sus cuerpos de agua. Cuenca aportante

Los ecosistemas hídricos de agua dulce incluyen todas las áreas inundables permanentes o estacionales como corrientes, zonas de inundación, pantanos, lagunas, ciénagas y humedales, que se encuentran conectados por medio de sistemas atmosféricos, terrestres y oceánicos a través del



ciclo hidrológico (Castello et al., 2013). La red se origina en las zonas riparias de pequeñas corrientes, que son inundadas de manera intermitente e irregular por lluvias y aguas de escorrentía, las cuales son influenciadas por canales de agua a través de intercambios hídricos, de nutrientes, y materia orgánica (Castello et al., 2013; Elith et al., 2006).

Los flujos de entrada y de salida, conocidos como variables externas, son el aporte agua, nutrientes, contaminantes o peces y diferentes organismos (Jorgensen, 1989) a el sistema estudiado. Adicionalmente en su interior, los cuerpos de agua al ser capaces de retener excesos de agua provenientes de escorrentía y lluvias periódicas son efectivos en almacenar el agua lluvia, lo que provee fuente de recarga de acuíferos superficiales y subterráneos (Papa et al., 2006) por medio de conectividades subsuperficiales y subterráneas. Los flujos de entrada y salida en un humedal son un reto establecer y medir, debido a la complejidad que se presenta en la realidad. La medición de estos flujos es igualmente costosa por lo que los flujos subsuperficiales son desconocidos. En este sentido el presente trabajo se limita a la conectividad hídrica superficial evidenciable con imágenes de sensores remotos disponibles. Con el seguimiento de los cuerpos de agua en el tiempo se puede establecer por donde fluye el agua y cuáles son los puntos de entrada y salida del sistema de interés.

Los humedales se alimentan de la estructura de los afluentes ya sea por el patrón de pozos o rápidos del tributario de corrientes, canales o islas de vegetación de un entrelazado río o zona de inundación, así como de meandros, remansos o corriente principal de un río (Wiens, 2002). Según (Robinson, Tockner, & Ward, 2002) los ecotonos y las canales de intercambio de materiales, organismos, energía y nutrientes en ecosistemas hídricos de agua dulce se encuentran condicionados por las dimensiones laterales, longitudinales y verticales. Cuando la dimensión de estos canales es reducida o aumentada, bloqueada o desviada, se presentan los cambios en las entradas y salidas de agua del humedal.

El factor que influye en mayor medida en el intercambio del humedal con su entorno, son las actividades antrópicas y la modificación de la estructura de la red de drenaje del humedal y planicies inundables. El clima que condiciona la presencia general del agua es un factor que influye en la productividad de un humedal (IDEAM, 1998) al afectar tanto la entrada de energía y agua, como por la hidrología de captación, la velocidad de desagüe o el transporte de nutrientes o sedimentos en el cuerpo de agua. Así mismo, la cantidad de precipitación es fundamental en las



entradas de nutrientes por la erosión del suelo, como también los caudales, ya que se encuentran directamente asociados a los aportes de las áreas de drenaje de las cuencas.

Los intercambios de entradas y salidas de agua a través del fondo, se encuentran relacionados con las propiedades del sustrato, como el tipo de sedimentos o la geología del lecho de roca que pocas veces aparecen en los mapas de cobertura, unidades de paisaje o levantamientos superficiales (Wiens, 2002). Esta es una de las principales limitaciones de los modelos cartográficos, que por lo general tienen en cuenta solo la superficie de la tierra y pueden desviar la atención a los procesos que suceden bajo esta.

C. Estado de la red hídrica y estructura del Humedal.

Evidenciar la modificación de la red hídrica y estructura del humedal es de los principales aspectos para tener en cuenta. El estado de la red de drenaje y el nivel de intervención sobre la estructura de ésta red de escorrentía, será determinante en las condiciones y dinámicas de los flujos, cuerpos de agua, humedal y la planicie inundable donde se dé. Al intervenir los humedales y su red hídrica, las funciones derivadas de éste se ven también afectadas. La provisión y relación de la gente con los humedales cambia.

Las principales funciones de los ecosistemas acuáticos, ya sean humedales, lagunas o ciénagas, son el abastecimiento y almacenamiento de agua, la mitigación de inundaciones, la recarga y descarga de acuíferos, la retención de nutrientes y sedimentos, así como la oferta de recursos hidrobiológicos, refugio de especies entre otros (IDEAM, 1998). Según RAMSAR las funciones de los ecosistemas acuáticos como lagunas y humedales se clasifican como regulador de nutrientes, foco para la conservación genética, tratamiento de aguas, zonas de anidación de peces, productividad, prevención de desastres como inundaciones, protección costera, almacenamiento de energía y carbono, hábitat de fauna silvestre, de importancia económica y social para comunidades aledañas (Hollis, Holland, Maltby, & Larson, 1988)

En la actualidad, los humedales son receptores de la contaminación generada por el hombre, proveniente ya sea de sistemas productivos o grandes urbes. Según Ward y colaboradores (1999) la regulación de los ríos altera los regímenes de perturbaciones naturales que mantienen una diversidad de etapas de sucesión y los altos niveles de conectividad a través del paisaje fluvial, lo que resulta en una pérdida de la heterogeneidad del hábitat y la biodiversidad.



Con la aplicación de sensores remotos, se puede evidenciar las intervenciones y perturbaciones sobre la red de drenaje. El ejercicio debe estar complementado por los insumos del orden social que relaten como ha sido el proceso de intervención y cuál ha sido el resultado de las perturbaciones.

En síntesis el resultado esperado de aplicar este criterio en el análisis geográfico, es identificar donde se han dado las intervenciones que han cambiado la dinámica natural o estado natural del comportamiento del humedal y sus cuerpos de agua. En este sentido al identificar dónde y cómo se han dado tales intervenciones que han modificado la dinámica del humedal y están afectando a la biodiversidad, la productividad y el bienestar de la gente, se puede proceder a diseñar una solución para mejorar la situación.

3.1.2. Variables

A. Presencia / Ausencia del agua superficial en el tiempo.

La estacionalidad en los trópicos se ve reflejada en temporadas de lluvias y de sequía. Con el inicio de la estación seca, las inundaciones disminuyen, por lo tanto la llanura de inundación se convierte en paisaje terrestre dejando remanentes de lagunas o ciénagas, así como remanentes aislados conectados por pequeños meandros que alimentan el sistema fluvial (Woolsey et al., 2007). La red de dinámicas fluviales mantiene la presencia o ausencia del agua superficial en el tiempo, entre las corrientes principales del recurso hídrico hacia las planicies de inundación (Amoros & Roux en Wiens 2002) por lo que la conectividad del ecosistema es un fenómeno estacional sujeto a las ocurrencias y magnitudes de inundación (Wiens, 2002). En este sentido se presenta el concepto de conectividad hídrica superficial, como dinámico y en función del nivel de agua y momento climático.

En el trópico, la topografía es el predictor más importante en la conversión y transformación de sistemas cenagosos y humedales (Daniels & Cumming, 2008). Adicionalmente, la estacionalidad hidrológica, es decir, temporadas secas y de lluvia se encuentran asociadas a la presencia y ausencia de agua superficial en el tiempo, como también la biomasa de algas, la conductividad, la turbidez, la alcalinidad y la concentración total de sólidos, demostrado en un estudio realizado en la cuenca del Orinoco por Montoya y colaboradores (Montoya, Roelke, Winemiller, Cotner, & Snider, 2006)



Debido a la conectividad hidrológica por las conexiones que genera entre sistemas superficiales y subterráneos, tanto las características físicas como las bióticas del paisaje influyen en el mantenimiento del humedal, así como la geología, la morfometría, las coberturas y los mismos humedales (Martin & Soranno, 2006). Para futuras aplicaciones más detalladas e integrales para el monitoreo de conectividad y fragmentación hídrica se recomienda incluir el análisis de los flujos subsuperficiales y subterráneos que mantienen los humedales.

B. Flujos de agua que alimentan y mantienen el humedal.

Como se describe en el punto 3.1.1.B., los servicios derivados del funcionamiento natural de los humedales se mantienen en los complejos de humedales, al afectarse los humedales, se ven afectados los servicios ecosistémicos asociados. Si la estructura que lleva el agua al humedal se ve afectada, sobre todo por intervenciones e infraestructura construida en los canales y líneas de flujo, se verán afectados los humedales receptores de los sistemas intervenidos. Es importante entonces considerar los flujos de agua al interior y que alimentan y mantienen el humedal, según la evaluación de Ecosistemas del Milenio (2005) los humedales proveen gran número de servicios ecosistémicos como regulación de inundaciones, producción de peces y fibras, contribución de suministros de agua, protección costera, purificación de agua y actividades recreacionales.

Con relación a los flujos que mantienen los sistemas de humedales se encuentran dos tipos: los sistemas de recarga que son aquellos provenientes de aguas que se mueven cuesta abajo, es decir provenientes de la parte alta de la cuenca y proveen la filtración de agua cuesta abajo hacia acuíferos subyacentes, mientras que los sistemas de descarga o alimentación, ocurren cuando los niveles de agua subterránea son los suficientemente altos para llenar el humedal (Golden et al., 2014). Además, existen dos tipos de regímenes de flujo en los sistemas de humedales, los multidireccionales o bidireccionales. El primero es aquel sistema que involucra agua entrando a través de múltiples flujos como tierra, superficial, subterráneo o subsuperficial, así como cualquier flujo a través o fuera del sistema en cualquier dirección o proveniente de inundaciones, recarga de acuíferos, agua saturada o flujos superficiales; el segundo posee capas impermeables en los suelos (acrisoles) relativamente desconectadas de las aguas subterráneas pero únicamente con flujos en dos direcciones solo a través de la superficie terrestre o flujos del subsuelo poco profundos (Golden et al., 2014). Dependiendo de las características se aplican diferentes modelos hidrológicos diseñados en el contexto de esas diferencias. Existen gran número de modelos



disponibles que se consideran fuera del objeto de estudio al describir procesos por debajo de la superficie de la tierra.

En la mayoría de los casos los humedales no son sistemas aislados sino que hace parte de dinámicos hábitats con complicadas conexiones hidrológicas, es decir, procesos hidrológicos de diferentes tipos, así como el flujo de agua produce vínculos temporales a los largo de los cuerpos de agua creando redes dinámicas hídricas por lo que para la recuperación y restauración de ecosistemas de humedales es imposible manejar tan solo una unidad ecológica, sino que se debe tener en cuenta la red ecosistémica asociada (Mao & Cui, 2012). Abordar tales complejidades con instrumentación y monitoreo es costoso y requiere decisión política e inversión.

C. Presencia de estructuras que modifiquen la hidráulica del humedal.

A nivel mundial, la principal fuente de estrés de ríos y sistemas cenagosos es la construcción de presas y embalses (Gehrke, Gilligan, & Barwick, 2002) ya que afectan el flujo natural de los cuerpos de agua impactando a las especies que lo habitan, transportan gran número de sedimentos y contaminantes, impactan el pulso y la calidad de agua y reducen la migración natural de peces (Søndergaard & Jeppesen, 2007).

La presencia de estructuras que modifican los humedales puede estar condicionada por generadores directos o indirectos. El primero es aquel que influye de forma inequívoca en los procesos de los ecosistemas y que, por lo tanto puede ser identificado y medido con distintos niveles de precisión, es decir generadores directos importantes como la modificación de hábitats y conversión del uso de la tierra para efectos de agricultura o urbanización, el cambio climático, las especies invasoras extrañas, la sobreexplotación y la contaminación (Daniels & Cumming, 2008). La extracción de aguas superficiales o subterráneas y cualquier tipo de alteración hídrica generando cambios poblacionales en especies dependientes a los sistemas cenagosos (Daniels & Cumming, 2008). El segundo, opera mediante la alteración del nivel o del ritmo de cambio de uno o de más generadores directos, entre otros, los cambios de población, la actividad económica, la tecnología y factores socio-políticos, culturales (Etter et al., 2006).

Las carreteras y los represamientos entre otras estructuras de ingeniería afectan la conectividad corriente arriba en sistemas cenagosos y ribereños, alterando o bloqueando la migración de



especies, reteniendo nutrientes y materiales así como afectando la conectividad lateral de planicies y disminuyendo los pulsos de inundación (Januchowski-Hartley et al., 2013).

Las intervenciones cotidianas en las fincas como diques, terraplenes, jagüeyes y represamientos alteran los flujos de agua. De la misma manera la construcción de estructuras para la canalización y drenaje, modifican los flujos de agua y las relaciones naturales de estas porciones de la tierra.

3.1.3. Indicadores

A. Extensión del agua superficial en diferentes fechas

Aplicaciones de sensores remotos para determinar los cambios y las dinámicas de los cuerpos de agua se pueden encontrar en el trabajo de los siguientes autores, (Kamlum K.U. Phua M.H, 2010; Ke et al., 2010; Seto & Fragkias, 2007). Mita y colaboradores (Mita et al., 2007) utilizaron el índice de integridad de comunidad de plantas para evaluar las condiciones del humedal con la ayuda de imágenes de sensores remotos. A su vez, en este estudio se desarrolló el modelo de análisis de condición de paisaje de humedal (LWCAM) para determinar la extensión del agua superficial en el tiempo y evidenciaron asociaciones entre patrones del paisaje y la condición del humedal. La respuesta hídrica en el tiempo se encuentra influenciada por un número de características de captación y de caudal que incluyen pendiente, conectividad, almacenamiento, transporte y forma del canal (Abell et al., 2008).

Para el concepto de conectividad hídrica superficial que se presenta en este producto, se puede ejemplificar y definir con la siguiente Figura 2. En esta se muestran los parches dinámicos de agua que quedan aislados en las partes bajas de los basines y canales cuando el nivel del agua desciende. A medida que aumenta el nivel de agua, se llenan espacios, líneas y franjas, que comunican e integran cuerpos que antes estaban separados en una sola unidad. Se presenta entonces una conectividad por pixel en función del nivel de agua registrado y la frecuencia de este en las fechas estudiadas. Entre mayor frecuencia y permanencia en el tiempo, se asigna una mayor conectividad hídrica, la menor conectividad hídrica se asigna a las zonas donde el agua raramente cubre la superficie, por lo que raramente está conectada esta porción con el resto de unidades con mayor valor de conectividad.



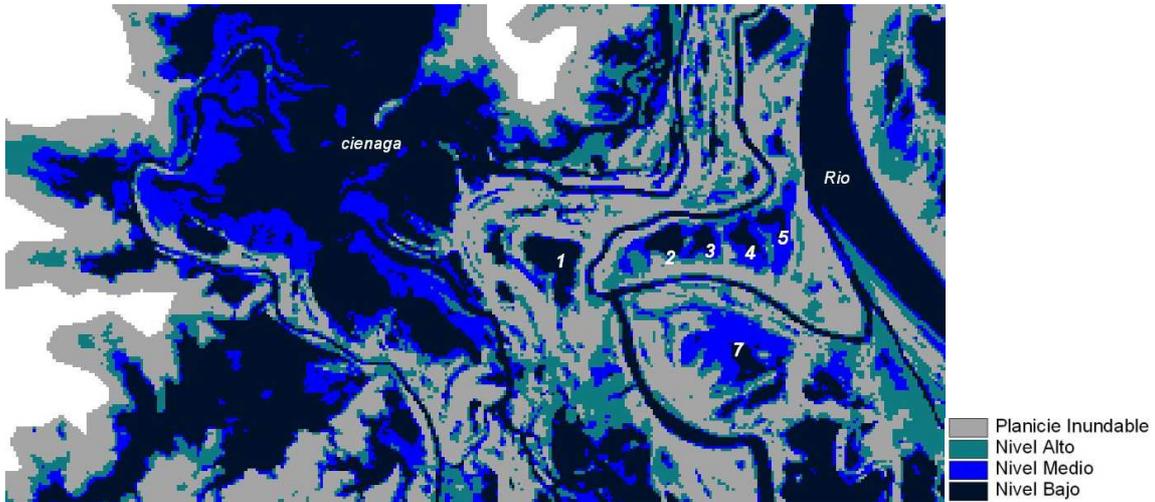


Figura 2 Muestra de diferentes niveles de agua en una planicie inundable.

En la práctica el concepto de dinámico o en movimiento, se podría aplicar en la figura anterior, donde se escogen 7 parches que quedan aislados cuando el nivel de agua está bajo, o sea que solo queda agua superficial en el fondo de la planicie o en sus partes más profundas que son los basines, sobre todo los bajos y los canales de flujo permanente como río y caños. Los parches 2 a 5 son bastante cercanos y se comunican cuando el nivel de agua aumenta. Los parches 1 y 7, un poco más alejados también pueden comunicarse cuando el nivel del agua aumenta, como también se comunican con los brazos del río que los alimentan. En el parche 7 es claro el canal de comunicación que tiene con un brazo del Magdalena al norte, al sur tiene otros parches y líneas que comunican con otro brazo al sur. En crecientes extremas, todas estas unidades aisladas y conectoras se pueden volver un solo cuerpo de agua.

Como se observara en la metodología y las ventanas, una manera de diferenciar las coberturas es haciendo clasificaciones de las imágenes digitales, así se separan las superficies de agua de las demás. Además de clasificaciones supervisadas y no supervisadas, otra manera para determinar la ocupación del agua en el territorio, es calculando el NDWI. El índice normalizado diferencial de agua – NDWI *Normalized Difference Water Index*, se calcula usando las longitudes de onda correspondientes a la roja y verde con el infrarrojo cercano. De esta manera se diferencian las coberturas terrestres, con vegetación y suelo descubierto de los cuerpos de agua y zonas



húmedas, por sus propiedades físicas y manera de reflejar la luz. Para identificar los cuerpos de agua ofrece un buen resultado pero exige experticia y tiempo de procesamiento.

D. Evidencia desde lo social de modificaciones al sistema, cambios evidentes en la estructura y red hídrica del humedal.

Este indicador es clave al llenar vacíos de datos y poder orientar interpretaciones de lo que ha sucedido en la localidad con respecto a la intervención de la planicie inundable. Estos vacíos de datos se presentan al basar el análisis geográfico con imágenes de sensores remotos que solo muestran parte de la realidad a cierta escala en unos momentos en el tiempo. Los insumos sociales ofrecen la posibilidad de incluir datos ecológicos, biológicos y de eventos extremos, entre otros, que no están disponibles de ninguna otra manera.

La construcción de carreteras y vías asociadas así como presencia humana representa uno de los mayores transformadores del paisaje, tanto hídrico como terrestre (Gibbes, Southworth, & Keys, 2009; T Findlay & Bourdages, 2000) lo que genera gran pérdida de biodiversidad silvestre y servicios ecosistémicos. Según Findaly & Bourdages (2000) existen efectos negativos para plantas vasculares, aves y herpetos debido a la construcción y densidad de carreteras y los cambios en la estructura poblacional de los taxones puede ser detectada en menos de ocho años. Los mismos autores sugieren que si la construcción de carreteras en áreas adyacentes a humedales y cuerpos de agua reduce el tamaño poblacional de las especies, entonces en cierto punto la especie disminuirá su tamaño por debajo del nivel que puede detectarse, es decir la especie estará ausente o posiblemente extinta localmente.

En la mayoría de los casos los pasos a seguir en la modificación al sistema de humedal o de los cuerpos y corrientes de agua asociados son, primero, la rápida acumulación de sedimento en el cuerpo de agua, seguido de una rápida conversión del humedal a terreno cubierto rodeado de agua junto con el incremento de material suspendido en el agua y por último, el reclamo por parte de la sociedad de áreas para uso agrícola y agropecuario (Søndergaard & Jeppesen 2007) y urbanístico. “La determinación de la producción de sedimentos con origen en la cuenca es uno de los índices que puede ilustrar el grado de los procesos de degradación por efectos de la deforestación y erosión, principalmente. Sin embargo, la cuantificación real de esta producción y



sobretudo la estimación de lo que obedece a procesos naturales aún no está determinada en el país (SIAC, 2001). Esto suma a la necesidad de monitorear la calidad de agua de los humedales y la que ingresa a estos sistemas.

Según Brown & Vivas (Mack, 2006) el LDI o Índice de desarrollo del paisaje puede ser utilizado como una herramienta de valoración de las condición del humedal, así como un gradiente de disturbio humano; este utiliza información y datos de la tierra por medio de sensores remotos para el análisis de la condición del humedal (Mack, 2006). Adicionalmente, según Stanford y colaboradores (Ward, Malard, & Tockner, 2002) sugieren que la regulación del flujo de agua por las represas truncan el transporte de sedimentos y grandes escombros corriente abajo reduciendo la frecuencia y severidad de eventos de inundación.

El uso agropecuario y agrícola de la tierra degradada por el incremento de caudales a los cuerpos de agua de contaminantes, sedimentos, flujos alternos, nutrientes, insecticidas y pesticidas asociadas a esta actividad por lo que las condiciones del caudal en áreas agrícolas son bajas en calidad de hábitat. La transformación extensa de hábitats ha resultado en el ensanchamiento de canales, generando el transporte eficiente del agua río abajo así como el transporte de sedimentos, sin embargo, la conectividad lateral y longitudinal se incrementa teniendo en cuenta la discontinuidad del sistema (Abell et al., 2008).

E. Metros lineales (o por hectárea) de estructuras construidas o drenajes modificados o pérdida de superficie de humedal

Turner y Rao (R., 1990) pudieron constatar luego de un estudio los impactos hidrológicos resultantes de la construcción de canales y la ruina de las orillas afectando de manera severa la conexión entre los cuerpos de agua en la planicie inundable, siendo el causante directo de la pérdida de extensión de humedales.

Esta medición de intervención sirve para mostrar cómo ha sido la evolución e intervención en determinada zona a medida que pasa el tiempo. Por ejemplo, para una llanura inundable en su estado original no presentaba intervenciones o construcciones de diques evidentes. En una segunda fecha ya presenta unas intervenciones en los bordes del cuerpo de agua principal, donde se observan prolongaciones de diques. En una tercera fecha la planicie inundable se observa con una red con mayor extensión de diques. A medida que pasa el tiempo aumentan los metros



lineales (cuadrados y cúbicos) que ocupan los diques en la planicie. De la misma manera se puede calcular con el perímetro de diques, la superficie que encierra en la planicie y como aumenta está en el tiempo. Esta cantidad es elemento base que muestra el monitoreo y evolución del paisaje e intervención.

F. Nivel o caudal del río que irriga el humedal y determina su dinámica

Los ríos son mosaicos ecosistémicos que albergan diferentes hábitats y gradientes ambientales debido a su alta conectividad y complejidad espacial. A su vez, la integridad ecológica, las condiciones del caudal y la salud del río son términos que describen el estado de los ecosistemas acuáticos y su respuesta a la influencia humana (Palmer et al., 2005)

En un estudio realizado por Brooks y colaboradores (Bolker et al., 2009) se desarrolló un índice denominado SWR (Stream-Wetland-Riparian) de rápida valoración, el cual demuestra la correlación entre indicadores biológicos de las corrientes de agua y su contribución a los humedales dentro de una cuenca. Este índice puede ser utilizado para la valoración de cuencas de acuerdo a su condición relativa, es decir, puede ser usado como indicador de la magnitud de variación dentro de una cuenca para así identificar problemas y degradación dentro de la misma.

Numerosos estudios estadísticos indican las asociaciones entre el uso y las medidas del caudal del río a través de comparaciones de varios sitios con modelos empíricos y todos ellos sugieren la importancia del paisaje que rodea el humedal y las actividades humanas que impactan la integridad ecológica del caudal (Palmer et al., 2005).

Este indicador medido en estaciones limnigráficas o limnimétricas, es base para dar contexto a las imágenes de satélite y las extensiones de cuerpos de agua derivados de estas. Los niveles de los ríos cercanos a los humedales de interés, dan cuenta del potencial de agua al que está expuesto un humedal por su cuenca aportante. Es decir, si se registran niveles altos en los ríos, es de esperarse que los humedales y cuerpos de agua asociados se encuentren en niveles altos y estén recibiendo aportes de agua y nutrientes de estos. En épocas de sequía los ríos bajan de nivel y los cuerpos de agua de los humedales pueden estar aportando agua a los ríos, para evidenciar estos flujos es necesario establecer una instrumentación específica para medir y monitorear estas relaciones.



G. Construcción de infraestructura, modificación & obstrucción de flujos de agua.

Las actividades humanas que alteran la conectividad hídrica en sistemas hídricos de agua dulce pueden ser de dos formas, la primera alterando los patrones naturales hidrológicos de la planicie o llanura de inundación y segundo, a través de cambios en el uso de la tierra a través de la construcción de diques, embalses, represas y cualquier estructura de ingeniería en el área de desborde (Thoms, 2003).

Entre las perturbaciones humanas que alteran la conectividad hidrológica se encuentran, extracción de agua, regulación de flujo asociada, avalanchas, incendios, inundaciones, procesos de erosión, procesos de desertización, construcción de vías, túneles, ductos, puentes, puertos, construcción de presas y embalses, explotación de recursos: carbón, petróleo, gas, bosques, fauna, flora, aguas continentales y marinas, establecimiento de monocultivos: plantaciones forestales, palma aceitera, banano, café, cacao, caucho, deforestación para establecimiento de hatos (ganadería de leche o de doble propósito) y potreros (ganadería extensiva después de procesos de tala y quema) o expansión de cultivos ilícitos.

Adicionalmente, el desarrollo humano en riberas y orillas de cuerpos de agua conlleva a la pérdida de hábitats litorales para especies macrófitas, raizales, litorales de caña y estructuras como restos de madera y sedimentos indispensables ya que sirven de refugios de peces (Søndergaard & Jeppesen, 2007). Un ejercicio interesante es contrastar los hábitats usados por biodiversidad local y potencialmente usable, por tortugas por ejemplo para anidar en los playones vs el uso por cultivos temporales.

3.2. Generalidades de los efectos de las perturbaciones y limitaciones en el monitoreo en humedales en el contexto Colombiano

Las intervenciones y perturbaciones son evidentes en los humedales de las diferentes regiones del país. Los efectos o impactos de las actividades humanas determinan las condiciones sociales y ambientales de cada localidad y región. Una de las mayores limitaciones se identifica como la disponibilidad de recursos e inversión destinada a los procesos de conocimiento y monitoreo del territorio en sus diferentes jurisdicciones. En general, la Tabla 3 presenta algunas perturbaciones típicas en y alrededor de los humedales y planicies inundables, a los que se asocian también unos efectos generalizados que suceden en estas áreas. Se pueden plantear estrategias de monitoreo



para la totalidad de procesos pero la limitación inicial es de carácter económico, al ser los recursos escasos y limitados, solo permiten atender parte de la necesidad.

En las ventanas de análisis se observan todas las perturbaciones referenciadas en la Tabla 3 menos el primer caso de represamiento. Por ejemplo en Zapatosa se observa la obstrucción de la entrada de agua del Río Magdalena, lo que ha tenido seguramente efectos en su calidad de agua y productividad, hipótesis por confirmar con datos de campo. Para la Ciénaga de La Virgen, el cambio de flujo con el mar ha tenido efectos en calidad de agua y productividad, pendiente por estudiar en campo. El caso de La Virgen, también tiene perturbaciones cuando se construyen canales de drenaje, cuando se aumenta la entrada de agua del humedal con La Bocana, cuando se construyen diques y canales.

Tabla 3 Generalidad de efectos de las perturbaciones en los humedales.

Perturbaciones en el humedal	Efectos de las perturbaciones en el humedal
Cuando se obstruye la salida de agua del humedal, se genera un represamiento.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumenta el nivel del agua 2. Aumenta el espejo de agua 3. Modifica el área inundable y condiciones freáticas 4. Se pierde la conectividad 5. Pierde su dinámica y ciclo natural de inundación
Cuando se obstruye la entrada de agua del humedal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Disminuye el cuerpo de agua 2. Disminuye la irrigación y aumenta la tendencia a secarse 3. Disminuye la productividad al restringir la entrada de sedimentos y nutrientes 4. Se pierde la conectividad 5. Favorece el cambio del uso del suelo y la transformación de la cobertura natural 6. Pierde su dinámica y ciclo natural de inundación 7. Cambia la calidad de agua
Cuando se construyen canales de drenaje	<ol style="list-style-type: none"> 1. El humedal tiende a secarse al no poder retener el agua 2. Favorece la salida de agua 3. Favorece el cambio del uso del suelo y la transformación de la cobertura natural
Cuando aumenta la entrada de agua al humedal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumenta el ingreso de sedimento y acelera la colmatación 2. Cambia la calidad del agua
Cuando se construyen diques	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evita el ingreso de la crecida hasta el punto que sobrepasa el dique, causando una inundación y represamiento por el mismo dique 2. Favorece el cambio del uso del suelo y la



Perturbaciones en el humedal	Efectos de las perturbaciones en el humedal
Cuando se canaliza y profundizan drenajes	transformación de la cobertura natural 1. Impide el desborde e irrigación al humedal 2. Favorece la desecación del humedal 3. Pierde la conexión entre humedal y sus aportes de agua & nutrientes

En segundo lugar, en cuanto a las limitaciones técnicas de la aplicación de imágenes de sensores remotos, es que solo ofrecen una visión parcial de la realidad, restringido al momento de toma de la imagen, condiciones hidrológicas, nubosidad y resolución entre otras. Teniendo esto en cuenta los productos derivados de datos parciales solo pueden ofrecer información parcial. Son de gran valor los productos resultados de análisis geográficos, pero no se puede olvidar que se deben complementar con otras perspectivas y datos. Al considerarse procesos de interpretación, estos pueden tener cierto rango de error dependiendo de la experticia de los profesionales.

La actualización y constante retroalimentación de modelos geográficos es determinante en la calidad y aplicabilidad que tenga su uso en el conocimiento de las dinámicas de los humedales de interés, estudiados a través de la caracterización y monitoreo. En este sentido al conocer los sistemas estudiados se pueden tomar mejores decisiones sobre su manejo.

Como los análisis y monitoreo se basan en datos específicos, la disponibilidad, acceso oportuno y calidad limitan los productos y resultados esperados. La mayoría de cuerpos de agua como ciénagas y caños no están siendo monitoreados, en general los datos oficiales del IDEAM se registran en estaciones en los ríos principales. La instrumentación diseñada para registrar dinámicas ecológicas todavía no ha sido implementada en el país. A su vez las corporaciones autónomas no tienen estas líneas de trabajo e investigación en sus planes de acción. Al no estar planteadas tales estrategias de monitoreo en los planes de acción, las corporaciones quedan con esa restricción.

Las limitaciones básicas del estudio con SIG & SR de conectividad y fragmentación hídrica superficial consisten en:

1. Al ser un estudio dependiente de datos, el no contar o disponer oportunamente de estos, limita el desarrollo del análisis.



2. Los datos entonces deben mostrar los diferentes escenarios probables, en este caso de presencia de agua superficial en diferentes niveles e intervenciones sobre zonas de drenaje, para que queden reflejados en las capas temáticas construidas. La ausencia de estos datos limita la representación de la realidad en los modelos geográficos construidos.
3. Se corre el riesgo de aceptar de manera preliminar los resultados cartográficos, cuando deben ser objeto de monitoreo constante, actualización, verificación y validación con datos de campo complementarios, lo cual genera unos costos elevados que no están en los planes de acción de las CAR. Al no haber recursos destinados, limita la posibilidad desarrollo.
4. Al ser las imágenes de sensores remotos los insumos básicos para la construcción de las capas temáticas, solo ofrecen parte de la realidad superficial registrada en las escenas. El no complementar el análisis con datos de campo sean mediciones o percepciones limitan el análisis.
5. La falta de desarrollo teórico y práctico limita el trabajo en este sentido al ser un concepto nuevo y en construcción. Personal calificado puede ser otra limitación al querer emprender una iniciativa en este sentido a nivel nacional.

4. BASE DE DATOS GEOGRAFICA QUE CUMPLA CON LOS CRITERIOS DEFINIDOS PARA CORRER LOS ALGORITMOS Y/O APLICACIONES CON LOS CUALES CONSTRUIR INDICADORES Y DEMAS INFORMACION ESPACIAL QUE PERMITA LA CARACTERIZACION, ANALISIS Y MONITOREO DE LA FRAGMENTACION EN HUMEDALES.

La base de datos geográfica compilada para correr los algoritmos o procedimientos para las aplicaciones en los casos o ventanas, consta básicamente de las imágenes Landsat NASA, una fotografía aérea IGAC para la ventana de la Ciénaga de La Virgen y unas imágenes COSMOS cortesía del IGAC para las ventanas de Río Ariporo y Zapatosa.

Como insumo principal, las imágenes de sensores remotos como fotografías aéreas e imágenes de satélite ópticas y de radar, ofrecen datos contenidos en píxeles, producto del reflejo de la superficie de la tierra captada por el sensor en diferentes longitudes de onda y frecuencias.



La base de datos geográfica agrupada permite en un primer acercamiento; caracterizar, analizar y monitorear, la fragmentación y conectividad hídrica superficial en humedales. Alimentar la base de datos con más escenas en diferentes momentos, e incluir o retroalimentar el análisis, es la base del monitoreo. Como se observa en los resultados de las ventanas, el procesamiento de la base de datos en el análisis de la conectividad hídrica, resalta situaciones de cambio que vale la pena detallar y caracterizar. Al establecer zonas de interés, se puede volver a mirar la base de datos geográfica de imágenes de sensores remotos con diferente perspectiva y seguir en el proceso de análisis.

Los criterios con los que debe cumplir la base de datos geográfica elaborada, se basan en la disponibilidad de datos y el acceso oportuno a estos. La calidad de los datos en cuanto a precisión, resolución temporal y espacial, también deben ser criterios para la selección de los datos insumo para los ejercicios de conectividad y fragmentación hídrica en humedales. Los datos deben reflejar las diferentes dinámicas, condiciones o momentos hidrológicos comunes en la localidad, que todas las condiciones ambientales o niveles de agua para este caso, estén representados en la serie o base organizada. Los datos deben poder usarse para responder adecuada y satisfactoriamente los interrogantes planteados por la comunidad, funcionarios públicos y especialistas, en cuanto a hechos y problemas ambientales de interés.

4.1. Imágenes de satélite LANDSAT NASA

Las imágenes utilizadas como se estableció en el diagnóstico de datos potencialmente útiles para la aplicación de la metodología propuesta, fueron del satélite Landsat de la NASA. Como principal criterio de utilidad se estableció que la escena en el área de estudio este despejada o con muy pocas nubes y sombras que se puedan corregir manualmente. En segundo lugar, que ofrezcan una escena donde se registre la presencia del agua superficial en diferentes extensiones, producto de diferentes momentos hidrológicos o climáticos y de intervención o perturbación.

4.1.1. Para la ventana de la zona Río Ariporo

Para la venta de la zona Río Ariporo, se preseleccionaron 7 imágenes y se desecharon 2 por la presencia excesiva de nubes y sombras en el área de estudio (

Figura 3 y Tabla 4). Con las imágenes seleccionadas se cubren en general los diferentes niveles presentes detectados en las series analizadas.



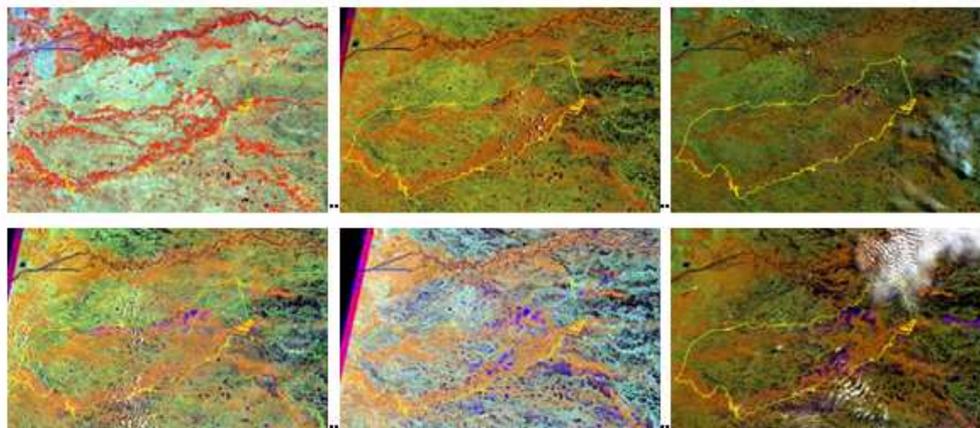


Figura 3 Imágenes Landsat TM y ETM 6-56 NASA.

Como se observa en la Tabla 4, se estima un nivel de agua observado en las imágenes utilizadas analizadas en su contexto. La imagen de 1996 representa el nivel más alto y las de 1990 y 2001 el nivel de agua más bajo.

Tabla 4 Imágenes Landsat NASA, zona Río Ariporo

LANDSAT	Código ID Imagen	Fecha	Nivel Observado
TM 6-56	LT50060561990001CPE07	01-Ene-90	bajo
	LT50060561996226XXX02	13-Ago-96	alto
	LT50060561999250XXX02	07-Sep-99	medio
ETM 6-56	LE70060562000165EDC00	13-Jun-00	medio
	LE70060562001023AGS00	23-Ene-01	bajo

4.1.2. Para la ventana de la Ciénaga de Zapatos

Para la venta de la zona Río Ariporo, se preseleccionaron 7 imágenes y se desecharon 2 por la presencia excesiva de nubes y sombras en el área de estudio (

Figura 4 y Tabla 4). Con las imágenes seleccionadas se cubren en general los diferentes niveles presentes detectados en las series analizadas.



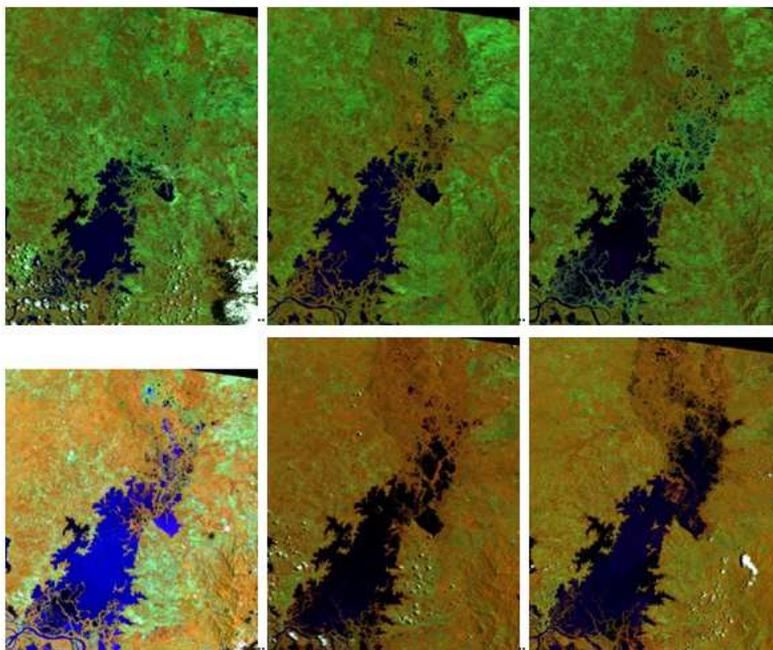


Figura 4 Imágenes Landsat TM 854 NASA composición RGB 453.

Como se observa en la Tabla 5 se estima un nivel de agua observado en las imágenes utilizadas analizadas en su contexto. La imagen de 1997 representa el nivel más alto y las de 1986 y 1989 el nivel de agua más bajo.

Tabla 5 Imágenes Landsat NASA, Ciénaga de Zapatoasa.

LANDSAT	Código ID Imagen	Fecha	Nivel Observado
TM 8-54	LT50080541986068XXX03	09-Mar-86	medio bajo
	LT40080541989196XXX08	15-Jul-89	medio bajo
	LT50080541999200XXX01	19-Jul-99	medio alto
	LT50080542001029XXX01	29-Ene-01	medio
	LT50080542007254CHM00	11-Sep-07	muy alto

4.1.3. Para la ventana de la Ciénaga de La Virgen

Para la venta de la Ciénaga de La Virgen, se utilizó una imagen Landsat OLI reciente para el año 2014, con las combinaciones de RGB-564 y la banda Pancromática con 15 metros de resolución por pixel para la interpretación de las intervenciones actuales, entre 1991 y 2014. Como el efecto de la Bocana evita la variación significativa de los niveles de la ciénaga, se priorizo sobre el análisis



de intervención de la planicie y cuerpos de agua por lo que se seleccionaron imágenes que facilitarían la evidencia de estas perturbaciones.

Tabla 6 Imagen Landsat NASA Ciénaga de La Virgen.

LANDSAT	Código ID Imagen	Fecha
OLI 9-53	LC80090532014024LGN00	24-jan-2014

4.2. Fotografías aéreas IGAC.

Como complemento para el detalle de intervención en la Ciénaga de La Virgen se utilizó una fotografía aérea IGAC número 172, del vuelo C – 2469 del año de 1991. Para una visión completa del estado original y actual el ideal es contar con las escenas más antiguas disponibles. Para la Ciénaga de la Virgen, se identificaron en el IGAC fotografías de los años 40 y 50 que ofrecen la posibilidad de reconstruir este paisaje y modelo de uso de la tierra e intervención para tener como base del monitoreo o estado inicial del área de interés. Esta última serie de fotos antiguas no tuvo un acceso oportuno y no pudo ser incluida en el estudio. Se recalca la importancia del acceso oportuno a las bases de datos oficiales disponibles y potencialmente útiles para el análisis y monitoreo de la fragmentación y conectividad hídrica.

Tabla 7 Fotografía aérea IGAC, Ciénaga de La Virgen.

Vuelo	Numero de Foto	Año	Escala Aproximada
C-2469	0172	1991	1:40.000

4.3. Imágenes de radar COSMO SKYMED

Como insumo de otro componente en la aplicación de metodologías para estudiar la conectividad hídrica, las imágenes de radar COSMO SKYMED fueron obtenidas por medio del convenio que tiene el IAVh con el IGAC. Por medio del IGAC, las corporaciones autónomas, gobernaciones y alcaldías, hasta fundaciones a través de estas entidades, puedes gestionar acceso a la base de datos de imágenes de sensores remotos del país llamado Banco Nacional de Imágenes. A través de la página web del IGAC se puede consultar el contenido de la base de datos, la cobertura de las imágenes y una vista previa general para observar su nubosidad, establecer su utilidad y selección para solicitud.



Estas imágenes no fueron identificadas en el diagnóstico y tampoco se incluyeron en la base de datos geográfica al ser parte del SIG del IAvH y estar disponibles en la última fase del trabajo, posterior al diagnóstico. Se utilizan para contextualizar los resultados y detectar intervenciones recientes ya que son del año 2012 y registran de otra manera la superficie de la tierra que los sensores ópticos.

4.3.1. Para la ventana de la Zona Río Ariporo

Para la venta de la zona del Río Ariporo se utilizó 1 imagen de radar COSMO SKYMED.

csks2_scs_b_hi_17_hh_rd_sf_20120524221906_20120524221912_orto

4.3.2. Para la ventana de la Ciénaga de Zapatosa

Para la venta de la Ciénaga de Zapatosa se utilizaron cuatro imágenes de radar COSMO SKYMED.

csks1_scs_b_hi_09_hh_rd_sf_20120602223614_20120602223621_orto

csks1_scs_b_hi_09_hh_rd_sf_20120602223619_20120602223626_orto

CSKS4_SCS_B_HI_17_HH_RD_SF_20120603223024_20120603223030_ORTO

CSKS4_SCS_B_HI_17_HH_RD_SF_20120603223019_20120603223025_ORTO

4.4. Datos de nivel o caudal de los cuerpos de agua

Para las áreas ventanas del Río Ariporo y la Ciénaga de Zapatosa, se identificaron y seleccionaron las estaciones IDEAM con datos relevantes de nivel y caudal para el estudio del comportamiento de los cuerpos de agua aportantes a los humedales y planicies inundables de interés. Desafortunadamente por trámites oficiales las bases de datos hidrológicas no fueron obtenidas a tiempo para incluir en el estudio. En este caso el criterio inicial del acceso de manera oportuna no se cumplió.

Las estaciones IDEAM seleccionadas para el análisis del comportamiento del cuerpo de agua medido fueron:



Tabla 8 Estaciones Paz Ariporo

CODIGO	TIPO	NOM ESTACION	CORRIENTE
3601002	PG	AGUADA LA	ARIPORO
3601003	PG	STA RITA	ARIPORO
3601501	CP	PAZ DE ARIPORO	ARIPORO
3602002	PM	CABUYA LA	CASANARE
3602004	PM	SAN SALVADOR	CASANARE
3602702	LG	CABUYA LA	CASANARE
3602704	LM	SAN SALVADOR	CASANARE
3705713	LM	RAMOS	BZ REINERA
3523502	CO	TAMARA	PAUTO
3601001	PM	PAZ DE ARIPORO	ARIPORO
3601701	LG	PAZ DE ARIPORO	ARIPORO
3601702	LM	PTE CARRETERA	MUESE
3601703	LM	PTE CARRETERA	TATE

Tabla 9 Estaciones Ciénaga de Zapatosa

CODIGO	Tipo	NOM ESTACION	CORRIENTE
2502702	LG	BANCO EL	MAGDALENA
2502714	LM	SALOA	CESAR
2502733	LM	PENONCITO	MAGDALENA
2502741	LM	REGIDOR	MAGDALENA
2502743	LM	BARRANCONES	CGA ZAPATOSA
2502762	LM	CHAPETONA LA	BZO PAPAYAL
2502772	LG	BARRANCONES	CGA ZAPATOSA
2502785	LM	BELEN	CESAR
2502831	LM	SAN MIGUEL	BZO DE LOBA
2502832	LM	SALTO EL	BZO MOMPOS
2502833	LM	LADRILLERAS	CESAR

4.5. Objetivo y elaboración de la geodatabase

La geodatabase, como su nombre lo indica es una base de datos geográficos. En el sentido práctico es la agrupación de manera organizada y estructurada bajo parámetros específicos. Se construye



una geodatabase con dos probables objetivos; cuando se requiere una geodatabase como en el presente trabajo para presentar los resultados finales de manera estructurada para su localización y uso posterior. El segundo objetivo puede ser en la construcción de una geodatabase como estrategia de trabajo y aplicación de SIG en alguna organización o instituto. De esta manera se tendrán disponibles datos en la estructura deseada y podrán ser aplicables en estudios de conectividad.

El IAvH tiene una estructura diferente a la de La ANLA, estructura tomada en general por las corporaciones autónomas regionales CAR para fijar su estructura. Como en el presente caso la geodatabase no es necesaria para correr los algoritmos propuestos, metodológicamente se trabaja posterior al trabajo geográfico como requisito para la presentación oficial, como se aprecia en el capítulo del Protocolo. En otros casos las CAR trabajarán con los datos de las geodatabases disponibles o en construcción internamente o por otras organizaciones.

5. MODELOS PARA LA CONTRUCCION DE LOS PRODUCTOS CARTOGRAFICOS O MODELOS GEOGRAFICOS DE FRAGMENTACION Y CONECTIVIDAD HIDRICA SUPERFICIAL.

Teniendo en cuenta los modelos como una representación de la realidad y los modelos cartográficos entonces como una representación de un tema geográficamente explícito, se presentan los procedimientos en unos diagramas de flujo para la obtención de los productos cartográficos de interés; la conectividad hídrica superficial y las intervenciones o perturbaciones en las planicies inundables y humedales. Para incluir los aportes o insumos sociales, no se describe un modelo como tal, al ser un ejercicio de reconocer elementos de interés en una narración o conversación no estructurada e informal.

5.1. Modelo de Conectividad Hídrica Superficial

Para el modelo de conectividad hídrica superficial se aplicó el siguiente procedimiento (Figura 5).



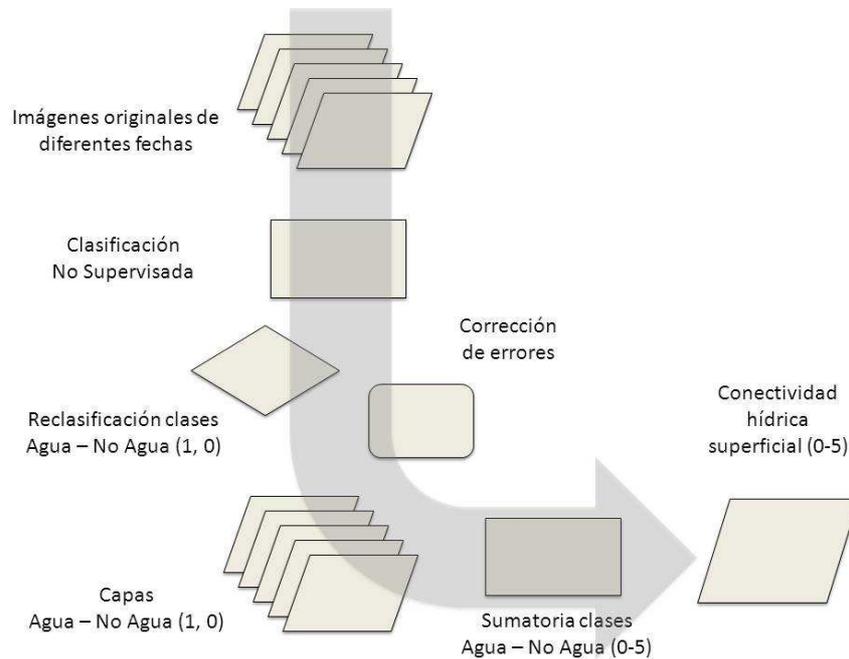


Figura 5 Diagrama de flujo - modelo de conectividad hídrica superficial

Como se detalla en el protocolo, el procedimiento o algoritmo aplicado fue el siguiente:

1. Las imágenes previamente seleccionadas que cumplan con los criterios establecidos de disponibilidad, cobertura y momento hidrológico, se clasifican de manera no supervisada.
2. El resultado de las clasificaciones no supervisadas se reclasifica a valores de 0 y 1 para representar la ausencia y presencia del agua superficial.
3. Cuando se presentan errores debido a las nubes y sombras presentes en la escena, se realiza una interpretación visual de las unidades y se corrige manualmente por valores de 1 y 0 para completar la capa de agua – no agua.
4. Una vez se cuenta con las capas de agua – no agua confiables, se suman con la aplicación de álgebra de mapas. La sumatoria de las capas de agua – no agua, es el modelo cartográfico o representación geográfica de cómo ha estado el agua superficial en el área de estudio, mostrando sus conexiones en el tiempo basado en las escenas seleccionadas.

5.2. Modelo para el análisis de intervención y perturbación en planicies inundables

Para la construcción de las capas interpretadas de intervención y perturbación en las planicies inundables, se aplicó el siguiente procedimiento (Figura 6).



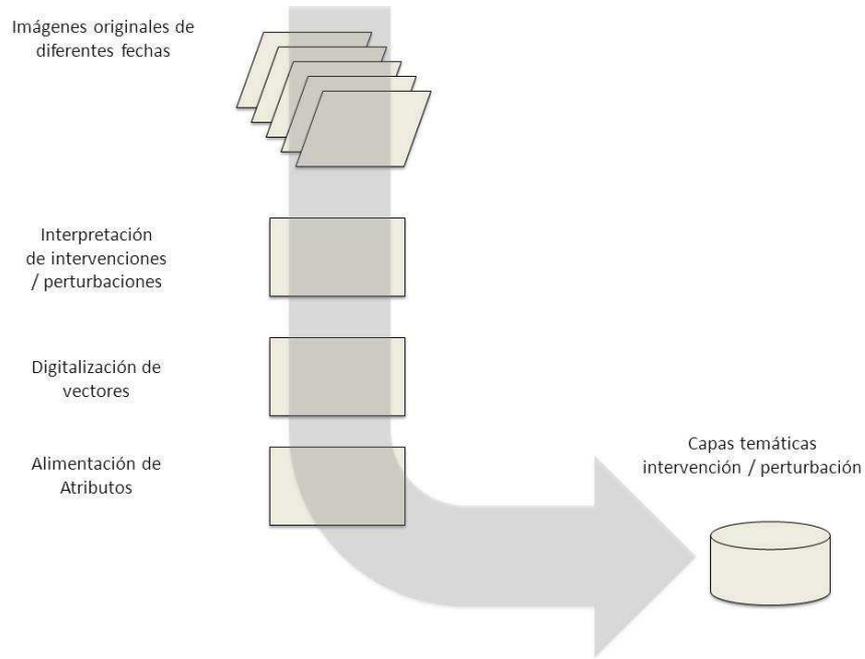


Figura 6 Diagrama de flujo - modelo para la construcción de capas temáticas de intervención y perturbación.

Con la base de datos geográfica, se realiza la interpretación de las intervenciones y perturbaciones de diferentes maneras, como se detalla en el protocolo, donde se describen los procedimientos necesarios para la obtención de indicadores y demás información espacial que permite la caracterización, análisis y monitoreo de la fragmentación y conectividad hídrica superficial en humedales y planicies inundables.

En general por medio de la interpretación se digitalizan los vectores que generan modificaciones de los flujos de agua de entrada y salida en el humedal o planicies inundables y las intervenciones que están generando pérdida o acumulación de agua al interior del humedal.

5.3. Aplicación de insumos sociales al análisis de fragmentación y conectividad hídrica superficial



Como complemento al análisis geográfico hecho con imágenes de sensores remotos desde un computador o un escritorio, el complemento con insumos de los actores sociales que conocen otras perspectivas del objeto de estudio, es importante tener en cuenta. Para complementar con la perspectiva social, se propone en primera medida recoger de manera no estructurada perspectivas y hechos en las narrativas hechas por los diferentes actores con quien se establece una conversación del tema. En las mismas narraciones están los datos útiles que complementan los hechos evidenciados en el análisis de las imágenes de sensores remotos, como también se pueden espacializar hechos no percibidos sin el insumo social.

6. ESTUDIOS DE CASO – VENTANAS

Se seleccionaron tres áreas priorizadas por el Fondo de Adaptación para desarrollar los ejercicios o ventanas de trabajo.

1. Zona Río Ariporo – Municipio Hato Corozal.
2. Ciénaga de Zapatosa
3. Ciénaga de La Virgen

Se utilizaron imágenes Landsat de diferentes fechas para el estudio del paisaje. Contar con una buena serie de imágenes sobre un territorio, como las Landsat, es el primer paso y ahí estarán contenidos los datos útiles para el monitoreo de la fragmentación y conectividad hídrica superficial en humedales.

Se construyó el modelo geográfico de conectividad hídrica superficial para las ventanas 1 y 2, y se realizó una interpretación de las intervenciones o perturbaciones para la ventana 3. En esta última ventana se complementó el análisis geográfico con insumos sociales probando que es necesario contar con otras visiones del territorio de actores sociales para alimentar los modelos geográficos en construcción.

Para las ventanas 1 y 2 este ejercicio de interpretación de intervenciones debe seguir en otra fase. Teniendo una superposición de los flujos de agua y las intervenciones o perturbaciones presentes como infraestructura, vías, diques y terraplenes, se puede direccionar una caracterización en campo. Por ejemplo al occidente del casco urbano del Paso, Cesar, la vía genera represamientos sobre el flujo del arroyo Las Mulas. En campo se puede realizar un levantamiento topográfico de la planicie inundable del arroyo y la vía. Se puede hacer también una hidrología del arroyo hasta este



punto para establecer los caudales estadísticamente. Se pueden hacer mediciones puntuales de caudal o aforos, como también se puede establecer una estación para el monitoreo del caudal y los eventos de desborde sobre la vía e inundación por causa del represamiento. Analizar las dimensiones que permiten el paso de agua debajo de la vía, evaluar el estado de las estructuras que permiten el paso de agua, si están con adecuado mantenimiento o se encuentran fallando o taponadas. Los productos generados sirven como punto de partida para diversas aplicaciones. Para las ventanas 1 y 2, la ausencia de los insumos sociales para conocer lo que pasa en las localidades fue notable. La falta de contexto limita el análisis, ya que este es aplicado según el caso y los problemas y situaciones que se dan en un sitio. En este sentido la falta de contexto y preguntas no permite mayor desarrollo que una escena de dinámica de extensión de los cuerpos o superficies de agua.

Para soporte de ubicación general y detallada se espera que las diferentes entidades cuenten con bases geográficas oficiales del IGAC. Una base general se encuentra disponible en la página web del Instituto Geográfico IGAC, donde se realizaron visualizaciones para referencia general.

Para la primera ventana en el llano, como elemento principal se destaca el Río Ariporo que marca el límite sur del área de estudio. En la Figura 7 se observa el casco urbano del municipio de Hato Grande y Paz de Ariporo al sur.



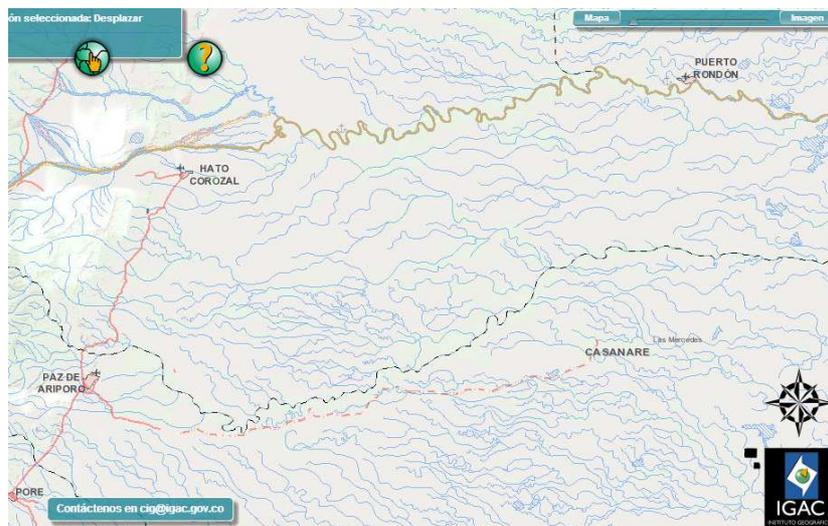


Figura 7 Cartografía base IGAC para la ventana de la zona Rio Ariporo.
<http://ssiglwps.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=7&title=Mapa%20Base>

Para la ventana de la Ciénaga de Zapatosa los cascos urbanos más notables en el área de estudio son El Banco, Chiriguana y Curumani (Figura 8). Se observa también los trazados de las vías principales representado con líneas rojas.

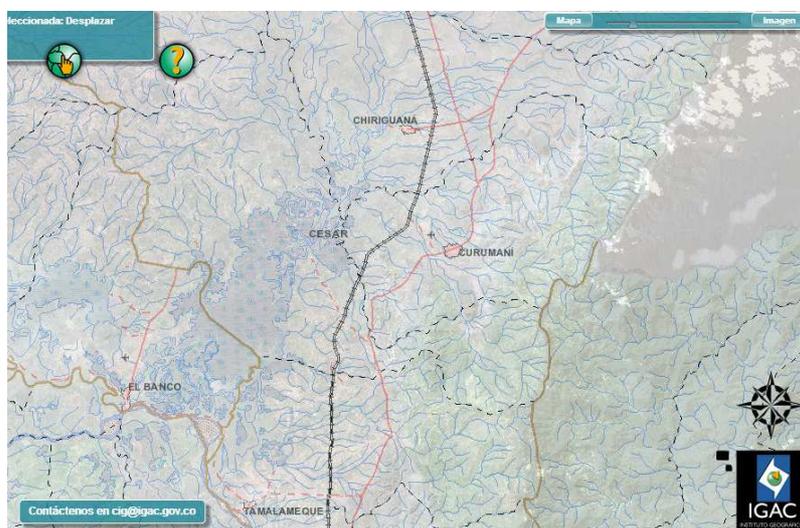


Figura 8 Cartografía base IGAC para la ventana de la Ciénaga de Zapatosa.
<http://ssiglwps.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=7&title=Mapa%20Base>



En la cartografía base para la ventana de la Ciénaga de La Virgen (Figura 9), se observa la ubicación de la ciudad de Cartagena, las vías principales, las poblaciones más pequeñas y los drenajes. Se observa también la ciénaga y la boca original de comunicación con el mar, La Boquilla.



Figura 9 Cartografía base IGAC para la ventana de la Ciénaga de La Virgen.
<http://ssiglwps.igac.gov.co/ssigl2.0/visor/galeria.req?mapald=7&title=Mapa%20Base>

6.1. RÍO ARIPORO

En el mes de marzo de 2014, la atención nacional se concentró en los efectos de la sequía extrema en el municipio Paz de Ariporo. Aunque el área de estudio queda por fuera del municipio, no deja de ser relevante en el contexto actual. Al observar la serie de imágenes disponibles, se evidencia como toda el área de estudio es, en algún grado inundable, es claro entonces el nombre de Sabanas Inundables del Casanare y Meta, el ecosistema donde se encuentra inmersa la unidad de análisis.

6.1.1. *Análisis de la conectividad hídrica superficial en el área de estudio Zona Río Ariporo.*

En las Figura 10 a Figura 12 se observa la representación geográfica de la conectividad hídrica superficial donde claramente se destacan los cuerpos de agua, el río y caños. El agua también muestra algo de las geoformas al delinear un nivel en la planicie. En la Figura 11 y Figura 12, se observa las zonas por donde divaga el río. Queda registrado también donde el agua permanece en pocas zonas profundas y algunos represamientos construidos.



Un punto de comparación en el país de estas sabanas inundables, es con la parte baja del Río Sinú. Se pueden establecer semejanzas geomorfológicas entre estas planicies inundables. Teniendo en cuenta los problemas que presenta Córdoba por la ocupación indebida de las zonas inundables, nos muestra un camino que no se debe seguir. Contando con ese precedente la ocupación y aprovechamiento del Llano debe hacerse teniendo en cuenta y priorizando el recurso hídrico.

En la actualidad se observan los cuerpos de agua sin mayor intervención a gran escala. No se observan canales de drenaje, canalizaciones y obstrucciones. Se observan algunos represamientos para asegurar el agua en verano, que como se mencionó recientemente fue extremo.

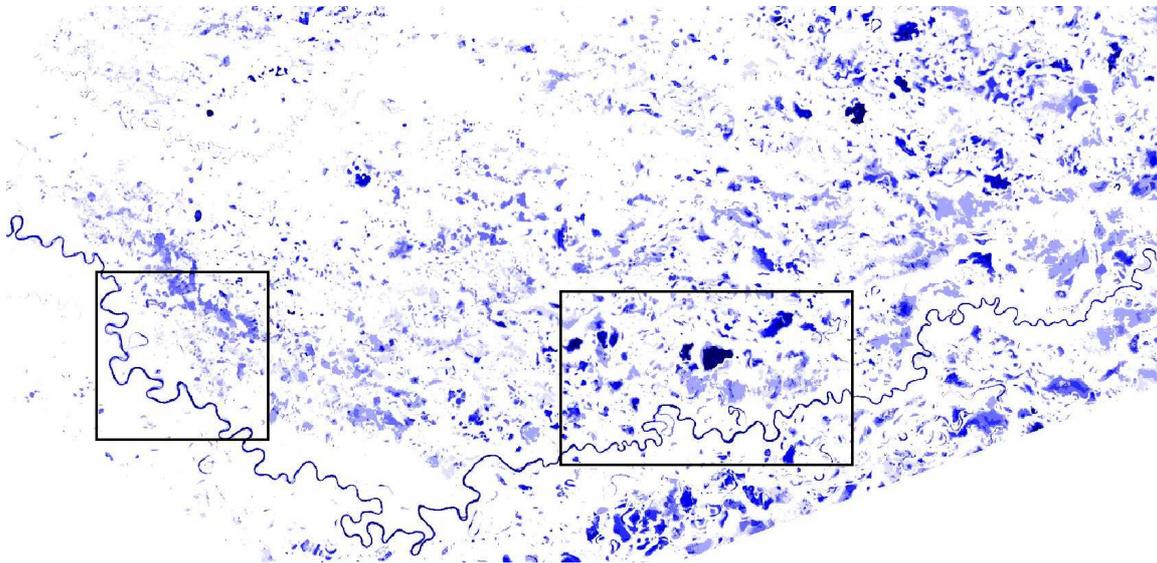


Figura 10 Vista general zona Río Ariporo, ejercicio de conectividad hídrica superficial y detalle figuras 11 (a la derecha) y 12 (a la izquierda).



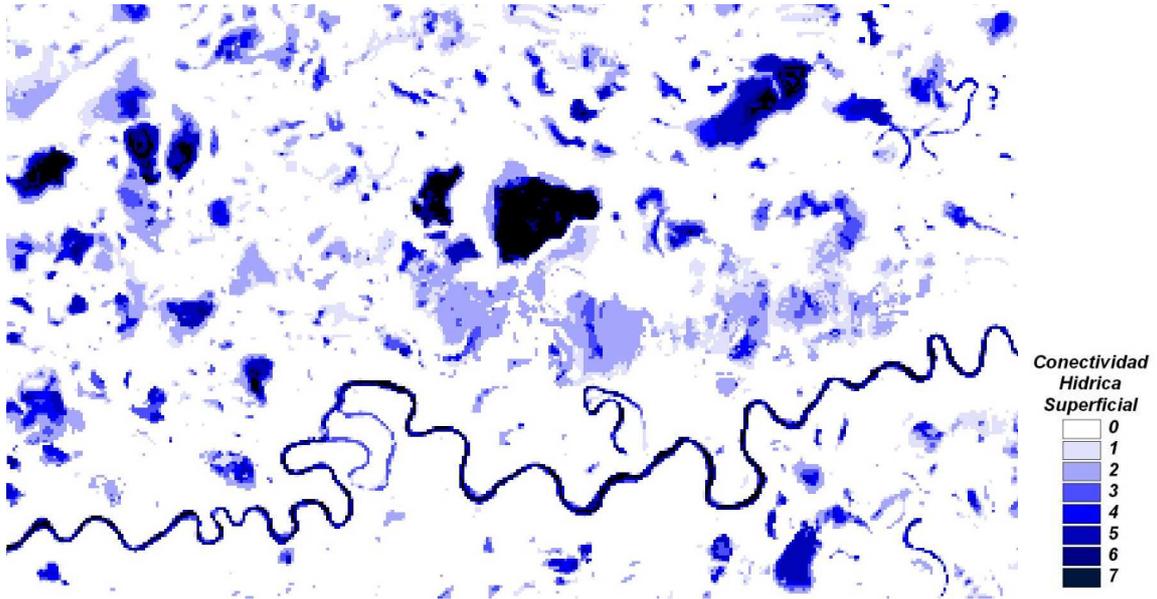


Figura 11 Conectividad hídrica superficial, zona Río Ariporo.

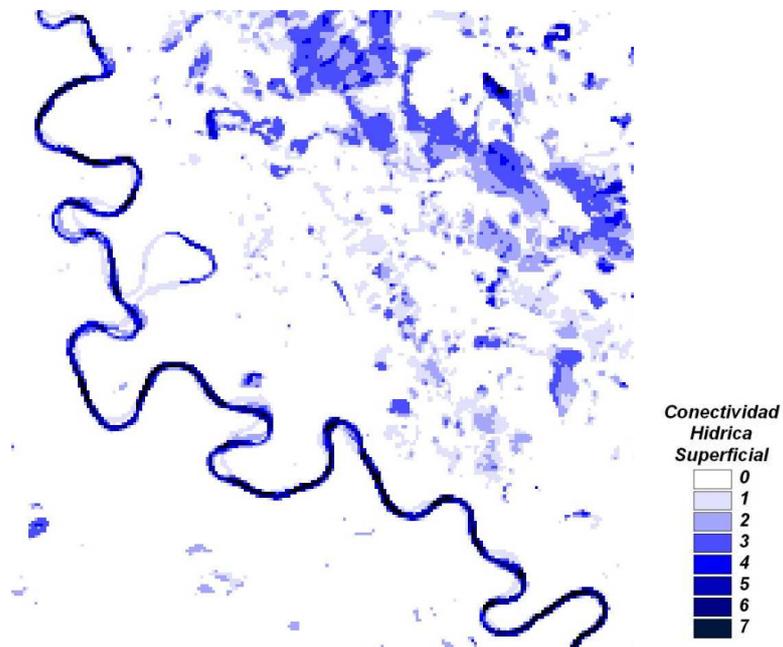


Figura 12 Conectividad hídrica superficial, zona Río Ariporo.

Como medida de mitigación y manejo de la sequía, el estado financió la construcción de represas, jagüeyes y aljibes para la acumulación del agua superficial e intentar la provisión en épocas secas.



La Figura 10, muestra el resultado general del análisis hecho en esta zona y muestra la complejidad de parches inundables. Si se descuida y se pasa por alto las pequeñas intervenciones que se dan cotidianamente en las fincas, llegará el día que las intervenciones ocuparan el territorio con efectos irreversibles sobre el recurso hídrico.

De las actividades que más preocupan son las exploraciones y explotaciones petroleras en la zona. En los últimos años se han desarrollado exploraciones con el método de sísmica, lo que presuntamente causa el fracturamiento del subsuelo, favoreciendo y acelerando procesos de infiltración y pérdida de agua superficial y subsuperficial.

Como no existe un monitoreo del comportamiento del agua subterránea antes de estas actividades durante y posterior, es muy difícil concluir cuáles son los impactos sobre el medio ambiente. Para un análisis del caso reciente, se pueden ubicar las zonas con problemas de sequía, los puntos de exploración sísmica, y los registros de lluvias del IDEAM. Conociendo la configuración de estos elementos, aporta al análisis del problema.

Como punto final se destaca que contrario a los complejos cenagosos donde las conexiones entre los basines son evidentes con brazos y caños, la comunicación entre parches aislados no se registra de manera superficial con el análisis de conectividad hídrica en esta ventana. En este sentido el resultado del análisis indica que los flujos que llenan de agua los basines son diferentes a los superficiales, los flujos subsuperficiales y subterráneos son los que determinan en mayor medida la distribución espacio temporal del agua superficial en la Zona Río Ariporo. Argumento entonces para definir estrategias de investigación y monitoreo del recurso hídrico subterráneo. Igualmente esta hipótesis entonces está para verificar o refutar con datos y muestreo en campo.

6.1.2. Superposición del modelo de conectividad hídrica superficial y las imágenes de radar

Para evaluar el resultado del procesamiento con las imágenes ópticas, se contrasta con las imágenes disponibles de radar para parte del área de estudio del Río Ariporo. En las imágenes se evidencian las intervenciones detectables en las ópticas y otras intervenciones recientes solo evidentes en las imágenes de radar, en la parte sur de la Figura 13 se observa una línea al sur del río, esta es un dique o terraplén levantado en la zona inundable.



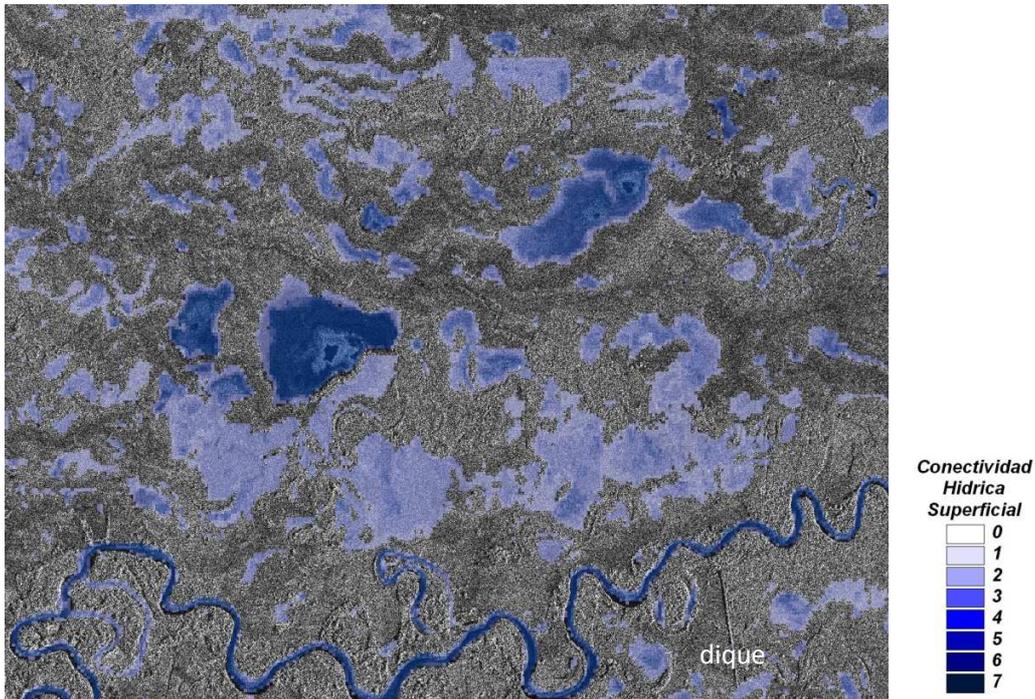


Figura 13 Superposición del modelo de conectividad hídrica superficial con la imagen de radar Cosmo-SkyMed

6.2. CIÉNAGA DE ZAPATOSA

La Ciénaga de Zapatosa recibe el agua del Río Cesar y del Río Magdalena, es un cuerpo intermedio formado por la confluencia de estos dos importantes ríos. De esta manera su productividad e importancia a nivel regional es considerable, es la ciénaga más grande del Río Magdalena. En las Figura 14 a Figura 16 , se observa la ciénaga en niveles bajos, medios y altos. En el escenario de nivel alto, el espejo de agua puede aumentar más del doble de extensión sobre terrenos de humedal que han venido siendo ocupados con diferentes fines. La delimitación de la unidad prioritaria hecha por el Fondo de Adaptación es sobre el cuerpo de agua de la ciénaga en niveles bajos o promedio, pero el reto de trabajo y manejo de humedales es en la zona inundable.

6.2.1. Análisis de la conectividad hídrica superficial de la Ciénaga de Zapatosa

La conectividad con el Río Magdalena se ha visto alterada por la construcción de la carretera sobre la margen derecha del río y solo se ha dejado una comunicación real por la cabecera del municipio



El Banco. Como evidencia de comunicación anterior está la complejidad de diques en la zona sur. En la imagen del 2007 se observa donde la carretera falló y entró el río, en escenas posteriores se observa el delta que dejó ese evento. Esta misma obstrucción genera reducción del flujo en la ciénaga y su productividad al solo ingresar nutrientes del Río Magdalena en un punto al sur. Caso similar se observa a lo largo del Canal del Dique donde series de ciénagas se restringen a un solo punto de comunicación y recambio con el canal.

Como resultado del análisis de conectividad, la siguiente Figura 14 muestra los diferentes niveles de agua registrados. En gris oscuro se delimita la planicie inundable de la Ciénaga de Zapatos y al sur, del Río Magdalena. En tonos azules de más oscuro a más claro, las zonas donde ha permanecido el agua superficial hasta zonas donde ha aparecido el agua una sola vez de los 5 momentos analizados.

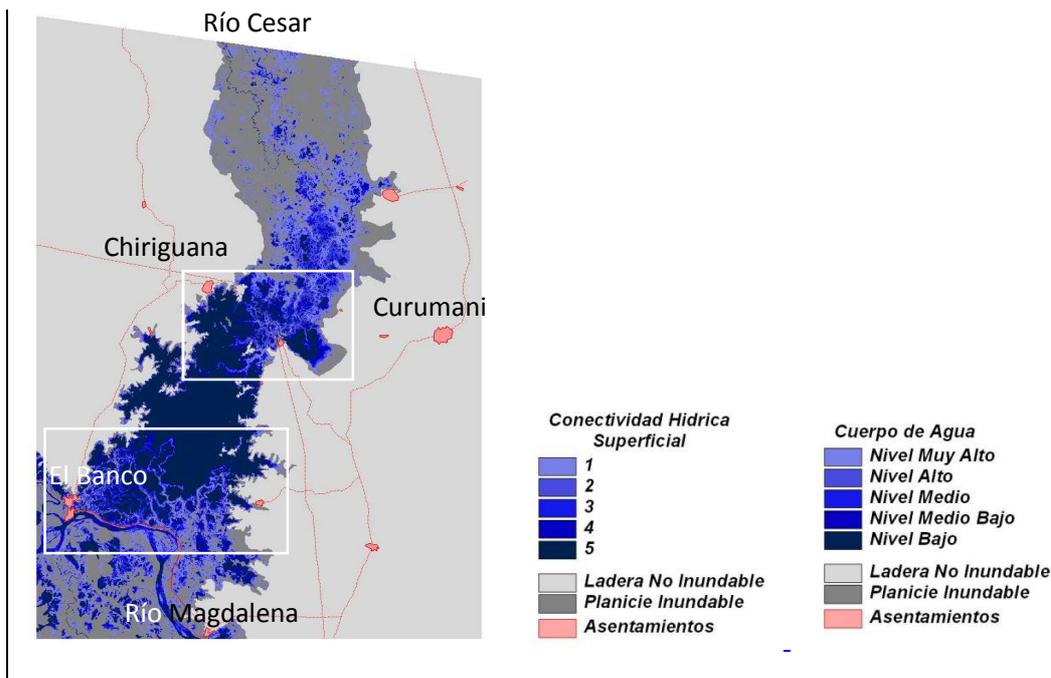


Figura 14 Vista general Ciénaga de Zapatos, ejercicio de conectividad hídrica superficial y detalle figuras 11 (arriba) y 12 (abajo).

En las siguientes Figura 15 y Figura 16 se observa el detalle del resultado, donde son evidentes las líneas y zonas de flujo, prioritarias para el manejo de la conectividad hídrica en las planicies inundables. Las líneas de flujo se evidencian con los valores más altos de conectividad hídrica o las



zonas que tienen agua en momentos de niveles bajos, donde el agua permanece y se dan los flujos en esos momentos. La Figura 15, muestra la zona media de la ciénaga, donde se evidencia la actividad del Río Cesar generando una complejidad de diques que se han formado en diferentes momentos de desembocaduras en la ciénaga. En la Figura 16, se observa la influencia y comunicación que ha tenido el Río Magdalena con la parte sur de la ciénaga. También queda registrada claramente la línea de flujo actual entre el río y la ciénaga por El Banco. La vía que conduce a Tamalameque se observa como una línea roja, esta vía bloquea la conexión entre el Río Magdalena y la Ciénaga de Zapatoza. Es posible que se presenten conexiones menores que deben ser incluidas y caracterizadas con trabajo de campo.

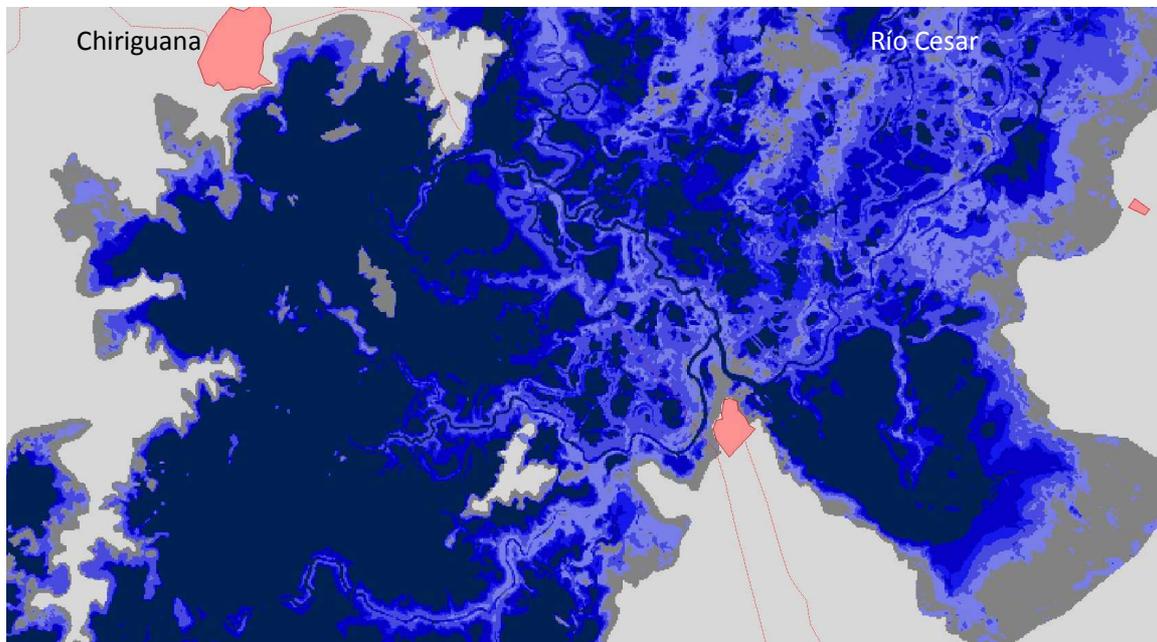


Figura 15 Detalle de la parte central de la Ciénaga de Zapatoza.



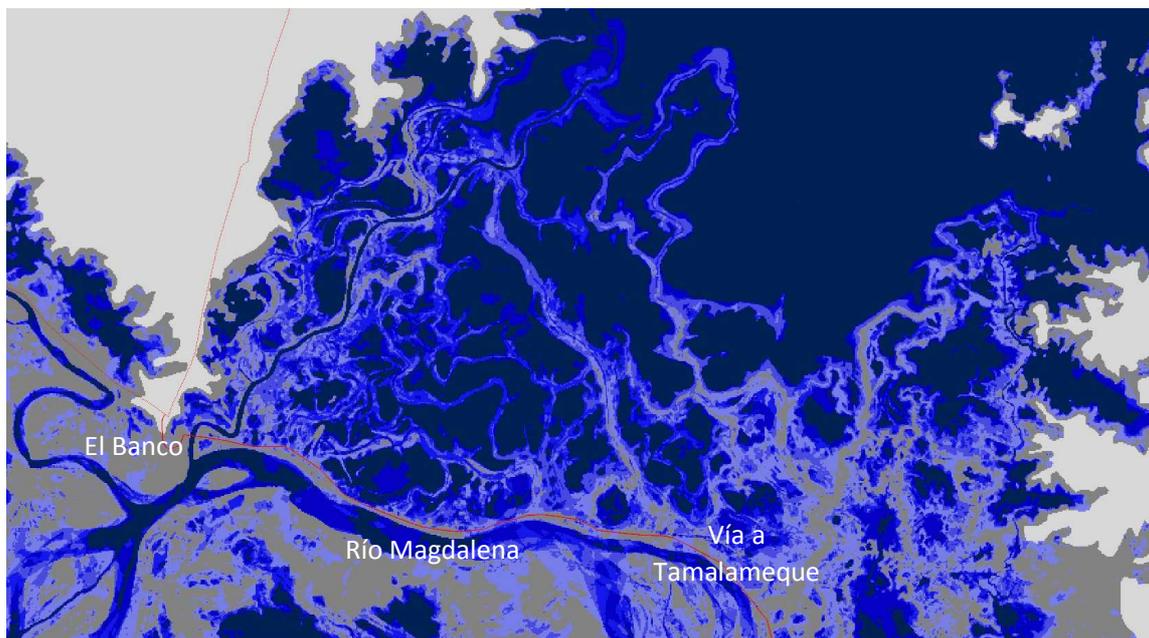


Figura 16 Detalle de la parte sur de la Ciénaga de Zapatosa.

6.2.2. Superposición del modelo de conectividad hídrica superficial y las imágenes de radar

Para evaluar el resultado del procesamiento con las imágenes ópticas, se contrasta con las imágenes disponibles de radar para parte del área de estudio de la Ciénaga de Zapatosa. En las imágenes de radar, las superficies de agua registradas son diferentes a las de las fechas clasificadas, pero muy parecida a la representación de la extensión de la superficie de agua para momentos de niveles medios o promedios de agua. Las superficies de agua quedan dentro de las extensiones clasificadas y son coherentes con el modelo geográfico construido (Figura 17) lo que valida el resultado.



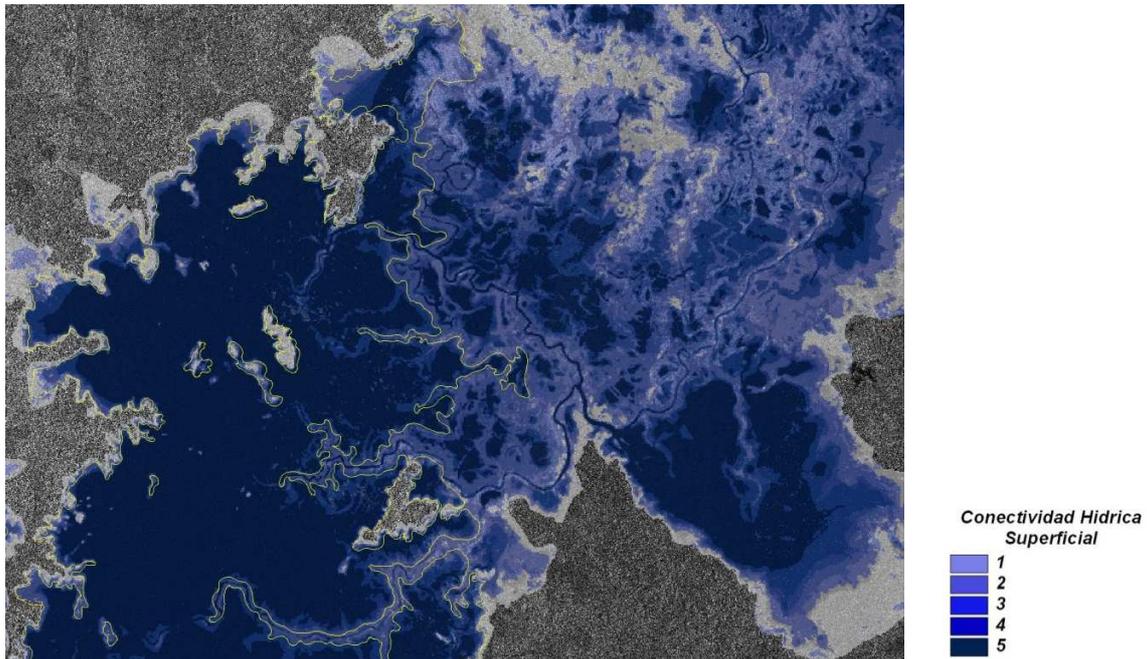


Figura 17 Superposición modelo de conectividad hídrica superficial con imagen de radar COSMO

6.3. CIÉNAGA DE LA VIRGEN

6.3.1. *Análisis geográfico de los flujos de la Ciénaga de la Virgen con el mar y las intervenciones en la planicie costera entre la Ciénaga y la Vía de La Cordialidad.*

Para la ciénaga de la Virgen al norte de Cartagena, uno de los puntos principales para atender fue y es su calidad de agua. Se construyó una estructura llamada La Bocana para dar circulación al agua que estaba con un alto grado de contaminación por parte de la ciudad de Cartagena. Se observa en la Figura 18, como la presencia de sedimentos suspendidos indican los flujos de agua. Como contraste se ubica la pluma del canal del dique a la bahía de Cartagena. Con una buena serie de tiempo y trabajo complementario en campo se puede tener un buen monitoreo de esta variable. En la figura se observa cómo se da el intercambio de agua por La Bocana y da circulación a la parte sur y media de la ciénaga.



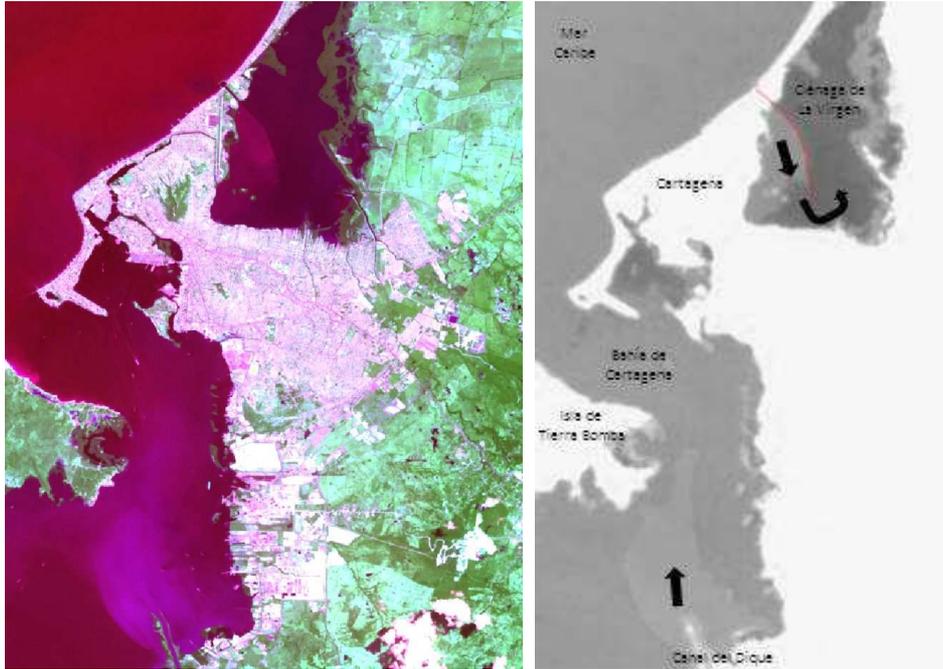


Figura 18 Imagen Landsat OLI 13 Mayo 2013, NASA composición RGB 741 *stretch* izquierda y decoloración derecha.



Figura 19 Foto bocana y dique divisor de entrada y salida de agua.

La zona oriental de la ciénaga, por donde recibe los aportes de agua dulce de la cuenca, en general está completamente intervenida. La cuenca cuenta con un gran número de represas o jagüeyes y en la parte baja represamientos extensos para actividades agrícolas. Las intervenciones



observadas tienen como fin el manejo del recurso hídrico superficial. Se observa en la siguiente Figura 20 la delimitación del área de estudio con una línea negra y los drenajes en con líneas azules.

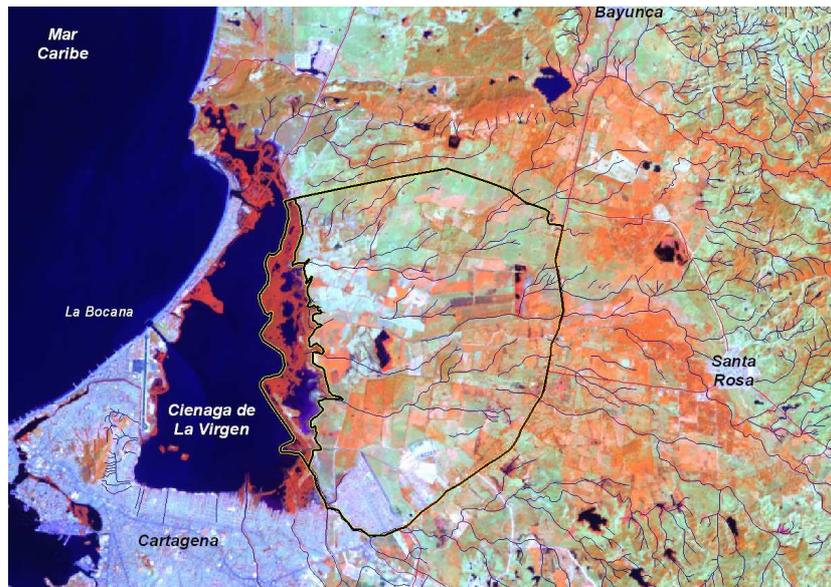


Figura 20 Parte de la planicie inundable ciénaga de La Virgen, Cartagena Bolívar.

La intervención de la planicie costera de La Ciénaga de La Virgen es evidente desde antes de 1991. En las fotografías aéreas disponibles de 1981 el panorama era similar. Para ejemplificar el ejercicio de cuantificación de cambio en metros lineales de diques o terraplenes, se toman dos fechas de análisis; 1991 y 2014. El ejercicio se basa en la fotografía aérea IGAC No. 0172 del vuelo C-2469 de 1991 con escala aproximada de 1:40.000 y la banda pancromática de 15 metros de resolución por pixel del sensor OLI Landsat NASA del 24 de enero de 2014.

Como primer paso en el análisis de cambio o intervención por construcción de infraestructura, se define el área de estudio. En este caso el objeto de análisis es la planicie costera que drena hacia la Ciénaga de La Virgen. Se toma como límite la carretera La Cordialidad que de Bayunca conduce a Cartagena. En el perímetro de la ciudad se toma un canal en sentido norte hacia la ciénaga donde se toma la margen entre los manglares y la ciénaga. En sentido norte se sigue por la línea de



manglar hasta el caserío de Puerto Rey, donde se toma un dique que en dirección oriental lleva a la carretera La Cordialidad, límite municipal con Santa Rosa de Lima.

En la escena de 1991 ya eran evidentes más de 58 kilómetros de diques y terraplenes levantados en el área de estudio (Tabla 10). Para la escena de 2014, el aumento en líneas de intervención aumento en más de 8 kilómetros en terraplenes, 7 kilómetros de la nueva vía entre el norte y sur de la ciénaga por su costado oriental, entre Puerto Rey y El Pozón. 8 kilómetros de una vía antigua fueron ampliados para el 2014. Todas las intersecciones de drenajes y obras de ingeniería dan pie para una evaluación y caracterización, para establecer el impacto que tienen sobre el drenaje y las conexiones hídricas.

Tabla 10 Longitud de las intervenciones registradas entre 1991 y 2014 en el área de estudio.

Intervención	km
canalizaciones 2014	4,21
nueva vía 2014	7,71
terraplén vía ampliada 2014	8,25
terraplenes 1991	58,56
terraplenes 2014	8,38



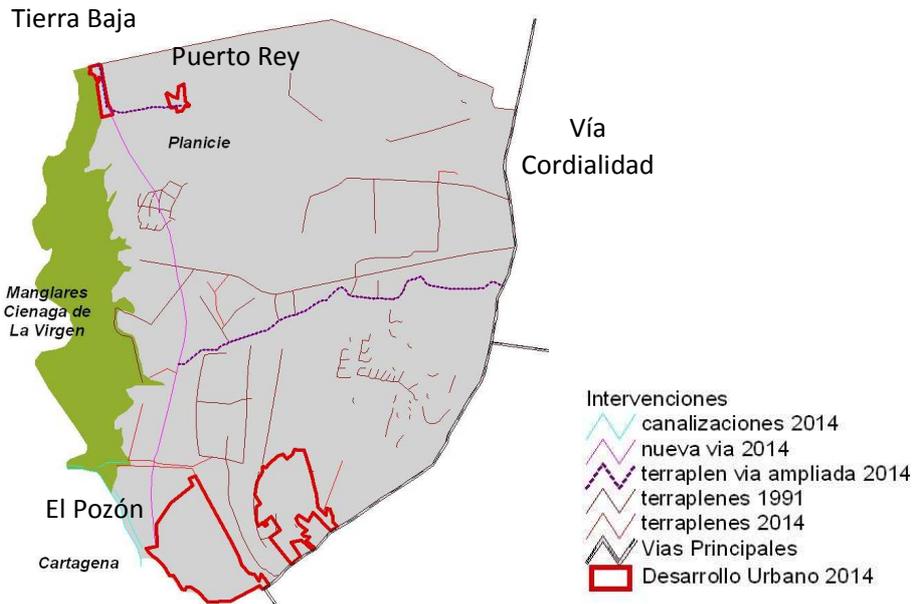


Figura 21 Interpretación de las intervenciones en parte de la planicie de la Ciénaga de La Virgen.

El área de trabajo para el monitoreo de aumento en la distancia lineal de construcción de diques o terraplenes, tiene 677 hectáreas de franja de manglar y 5269 ha de planicie intervenida, sumando un total de 5946 hectáreas. La interpretación se enfocó a destacar las intervenciones principales en la planicie, se observan muchas más intervenciones a menor escala que no fueron digitalizadas. Es común que muchos predios y en la división de lotes y parcelas se levanten diques y terraplenes. Al interior de algunas parcelas de arroz, se observa el diseño de las densas redes de drenaje para asegurar la irrigación de todo el terreno cultivado. Se puede concluir que todas las intervenciones lineales en esta planicie tienen el objetivo de manejar el agua superficial. Exceptuando las vías, estas obras intentan retener y direccionar la escorrentía disponible, que en la localidad puede escasear por temporadas y presentarse de manera torrentosa en otras.



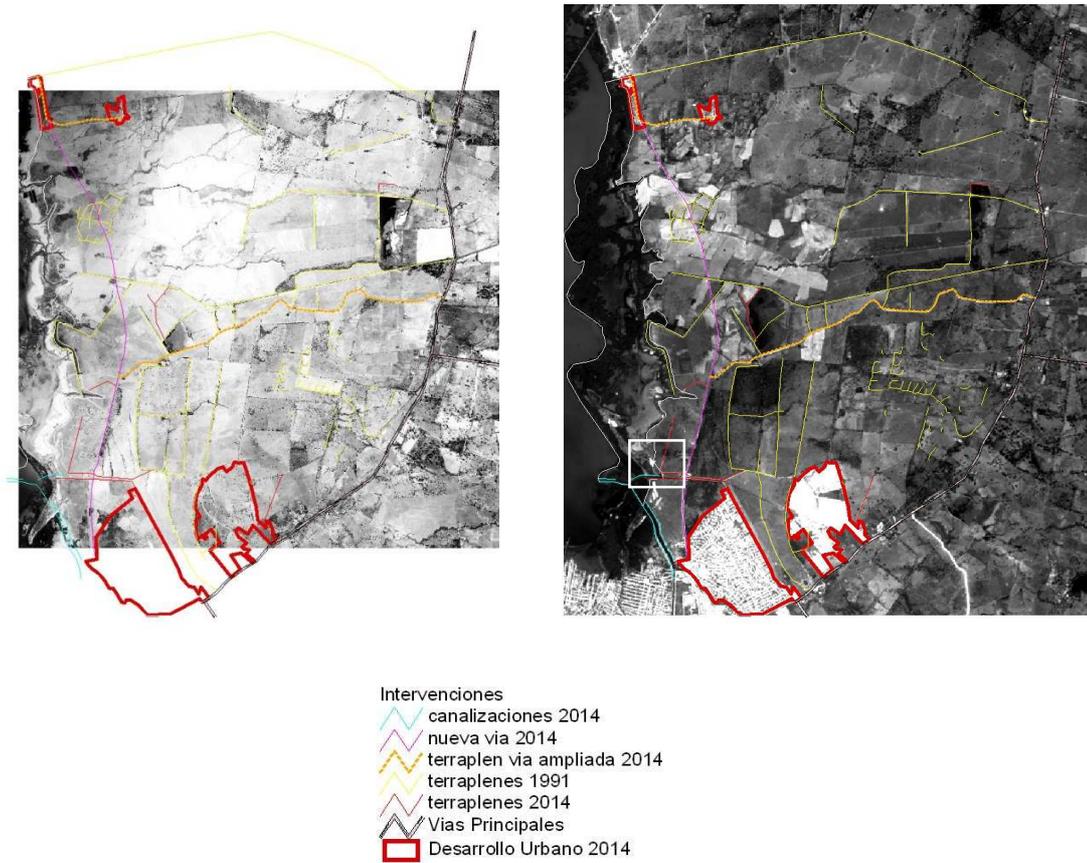


Figura 22 Intervenciones interpretadas para 1991 - izquierda y 2014 – derecha.

En el área de estudio definida, entre 1991 y 2014 se observan varios cambios registrados con una interpretación sobre las dos imágenes analizadas. La aparición de dos bloques urbanos, la construcción de canales y diques, como la ampliación y construcción de vías. La aparición de una vía que atraviesa la parte baja de la planicie costera, es un cambio importante, la vía comunica uno de los bloques urbanos, el crecimiento de la ciudad y el caserío de Puerto Rey al norte. Este último también tuvo un crecimiento notable, con una parcelación evidente en los terrenos vecinos, donde antes se observaba una matriz regular de pastos y ahora se observa un mosaico de parcelas pequeñas.





Figura 23 Detalle de intervenciones en la planicie costera de la Ciénaga de La Virgen. Fuente: Digital Globe, disponible en Google Earth.

Las dos unidades de crecimiento del núcleo urbano de Cartagena, tienen aproximadamente 132 y 206 hectáreas respectivamente. Puerto Rey ocupa aproximadamente 8,5 hectáreas y el crecimiento de Tierra Baja una superficie de 13 ha. El panel divisor de las corrientes de entrada y salida a la ciénaga, tiene una extensión de 3,4 km, donde a lo largo de esta línea hay una divisoria física en la ciénaga (Figura 19).

6.3.2. *Aplicación del aporte de insumos desde lo social para complementar el análisis de conectividad y fragmentación hídrica en la Ciénaga de La Virgen.*

Como parte de los procedimientos propuestos para el análisis de la conectividad y fragmentación hídrica superficial en las planicies inundables y humedales, se propone el complemento de datos desde la perspectiva social. Con este objetivo se realizaron encuentros de manera rápida con 3 actores alrededor de la Ciénaga de La Virgen. Se contó con los insumos de un conductor local, un funcionario del Aeropuerto y la directora de una fundación que desarrolla trabajo ambiental y social en la Ciénaga.

Con el conductor, se recorrió parte del perímetro del área de estudio, se georeferenciaron las entradas a las urbanizaciones y se registró su nombre. De manera rápida el conductor contaba la



manera como se ha urbanizado recientemente, la situación social de la zona, y qué parte de la población que ha ocupado la zona son reinsertados y damnificados o afectados por deslizamientos del Cerro de La Popa. Para estas familias, el Estado desarrolló urbanizaciones de interés social como Colombiaton, un bloque al norte de las unidades urbanizadas. En el sector del Pozón, el conductor manifestó que la parte norte entre la vía y la ciénaga es inundable. Se observó el desnivel entre la parte izquierda y derecha de la vía principal donde se hace evidente la zona de inundación.

En el Aeropuerto Rafael Nuñez, se pudo conversar con un funcionario y conocer los planes de expansión que tiene. La pista se ha aumentado, y falta una segunda fase donde contempla tala y relleno de manglar para la expansión de la pista. El único terreno disponible es sobre manglar y ciénaga. Estos diseños ya se encuentran en ANLA, la ampliación de la vía al norte de la ciudad también se encuentra diseñada.

Finalmente se presentó la oportunidad de conocer un poco el trabajo que hace la Fundación Eco Progreso, dedicada al trabajo ambiental y social en la Ciénaga de La Virgen. En una corta conversación con la directora se conoció también los cambios recientes que ha tenido la ciénaga, como su estado físico químico, proyecciones de abrir otra boca de conexión con el mar y los retos de manejo y amenazas que trae la construcción de un viaducto sobre los manglares y una zona prioritaria para la biodiversidad local e intercambio natural de la ciénaga con el mar.

Como se presentó anteriormente, la ciénaga tiene un intercambio con el mar por medio de la bocana. Al detallar el flujo que tiene el agua por la bocana, se evidencia que favorece a la parte sur y la parte norte de la ciénaga queda con un intercambio menor con el mar. Las bocas naturales de la ciénaga se ubican al norte. La boca principal, La Boquilla y una boca menor por el barrio Villa Gloria. Al construirse la Bocana, el intercambio natural, que dependía del aumento estacional del nivel de la ciénaga, se modificó. Como la bocana presenta una comunicación continua y estable de la ciénaga con el mar, el aumento de nivel de la ciénaga se hace menos frecuente, y como resultado menor actividad de intercambio por las bocas originales.





Figura 24 Detalle La Boquilla 2014, Digital Globe disponible en Google Earth.

En las imágenes disponibles en Google Earth (Figura 24), se observan diferentes fechas y niveles en La Boquilla los canales de comunicación del mar con la ciénaga y la parte deltaica al interior de la ciénaga (Figura 25 y Figura 26), donde la Fundación EcoProgreso ha evidenciado y establecido esta zona como prioritaria para las aves. Al observar la configuración de la ciénaga y su comunicación con el mar (Figura 26), se hace evidente la importancia de esta zona para la biodiversidad local como para el manejo y mantenimiento de la ciénaga como un ecosistema productivo del cual depende parte de la población vecina.

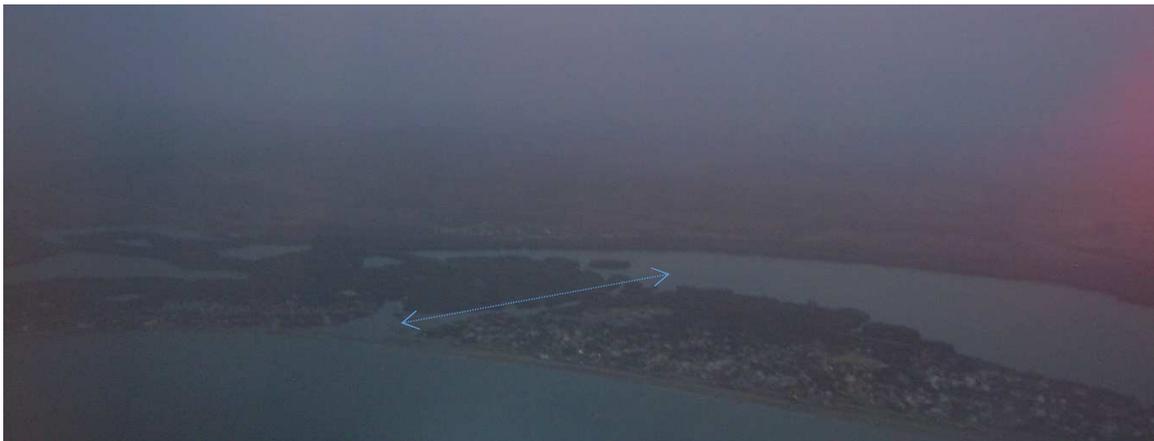


Figura 25 Foto de La Boquilla



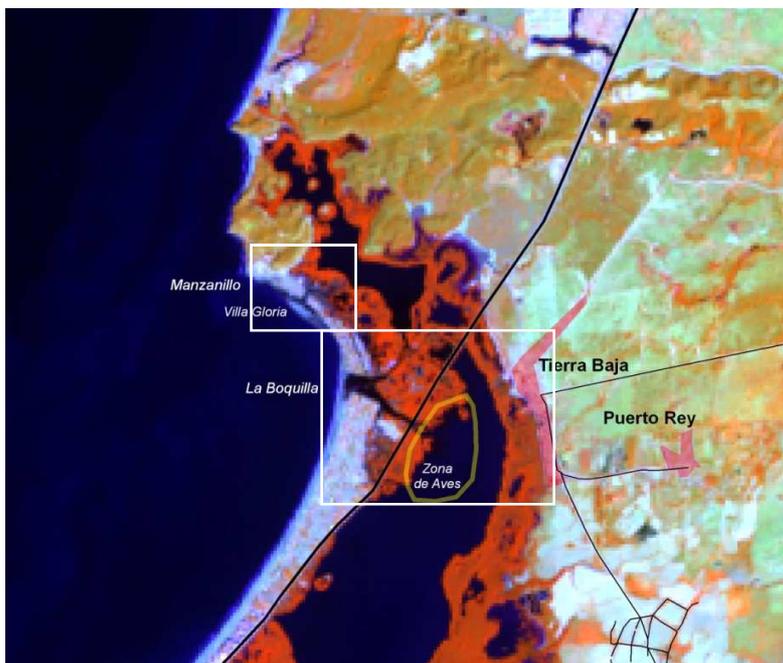


Figura 26 Zona Norte, Ciénaga de La Virgen, recuadros figuras 20 (abajo) y figura 23 (arriba).

Como el refluo favorece la parte sur, las condiciones físico químicas, sobre todo salinidad ha sido tema de consideración para el manejo de esta ciénaga. Se ha planteado entonces un proyecto de comunicación de la parte norte de la ciénaga con el mar. Con las imágenes se observa que al sur de Manzanillo, el canal de Villa Gloria tiene comunicación reciente con el mar (Figura 27).





Figura 27 Detalle Canal natural Villa Gloria, Google Earth.



Figura 28 Inundación 2011 Villa Gloria, Foto Viviana Mourra, Google Earth



En la Figura 28 se observa la inundación en el 2011 en el barrio Villa Gloria. Se observa al norte en Manzanillo un pequeño canal que comunica con una laguna costera. Al sur o parte derecha de la foto, la entrada de agua del mar por el canal natural de Villa Gloria.

7. PROTOCOLO PARA EL MONITOREO DE LA FRAGMENTACIÓN EN HUMEDALES

Para hacer explícitos de manera geográfica los indicadores y demás información espacial que permitan la caracterización, análisis y monitoreo de fragmentación y conectividad hídrica en humedales y planicies inundables, como primer paso debe haber una contextualización teórica, una evaluación y selección de los datos geográficos disponibles y adecuados para hacer el análisis y poder construir los indicadores que se quieren monitorear. En segundo lugar, agruparlos en una base de datos geográfica para hacer los diferentes ejercicios de análisis de superficies de agua y perturbaciones o intervenciones en los humedales. El último paso es alimentar una geodatabase con los requerimientos definidos para dejar de manera estructurada los resultados cartográficos.

Como cada producto del presente trabajo representa una fase de la propuesta general, se elabora el protocolo de los procedimientos realizados para cumplir con cada producto o cada paso en el proceso o trabajo realizado para la obtención de indicadores y demás datos geográficos para la caracterización, análisis y monitoreo de la fragmentación en humedales. Los procedimientos, pasos o algoritmos, que se aplicaron, pueden ser replicados de manera sistemática en el territorio nacional. Hay que tener en cuenta que cada región tienen unas particularidades que hacen diferente las situaciones de cada zona y el análisis de la misma. Se describe lo que se tuvo en cuenta o los criterios, las aplicaciones y debilidades de la cartografía temática producto del análisis de fragmentación y conectividad hídrica superficial en las ventanas establecidas. Se dan también unas recomendaciones de cómo llevar a cabo este tipo de investigaciones.

Se presentan entonces los productos o fases del ejercicio y el desarrollo para su cumplimiento:

7.1. Diagnóstico de los datos potencialmente útiles para el monitoreo de la fragmentación hídrica superficial en humedales.



Para poder dar un diagnóstico del potencial de aplicación que tienen unos datos, se debe especificar cada objetivo que se quiere cumplir. En este sentido los datos son útiles dependiendo del caso. Para las diferentes regiones del país se recomienda enriquecer los marcos teóricos para las condiciones y dinámicas que se encuentran en ellas.

Para el primer objetivo de identificar la extensión de los cuerpos de agua en el tiempo, el insumo necesario son datos que permitan diferenciar zonas con agua, sin agua o sea terrestres, y húmedas o humedales. Las imágenes de sensores remotos son una herramienta con la capacidad de captar como la tierra refleja la radiación que recibe del sol. La manera como refleja la superficie de la tierra depende de sus características. Dependiendo de las características de la superficie de la tierra la luz también es reflejada o absorbida por esta. Los sensores remotos son capaces de captar este comportamiento en diferentes longitudes de onda, llamadas bandas. La combinación de estas bandas puede llevar a la identificación de las zonas de interés en este estudio. Para el presente caso se seleccionaron las imágenes Landsat para usar en la aplicación propuesta.

El segundo objetivo, de identificar la intervención de las áreas de investigación, se cumple con imágenes que brinden la opción de visualizar en detalle la cobertura actual y anterior en diferentes momentos. La tarea debe estar enfocada en la interpretación de los diques, terraplenes, canalizaciones, canales, encausamientos, tapones, chorros y demás dinámicas identificables en las imágenes. Como primera opción están las fotografías aéreas del IGAC. En segunda medida se consideran las imágenes de satélite de alta resolución ópticas y de radar.

En el primer caso la combinación de bandas ofrece la capacidad de diferenciar coberturas húmedas de secas por sus propiedades diferenciales. En este caso, la prioridad es identificar estructuras construidas y rasgos estructurales de eventos hidrológicos, por lo que el detalle es determinante. Las fotografías aéreas fueron seleccionadas por el detalle que ofrecen, la disponibilidad en el tiempo y su accesibilidad y costo. En segundo lugar se utilizaron imágenes de radar por cortesía del IGAC e imágenes Rapid Eye. Estas últimas imágenes tienen en algunos casos restricciones de uso, temporalidad y disponibilidad.

Para el tercer objetivo, de conocer el comportamiento de los ríos o quebradas que irrigan los cuerpos de agua del humedal o planicies inundables, los datos hidrológicos son básicos. La medición y monitoreo del nivel o caudal de los ríos aportantes a los cuerpos de agua de interés



define el nivel y comportamiento de los mismos. La comunicación entre los cuerpos receptores y aportantes esta analizada con los primeros dos objetivos. El estudio del comportamiento del cuerpo aportante define estadísticamente los diferentes niveles que han sido registrados. Así entonces se definen los momentos de niveles históricos; bajos, medios y altos. Con esta información se puede hacer una selección de las imágenes que representan estos momentos para el cumplimiento del primer ejercicio de identificación del agua en el tiempo. El tiempo debe ser entonces representativo de un momento hidrológico dado por el nivel o caudal. La contextualización hidrológica de las capas de agua construidas a partir de procesamiento con imágenes de sensores remotos es importante.

7.2. Descripción de los indicadores y variables espacializables que informen sobre la fragmentación en humedales en el tiempo y especificando datos de entrada. Contexto teórico de los indicadores propuestos, reconocer sus limitaciones y aplicabilidad.

Los indicadores definidos para este caso fueron orientados a las ventanas establecidas. Para ajustar los indicadores y variables espacializables en las diferentes regiones y particularidades en los humedales del país, se debe seguir documentando y enriqueciendo con literatura y conocimiento local. Dependiendo del caso y acceso a bases de datos, se debe sacar provecho de la información y literatura disponible para enriquecer metodologías y conocimiento sobre el monitoreo y análisis de la conectividad y fragmentación hídrica.

Las capas temáticas generadas tienen aplicaciones para el conocimiento y manejo ambiental territorial. Las capas de conectividad hídrica muestran por donde transita el agua y cuáles son las zonas donde se encuentra de manera permanente. Solo esta capa sirve de base para analizar propuestas de desarrollo en el área de interés. Al superponer diseños de vías, canalizaciones y demás obras de desarrollo, se observa por donde va a cortar zonas de flujo de agua. Sirve entonces como herramienta complementaria para la toma de decisiones en una corporación, alcaldía o gobernación, como para el SINA y sus institutos asociados.



Tienen la limitación de que dependiendo de la serie de imágenes de sensores remotos que se usa para representar la realidad, no registre eventos extremos o estocásticos. Como no se registra no queda reflejado en el modelo geográfico y no se tiene en cuenta esa parte de la realidad que puede ser muy importante y recurrente. Para disminuir este hecho, se recomienda actualizar y complementar continuamente estudios de manera interna en las entidades ambientales. Que el monitoreo del territorio se refleje de manera geográfica y que los modelos de cobertura o mapas no queden estáticos. El territorio es dinámico y se debe asumir de esta manera para un mejor manejo. No es suficiente un solo mapa para la toma de decisiones donde se deben reconocer los atributos y comportamientos ambientales.

Se presenta otra limitación para la representación de las superficies de agua y tiene que ver con la capacidad técnica de poder representarlas. Se necesita una capacitación en el procesamiento de imágenes de sensores remotos, un conocimiento en SIG y es deseable un conocimiento hidrológico y ambiental, en el sentido de los procesos estudiados. Para que el resultado del ejercicio sea confiable, se deben producir unos insumos acertados.

Tener disponible la interpretación de las intervenciones en el paisaje pueden ser útiles para las entidades ambientales en el monitoreo de su territorio, contabilizar los terrenos intervenidos con su permiso y de manera irregular es parte de sus objetivos. De esta manera hacer control sobre el territorio. Otro ejemplo es de análisis, en el caso que se detecte una vía o un terraplén recién construido, se identifica el punto de intersección con el drenaje principal, obteniendo la coordenada, se visita y caracteriza. Concluyendo si está afectando el flujo del agua o no

Las limitaciones de las interpretaciones siempre están relacionadas con su naturaleza, son versiones interpretadas de la realidad, en las que se pueden dejar elementos por fuera y errar en la interpretación. En el caso de Cartagena, los detalles de intervención fueron obviados, en otras palabras se interpretaron las intervenciones más notorias en las imágenes. Este sesgo afecta las mediciones directamente, los datos provienen de unas digitalizaciones y unidades cartográficas. Si las líneas digitales o polígonos son un poco más grandes, la medición es mayor a si son un poco más pequeños, por lo que cada punto digitalizado implica una diferencia en superficie y longitud.

La aplicación y potencial de los datos hidrológicos está en conocer como ha sido el comportamiento de los parámetros hídricos en el tiempo. Pueden haber datos, mensuales y



diarios. Para cada caso depende su utilidad, hay casos donde los datos que sirven son con una resolución temporal diaria. Esta resolución detallada es necesaria porque en zonas los eventos hidrológicos tienen una duración de horas o minutos, sino se capta en estos intervalos detallados, no se registra el evento y se pasa por alto.

7.3. Base de datos geográfica que cumpla con los criterios definidos para correr los algoritmos y/o aplicaciones con las cuales construir indicadores y demás datos geográficos para la caracterización, análisis y monitoreo de la fragmentación y conectividad hídrica en humedales.

Si el monitoreo se va a hacer sobre superficies de agua y las intervenciones que se dan sobre humedales, el primer criterio que tiene que cumplir la base de datos geográfica o imágenes de sensores remotos, es reflejar los atributos de interés. Las imágenes deben estar despejadas como punto de partida, se recomienda evitar las imágenes que presenten nubes y sombras.

El segundo criterio es de temporalidad, donde en lo posible del mismo sensor se pueda contar con una serie de imágenes en el tiempo, que hayan registrado diferentes niveles de agua y escenarios de uso e intervención de la planicie inundable. Dependiendo de la resolución disponible y el tamaño del área de estudio se pueden hacer diferentes análisis. Por ejemplo, para el caso de la Ciénaga de La Virgen, se pudo usar una fotografía aérea y el área de análisis estaba contenida en esa foto. Caso contrario las ventanas de Ariporo y Zapatosa, donde una sola fotografía no alcanzaba a cubrir el 10% del área de estudio. Las imágenes de radar Cosmo SkyMed, ofrecen una resolución intermedia y un mayor cubrimiento. Para estos últimos dos casos, ofrece una manera complementaria de evidenciar las intervenciones hechas en las áreas de estudio. En general los ejercicios complementarios van a aportar a la construcción de modelos geográficos más completos y cercanos a la realidad de los territorios estudiados.

El tercer criterio es complementario al ejercicio del análisis de la extensión de los cuerpos de agua en el tiempo. Tener en cuenta los datos hidrológicos de las estaciones que registran el nivel o caudal de los ríos es importante. Al conocer el comportamiento de los ríos que irrigan los humedales de interés se puede relacionar con los eventos de inundación y el tamaño de las superficies de agua. Idealmente la selección de las imágenes para la construcción de las



extensiones típicas de niveles bajos, medios y altos, debe estar basada en el análisis de series de niveles o caudales de ríos y cuerpos de agua en y cercanos al área de estudio.

Al estudiar estadísticamente una serie de niveles, se puede establecer los momentos típicos, bajos, medios y altos, hasta muy altos. Estos momentos son importantes para tener en cuenta en el momento de la selección de las imágenes. Si la información de niveles no se encuentra disponible, como en el presente caso, se puede contrastar al momento de estar disponible, como es la representatividad de las imágenes utilizadas en los escenarios hidrológicos establecidos.

Como última opción y dependiendo de la disponibilidad de la serie de imágenes, se puede hacer el ejercicio de seleccionar las escenas que representan los diferentes niveles de los datos disponibles. Para las ventanas estudiadas, se analizaron las series disponibles de Landsat y se seleccionaron las escenas que representarían los niveles de interés. En otros casos los datos pueden ser más restringidos y se tiene que trabajar y sacar provecho de lo disponible.

7.4. Documento con la descripción y análisis de los resultados de la aplicación de los algoritmos y/o aplicaciones para el análisis de la fragmentación y conectividad hídrica en humedales de las ventanas de trabajo definidas. Productos de cartografía temática.

Los resultados del análisis y procedimientos son geográficamente explícitos, plasmados en la cartografía temática generada. Se generaron modelos de conectividad hídrica a partir de la clasificación de superficies de agua en el tiempo. Se realizaron interpretaciones de las intervenciones y perturbaciones en las planicies inundables estudiadas en las ventanas establecidas, prioridades del Fondo de Adaptación.

7.4.1. Clasificación agua – no agua

Como primer paso se deben construir las capas agua – no agua, para cada fecha estudiada. Para la aplicación se seleccionaron 5 fechas para las ventanas de Ariporo y Zapatosa. En la ventana de La Ciénaga de La Virgen, se priorizó en el análisis de intervención con infraestructura, ya que la dinámica del espejo de agua es menor al encontrarse directamente dependiente del mar, que no tiene mayor fluctuación. La dinámica de aumento en niveles se disminuyó al construirse la bocana



que mantiene una comunicación constante de la ciénaga con el mar, evitando el aumento del nivel del cuerpo de agua de la ciénaga por acumulación de la escorrentía de su cuenca.

Los píxeles de las capas raster de agua – no agua, tienen un valor de 1 y 0 respectivamente. Para la zona del Río Ariporo, en el momento de la clasificación de dos escenas inundadas, se diferenciaban cuerpos de agua profundos, de láminas de agua y suelos saturados. Los diferentes cuerpos de agua se pueden fusionar o mantener separados. Para este caso, se optó por reclasificar el agua laminar con valor de 1 y los cuerpos más profundos, con el valor de 2.

Para obtener las capas de agua – no agua, se realizan dos procedimientos, un tercer procedimiento puede realizarse para corregir zonas problemáticas. El primer procedimiento es el de la clasificación no supervisada. Se corrió con el algoritmo por defecto de mínima distancia pero se recomienda experimentar con diferentes ajustes para encontrar la mejor manera de diferenciar las superficies de agua de las terrestres. Con este procedimiento, se clasifica estadísticamente el contenido de las imágenes Landsat con 6 bandas o 3 bandas. Inicialmente se procedió a clasificar las imágenes con 6 bandas y se comparó el resultado de la clasificación de la misma imagen con 3 bandas y no hubo diferencias significativas en el resultado, por lo que se continuó el ejercicio con imágenes de 3 bandas, las correspondientes a 3, 4 y 5.

Se corrieron clasificaciones no supervisadas a las 10 imágenes seleccionadas. Se fijaron 11 clases en cada procesamiento. El resultado de la clasificación se contrastó clase por clase con la imagen base para diferenciar la cobertura de agua – no agua. En general las primeras 2 clases correspondían a agua. Finalmente las clases se reclasifican con valores de 0 y 1, y en el caso de Ariporo 0,1 y 2 para representar las superficies sin y con agua.

Cuando las escenas presentan algunas nubes y sombras, se pueden corregir manualmente. En el caso de Ariporo, las nubes y sombras fueron enmascaradas, digitalizando polígonos para corregir las clasificaciones. Por lo general las sombras pueden resultar como cuerpos de agua, lo cual se debe corregir.

7.4.2. *Capa de conectividad hídrica superficial*

Una vez construidas las capas de agua – no agua, se procede a sumarlas. Al sumar las capas, el valor resultante, muestra las veces que determinado pixel ha sido agua o no en el tiempo. En el



conjunto muestra donde ha ocupado el agua la planicie inundable. Las líneas de flujo se hacen evidentes, como las zonas con actividad y sin actividad de movimiento de agua.

Para la ventana de Zapatososa, se diferencia la planicie inundable y las laderas no inundables. Para la ventana de Ariporo, toda el área de estudio es en general inundable, por lo que esta diferenciación no se hace (Figura 29). Como la prioridad es sobre la planicie inundable se generaliza lo que se considera estar por fuera de esta, llamándolo ladera.

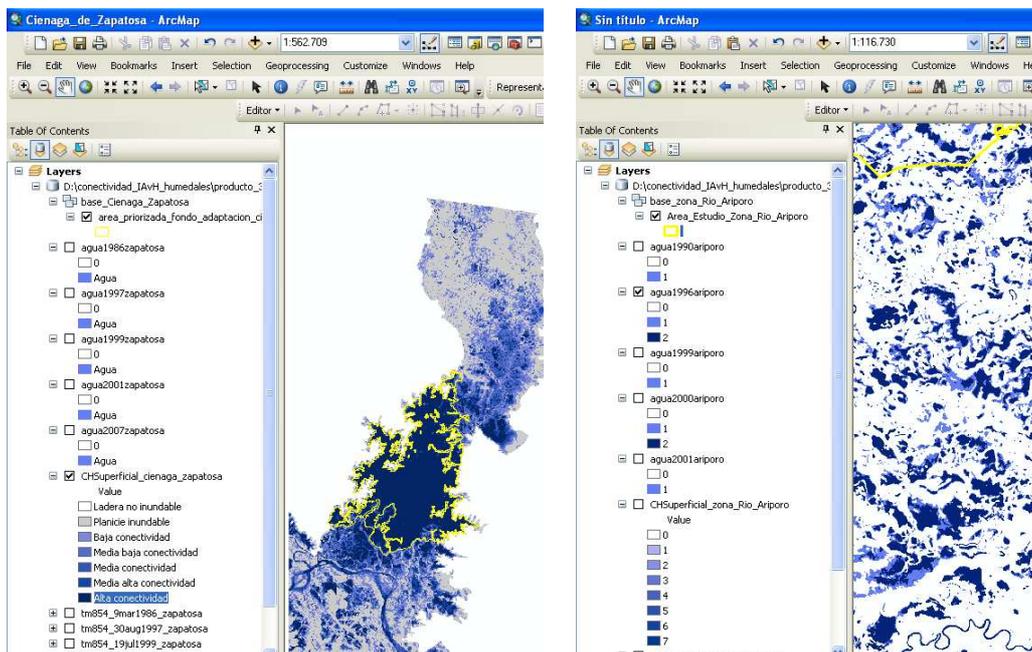


Figura 29 Visualización ventana de Zapatososa (Izquierda) y Ariporo (derecha)

7.4.3. Interpretación de intervenciones y perturbaciones

Para que la interpretación de las intervenciones sea posible, las imágenes deben mostrar indicadores de estas perturbaciones. Como principal objeto de interpretación en las fotografías aéreas pancromáticas están las vías, diques y terraplenes. Estas estructuras son evidentes en las fotografías aéreas como líneas blancas o más claras que su matriz agrícola o natural. Las zonas urbanizadas también tienen un tono blanco. Las canalizaciones se observan claramente al estar a lado y lado de un curso de agua, donde el agua es claramente contrastante con un tono oscuro a negro. Los diques y terraplenes menores al interior de las fincas se identifican con mayor claridad con una visualización e interpretación en 3D o con análisis estereoscópico.



Para el caso de La Virgen se realizó la interpretación de las fotografías aéreas con estereoscopio. Se interpretó una fotografía aérea de 1991, donde se seleccionó un área de estudio que se definió por estructuras existentes. La vía de la cordialidad, el canal El Pozón, la línea de manglar y una vía terciaria delimitan el área de estudio para el análisis de intervención. Los resultados muestran como aumentan las superficies urbanas, las canalizaciones, la construcción de diques, terraplenes y vías en el área de estudio. La construcción de diques y demás estructuras relacionadas son para el control de la escorrentía superficial, sea para acumulación o drenaje. La ocupación y construcción de estructuras de control del agua superficial, son resultado de un objetivo claro de adecuar la tierra para producir. El cambio de uso esta entonces implícito en donde se evidencie la intervención de zonas inundables y de transito de escorrentía superficial.

7.4.4. Interpretación de la planicie inundable

Las zonas que hacen parte de la unidad inundable son importantes identificar, al ser esta la unidad que contiene toda la actividad de los cuerpos de agua y humedales. Esta interpretación se realizó para la Ventana de Zapatosa con las mismas imágenes Landsat TM NASA utilizadas para las clasificaciones de agua. En los datos contenidos en estas imágenes, es posible visualizar diferencias de humedad presentes en las escenas. Al conocer las imágenes y con la experiencia diferenciar los tonos que refleja la humedad en el suelo, se puede diferenciar dónde el suelo presenta saturación y dónde no. Se utilizaron entonces las 5 escenas, sobre todo las que tienen niveles altos para interpretar la planicie inundable y las colinas al interior de la ciénaga.

7.4.5. Análisis de flujos de agua

Como resultado principal del análisis de la conectividad hídrica superficial, que se concentra en el análisis de la presencia del agua en la planicie inundable a lo largo del tiempo, se construyeron las capas de conectividad hídrica superficial. Estas capas muestran donde ha estado el agua y por donde se encuentra en épocas de verano o niveles bajos y por donde fluye.

Si se tiene la oportunidad de contar con datos de niveles del río y la ciénaga o cuerpo de agua estudiado, se pueden establecer relaciones entre los flujos que se dan entre ellos y conocer cuál unidad aporta agua a la otra dependiente de sus niveles. Por ejemplo en épocas secas las ciénagas pueden aportar agua a los ríos, lo que implica que el nivel de la ciénaga estará por encima del río para que el flujo se dé. En otros momentos el río aporta el agua a la ciénaga, donde el nivel del río es mayor y desborda hacia las ciénagas con niveles menores, hasta cuando se estabiliza el nivel



temporalmente. Con los datos del IDEAM en algunos casos se encuentra esta posibilidad, otra manera es establecer estaciones de monitoreo en cuerpos priorizados para su estudio y monitoreo. Se recomienda a las entidades ambientales adelantar este tipo de estudios para conocer y monitorear las dinámicas hídricas en los humedales de sus jurisdicciones.

En el caso de flujos subsuperficiales y la sequía en Paz de Ariporo, como no se cuenta con un monitoreo de la situación original y de la intervención de la zona, es muy difícil decir cuál es el estado del recurso hídrico, las afectaciones que ha tenido por la actividad petrolera y su escenario futuro queda en la incertidumbre.

7.4.6. Insumos desde lo social para complemento del análisis con sensores remotos y SIG.

Como queda demostrado el aporte del componente social es importante para complementar la visión parcial y análisis geográfico hecho con las imágenes de sensores remotos. Solo parte de la realidad física es captada por los satélites que ofrecen escenas estáticas. En la ventana de la Ciénaga de La Virgen, se contó con el valioso aporte de 3 actores en la cuenca. El primero de un poblador local que conoce y vive las dinámicas territoriales cotidianamente, describió el proceso de urbanización y ocupación de las zonas cercanas a la vía principal en la salida de Cartagena y comunicación con La Vía Cordialidad. También aportó con su conocimiento de los eventos de inundación que ha observado directamente.

El segundo aporte fue hecho por la directora de la fundación Eco Progreso dedicada al trabajo social y ambiental de la Ciénaga de La Virgen. En este caso resalto el hecho de pérdida de conectividad que ha tenido la Ciénaga por La Boquilla, zona de comunicación natural con el mar. A partir de sus investigaciones han identificado el delta de La Boquilla en la Ciénaga como lugar preferencial y prioritario para las aves. Los problemas de calidad de aguas, salinidad y futuros proyectos para mejorar el estado actual con mayor circulación con la construcción de otra comunicación con el mar al norte, fue una obra conocida en la conversación. De la misma manera el trazado del viaducto que está diseñado sobre el espejo de agua y el manglar. Al superponer la zona de importancia para las aves y el trazado de la vía, esta corta la unidad prioritaria identificada. El último aporte por un funcionario del aeropuerto, comentó sobre las obras de ampliación que contemplan tala y relleno de zonas de manglar y ciénaga.



Las narrativas de los habitantes locales de las zonas estudiadas aportan el conocimiento real. El complemento del análisis geográfico se debe hacer con insumos sociales que explican que ha pasado en el territorio y cuales han sido los principales hitos en el manejo y estado de los recursos naturales y ambiente. Las líneas de tiempo que se pueden armar con las narraciones locales, ubican sobre cuales fechas profundizar análisis, al marcar cambios sociales que llevan a cambios de uso de la tierra y viceversa.

7.4.7. *Geodatabase GDB y estructura*

Para un adecuado manejo y almacenamiento de la información para consultas y uso posterior, el IAvH ha propuesto un modelo sencillo para la estructuración de la geodatabase que contiene los datos geográficos de los estudios contratados. En primer lugar diferencia los productos resultantes de los insumos base en dos carpetas o grupos de datos llamados FEATURE DATASETS. Creados estos dos grupos de datos, la única capa base usada como insumo fue la delimitación del Fondo de Adaptación hecha para priorizar las zonas de trabajo a nivel nacional. Para la carpeta de resultados, para el caso de La Ciénaga de La Virgen, están los vectores interpretados y digitalizados como el área de estudio definida, las unidades de crecimiento urbano, las intervenciones, vías principales y la unidad preferencial para las aves según EcoProgreso. Para las otras dos ventanas, los resultados son en formato raster, que según la estructura IAvH deben ir por fuera de las carpetas, directamente en el primer plano de la geodatabase.



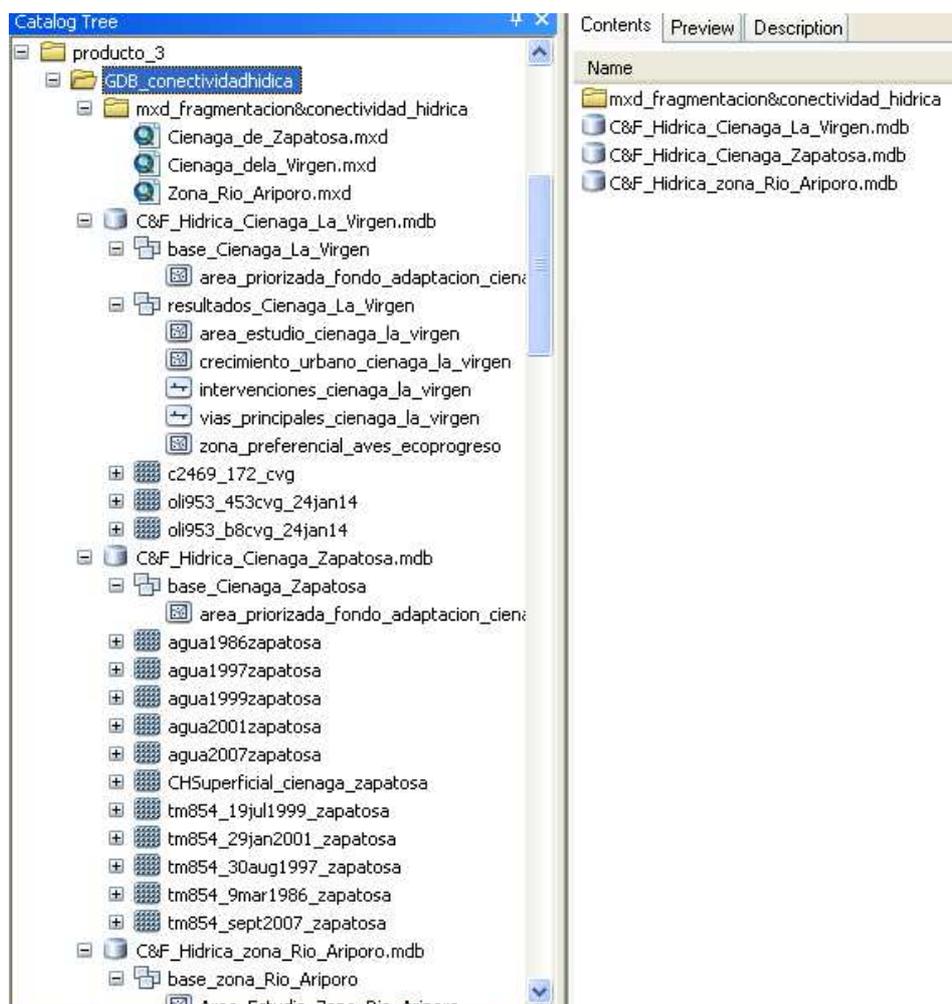


Figura 30 Estructura de la Geodatabase elaborada

En la parte derecha de la Figura 30 se observan las tres geodatabases elaboradas, una para cada ventana, como se menciona anteriormente la única ventana que contiene el FEATURE DATASET de RESULTADOS es la Ciénaga de La Virgen, donde se hizo el ejercicio de interpretación de las intervenciones. En la parte izquierda se puede observar el contenido y estructura de las bases de datos geográficas. Las imágenes de satélite, las clasificaciones de agua y los modelos de conectividad hídrica superficial se encuentran en formato raster. Los datos contenidos en los píxeles de las clasificaciones son 1 para agua y 0 para no agua. En el caso de Ariporo el 2 es para agua con fondos profundos y 1 para el agua laminar o superficial detectada en los momentos de



invierno. Los atributos para las capas interpretadas se encuentran en las tablas asociadas como texto. En una carpeta se ubican los archivos MXD para cada ventana de trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abell, R., Thieme, M. L., Revenga, C., Bryer, M., Kottelat, M., Bogutskaya, N., ... Petry, P. (2008). Freshwater Ecoregions of the World : A New Map of Biogeographic Units for Freshwater Biodiversity Conservation, *58*(5).
- Alma, F. (2014). *Identificación Cartográfica y Evaluación Socio-Ecológica Rápida de Humedales Asociados a la Llanura Aluvial del Rio Magdalena: Estudio de Caso en Complejos Cenagosos de los Municipios de Simiti, San Pablo y Cantagallo (Bolívar)*. Convenio de Cooperación No. 13-12-092-198CE Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt – IAvH y Fundación Alma. Convenio Interadministrativo 018 (12 – 092) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS – IAvH.
- Baldwin, D. S., & Mitchell, A. M. (2000). The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river–floodplain systems: a synthesis. *Regulated Rivers: Research & Management*, *16*(5), 457–467. doi:10.1002/1099-1646(200009/10)16:5<457::AID-RRR597>3.0.CO;2-B
- Bolker, B. M., Brooks, M. E., Clark, C. J., Geange, S. W., Poulsen, J. R., Stevens, M. H. H., & White, J.-S. S. (2009). Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution*. doi:10.1016/j.tree.2008.10.008
- Brooks, R., McKenney-Easterling, M., Brinson, M., Rheinhardt, R., Havens, K., O'Brien, D., ... Hite, J. (2009). A Stream-Wetland-Riparian (SWR) index for assessing condition of aquatic ecosystems in small watersheds along the Atlantic slope of the eastern U.S. *Environmental Monitoring and Assessment*, *150*(1-4), 101–117. doi:10.1007/s10661-008-0673-z
- Castello, L., McGrath, D. G., Hess, L. L., Coe, M. T., Lefebvre, P. a., Petry, P., ... Arantes, C. C. (2013). The vulnerability of Amazon freshwater ecosystems. *Conservation Letters*, *6*(4), 217–229. doi:10.1111/conl.12008
- Cottenie, K., & Meester, L. U. C. D. E. (2003). Connectivity and cladoceran species richness in a metacommunity of shallow lakes. *Freshwater Biology*, *48*, 823–832.
- Daniels, A. E., & Cumming, G. S. (2008). Conversion or conservation? Understanding wetland change in northwest Costa Rica. *Ecological Applications : A Publication of the Ecological Society of America*, *18*(1), 49–63.



- Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... E. Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129–151. doi:10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x
- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S., & Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2-4), 369–386. doi:10.1016/j.agee.2005.11.013
- Gehrke, P. C., Gilligan, D. M., & Barwick, M. (2002). Changes in fish communities of the Shoalhaven River 20 years after construction of Tallowa Dam, Australia. *River Research and Applications*, 18(3), 265–286. doi:10.1002/rra.669
- Gibbes, C., Southworth, J., & Keys, E. (2009). Wetland conservation: Change and fragmentation in Trinidad's protected areas. *Geoforum*, 40(1), 91–104. doi:10.1016/j.geoforum.2008.05.005
- Golden, H. E., Lane, C. R., Amatya, D. M., Bandilla, K. W., Raanan Kiperwas, H., Knightes, C. D., & Ssegane, H. (2014). Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods. *Environmental Modelling and Software*, 53, 190–206. doi:10.1016/j.envsoft.2013.12.004
- Hollis, G. E., Holland, M. M., Maltby, E., & Larson, J. S. (1988). Wise use of wetlands - reprint of a classic article, XXIV(1).
- IDEAM. (1998). *El medio ambiente en Colombia* (p. 543).
- Januchowski-Hartley, S. R., McIntyre, P. B., Diebel, M., Doran, P. J., Infante, D. M., Joseph, C., & Allan, J. D. (2013). Restoring aquatic ecosystem connectivity requires expanding inventories of both dams and road crossings. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(4), 211–217. doi:10.1890/120168
- Jorgensen, S. . V. R. . (1989). Vol.1_Principios_de_Lake_Management.pdf.
- Kamlum K.U. Phua M.H. (2010). *Evaluating peat swamp forest fragmentation in Beaufort, Sabah using multitemporal satellite remote sensing* (pp. 1–8).
- Ke, C.-Q., Zhang, D., Wang, F.-Q., Chen, S.-X., Schmutlius, C., Boerner, W.-M., & Wang, H. (2010). Analyzing coastal wetland change in the Yancheng National Nature Reserve, China. *Regional Environmental Change*, 11(1), 161–173. doi:10.1007/s10113-010-0130-8
- Landeros, J. (2007). Cuantificación de la fragmentación del paisaje y su relación con Sustentabilidad (, 2(1), 26–38.
- Looy, V. K. H. O. P. B. M. S., & Looy, K. Van. (2007). ORDER AND DISORDER IN THE RIVER CONTINUUM. In *Order and disorder in the river continuum* (pp. 73–95).



- Mack, J. J. (2006). Landscape as a predictor of wetland condition: an evaluation of the Landscape Development Index (LDI) with a large reference wetland dataset from Ohio. *Environmental Monitoring and Assessment*, 120(1-3), 221–41. doi:10.1007/s10661-005-9058-8
- Magnuson, J., Benson, B., & Kratz, T. (2004). Patterns of coherent dynamics within and between lake districts at local to intercontinental scales. *Boreal Environment Research*, 9(October), 359–369. Retrieved from <http://www.borenv.net/BER/pdfs/ber9/ber9-359.pdf>
- Mao, X. F., & Cui, L. J. (2012). Reflecting the importance of wetland hydrologic connectedness: a network perspective. *Procedia Environmental Sciences*, 13(2011), 1315–1326. doi:10.1016/j.proenv.2012.01.124
- Martin, S. L., & Soranno, P. a. (2006). Lake landscape position: Relationships to hydrologic connectivity and landscape features. *Limnology and Oceanography*, 51(2), 801–814.
- Millenium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems AND HUMAN WELL-BEING: Synthesis* (p. 155). Washingtons D.C.
- Mita, D., Dekeyser, E., Kirby, D., Easson, G., Sciences, R., & Dakota, N. (2007). DEVELOPING A WETLAND CONDITION PREDICTION MODEL USING LANDSCAPE STRUCTURE VARIABILITY, 27(4), 1124–1133.
- Montoya, J. V., Roelke, D. L., Winemiller, K. O., Cotner, J. B., & Snider, J. a. (2006). Hydrological seasonality and benthic algal biomass in a Neotropical floodplain river. *Journal of the North American Benthological Society*, 25(1), 157–170.
- N., M. (2007). ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE ECOSISTEMAS : ACUATICOS CONTINENTALES LENTICOS.
- Palmer, M. a., Bernhardt, E. S., Allan, J. D., Lake, P. S., Alexander, G., Brooks, S., ... Sudduth, E. (2005). Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 42(2), 208–217. doi:10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x
- Papa, F., Prigent, C., Durand, F., & Rossow, W. B. (2006). Wetland dynamics using a suite of satellite observations: A case study of application and evaluation for the Indian Subcontinent. *Geophysical Research Letters*, 33(8), L08401. doi:10.1029/2006GL025767
- Pringle, C. (2003). What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes*, 17(13), 2685–2689. doi:10.1002/hyp.5145
- Pringle, C. M. (2001). Hydrologic Connectivity and the Management of Biological Reserves: a Global Perspective. *Ecological Applications*, 11(4), 981–998.
- R., T. R. E. (1990). Relationships between wetland fragmentation and recent hydrologic changes in a Deltaic Coast. *Estuaries*, 272–281.
- Robinson, C. T., Tockner, K., & Ward, J. V. (2002). The fauna of dynamic riverine landscapes. *Freshwater Biology*, 47(4), 661–677. doi:10.1046/j.1365-2427.2002.00921.x



- S., T. (2007). Quantifying the Change Detection of the Uluabat Wetland , Turkey , by Use of Landsat Images. *Ekoloji*, 16(64), 9–20.
- Sedell J.R. Richey J.E. Swanson F.J. (1989). The River continuum concept: A basis for the expected excosystem behaviour of very large rivers? *Proceedings of the International Large River Symposium*, 49–55.
- Seto, K. C., & Fragkias, M. (2007). Mangrove conversion and aquaculture development in Vietnam: A remote sensing-based approach for evaluating the Ramsar Convention on Wetlands. *Global Environmental Change*, 17(3-4), 486–500. doi:10.1016/j.gloenvcha.2007.03.001
- SIAC. (2001). *Perfil del Estado de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente en Colombia 2001* (p. 546).
- Søndergaard, M., & Jeppesen, E. (2007). Anthropogenic impacts on lake and stream ecosystems, and approaches to restoration. *Journal of Applied Ecology*, 44(6), 1089–1094. doi:10.1111/j.1365-2664.2007.01426.x
- T Findlay, C. S., & Bourdages, J. (2000). Response Time of Wetland Biodiversity to Road Construction on Adjacent Lands. *Conservation Biology*, 14(1), 86–94. doi:10.1046/j.1523-1739.2000.99086.x
- TEEB. (2010). *Mainstreaming the economics of nature* (p. 39).
- Thoms, M. C. (2003). Floodplain-river ecosystems: Lateral connections and the implications of human interference. *Geomorphology*, 56(3-4), 335–349. doi:10.1016/S0169-555X(03)00160-0
- Thoms, M. C., Southwell, M., & McGinness, H. M. (2005). Floodplain–river ecosystems: Fragmentation and water resources development. *Geomorphology*, 71(1-2), 126–138. doi:10.1016/j.geomorph.2004.10.011
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., & Cushing, C. E. (1980). The River Continuum Concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(1), 130–137. doi:10.1139/f80-017
- Verones, F., Saner, D., Pfister, S., Baisero, D., Rondinini, C., & Hellweg, S. (2013). Effects of Consumptive Water Use on Biodiversity in Wetlands of International Importance. *Environmental Science & Technology*, 47(21), 12248–12257. doi:10.1021/es403635j
- Ward J.V. Stanford J.A. (n.d.). the serial discontinuity concept of lotic ecosystems.
- Ward, J. V, Malard, F., & Tockner, K. (2002). Landscape ecology : a framework for integrating pattern and process in river corridors, 17, 35–45.
- Ward, J. V, Tockner, K., & Schiemer, F. (1999). BIODIVERSITY OF FLOODPLAIN RIVER ECOSYSTEMS : ECOTONES. *Regulated Rivers-Research & Management*, 15(May 1998), 125–139. Retrieved from <Go to ISI>://WOS:000079497200010



Wiens, J. a. (2002). Riverine landscapes: taking landscape ecology into the water. *Freshwater Biology*, 47(4), 501–515. doi:10.1046/j.1365-2427.2002.00887.x

Woolsey, S., Capelli, F., Gonser, T. O. M., Hoehn, E., Hostmann, M., Junker, B., ... Peter, A. (2007). A strategy to assess river restoration success. *Freshwater Biology*, 52(4), 752–769. doi:10.1111/j.1365-2427.2007.01740.



PRODUCTO: ALGORITMOS Y APLICACIONES PARA EL
MONITOREO DE VARIABLES ESENCIALES DE LA
BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES

PROTOCOLO PARA LA DESCARGA DE IMÁGENES DE SENSORES REMOTOS

Cesar Augusto Valbuena Calderón

Centro de Análisis y Síntesis (CAS) - Laboratorio de Análisis Espacial

Programa de Gestión de Información y Conocimiento

Instituto Humboldt

Julio de 2014



TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....3

1. Imágenes de satélite MODIS4

1.1 Descarga de datos MODIS usando Reprojection Tool on the Web (MRTWeb).....4

1.1.1 Procedimiento.....5

1.1.1.1. Seleccionar.....5

1.1.1.3 Descarga imágenes.....7

1.2 Descarga de datos MODIS usando Python.....8

1.3 Descarga de datos MODIS usando Software R.....10

1.3.1 Instalación de software.....11

1.3.2 1.3.2 Descarga de MODIS - HDF.....11

1.4 Descarga imágenes de satélite “LANDSAT”.....14

1.4.1 EarthExplorer.....14

1.4.1.1 Login.....14

1.4.1.2 Criterios de Búsqueda.....15

1.4.1.3 Introducir criterios adicionales – Tab.....16

1.4.1.4 Resultados de Búsqueda – Tab.....17

1.4.2. GLOVIS: The USGS Global Visualization Viewer.....18

Literatura citada.....21



INTRODUCCIÓN

Los Sensores Remotos permiten capturar información de los objetos sin tener un contacto directo con ellos, su uso en aplicaciones sobre Recursos Naturales tiene una larga data, dado que proporcionan información confiable sobre superficies extensas con alta precisión y costos razonables. El uso de sensores remotos ha jugado un importante rol en la construcción de mapas, planos, interpretación de recursos y sus superficies, planificación territorial y estudios urbanos (Chuvienco, 1992). La tendencia actual es hacia el incremento de su utilización dado el avance tecnológico, el desarrollo de la computación y bajos costos de obtención de imágenes. Ellos pueden desenvolverse en forma conjunta o separada, y su utilización puede abarcar un amplio conocimiento del espectro. Hoy en día, podemos encontrar diversas experiencias a nivel mundial, tanto en el ámbito privado como público y no cabe duda que será una herramienta para traspasar el umbral del desarrollo que nuestro país requiere.

Como la información de Landsat y MODIS es de libre acceso, se presenta la importancia de utilizar esta herramienta para la obtención de información geográfica, todo resulta de la necesidad de conocer e identificar áreas específicas en las que no se cuenta con los correspondientes datos descriptivos de una región. En estas condiciones, resulta ser una innovación tecnológica novedosa, la cual se puede aprovechar para el monitoreo de la biodiversidad. La importancia de MODIS está en suministrar información nueva con el fin de analizar variables o fenómenos terrestres, oceánicos y atmosféricos. La siguiente ayuda didáctica tipo manual, la cual facilitara la navegabilidad en el sitio Web, de donde el usuario obtendrá la información requerida del sensor remoto de interés.

1. Imágenes de satélite MODIS

Los instrumentos de MODIS se diseñaron con las habilidades y los subsistemas siguientes:

- Captura de imágenes del océano, atmósfera, y tierra en un solo instrumento.
- 1000m, 500m y 250m de resolución en las bandas espectrales.
- Rango de las longitudes de onda de las bandas entre 0.4 y 14 um, respuesta en low out-band.¹

¹ <https://lpdaac.usgs.gov/>. Consulta: 1 de Agosto de 2013.



La Resolución espacial de MODIS es:

250 m (bandas 1-2)

500 m (bandas 3-7)

1000 m (bandas 8-36)

Periodo de Diseño: 6 años

El LP DAAC ha desarrollado una herramienta para la rápida búsqueda de datos MODIS y servicios de entrega mediante la combinación de la búsqueda, visualización y funciones de selección del Global Visualization Viewer (GLOVIS) con mosaicos, espacial subconjuntos, subconjuntos banda, reproyección, remuestreo y reformatting funciones de la herramienta de reproyección MODIS (MRT).

1.1 Descarga de datos MODIS usando Reprojection Tool on the Web (MRTWeb)

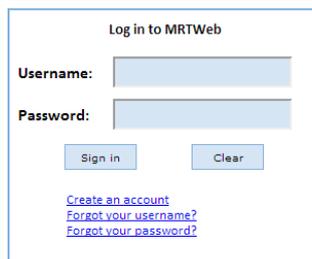
MRTWeb se empezó a utilizar en febrero de 2009 y algunas características son:

- Reutilización de MRT y GLOVIS
- Permite a los usuarios seleccionar fácilmente y rápidamente, mosaicos, nuevos proyectos, resamplear, formatear y seleccionar un área de interés de la imagen MODIS.²

1.1.1 Procedimiento:

Inicialmente para acceder al programa MRTWeb se debe estar registrado y crear un usuario con sus datos personales.

USGS MODIS Reprojection Tool Web Interface (MRTWeb)



The screenshot shows a login form titled "Log in to MRTWeb". It contains two input fields: "Username:" and "Password:". Below the fields are two buttons: "Sign in" and "Clear". At the bottom of the form, there are three links: "Create an account", "Forgot your username?", and "Forgot your password?".

Figura 1. Ventana de registro de ingreso a MRTWeb

1.1.1.1. Seleccionar

² <http://mrtweb.cr.usgs.gov/>. Consulta: 1 de Agosto de 2013.



Seleccione en el programa MRTWeb el producto MODIS, fechas y las bandas de interés. Seleccione varios tiles adyacentes de la misma fecha para construir grandes mosaicos de la zona, o varias fechas del mismo tile para construir una serie de menor tiempo.³

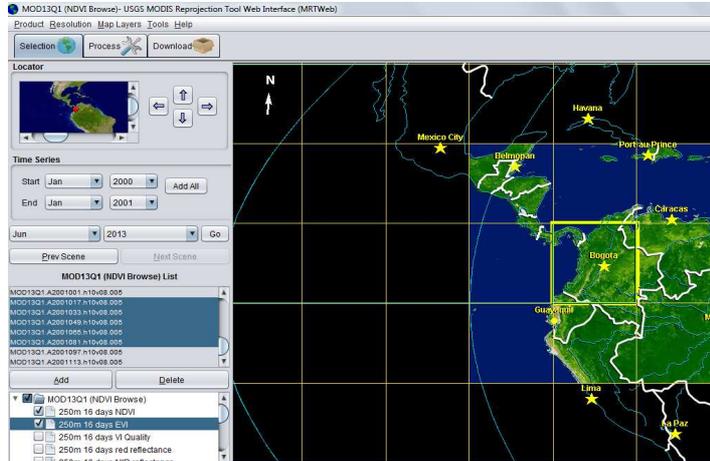
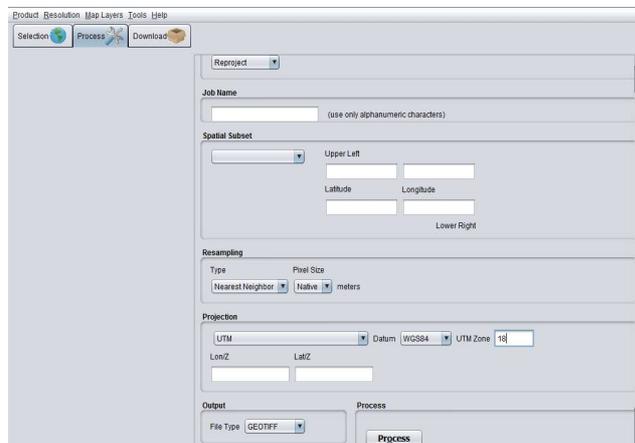


Figura 2. Ejemplo de búsqueda, visualización y selección de datos MODIS con MRTWeb.

1.1.1.2 Procesar

Seleccione la ventana “process” para empezar a procesar en MRTWeb. Especifique la proyección, subconjuntos espacial, remuestreo y opciones de formato.



³ https://lpdaac.usgs.gov/data_access/mrtweb. Consulta: 2 de Agosto de 2013

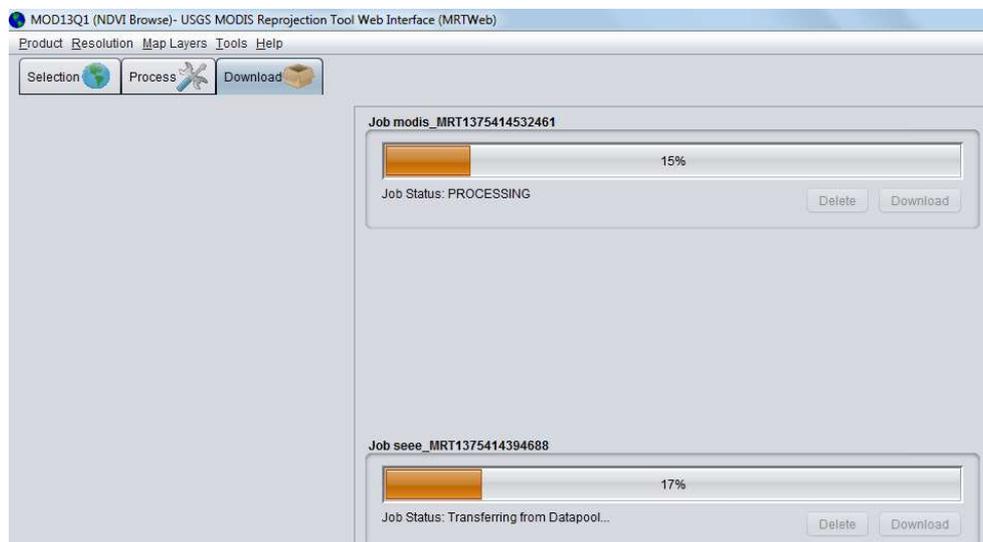


Figura 3. Un ejemplo de especificación de las opciones de procesamiento definidos por el usuario

En este caso los datos seleccionados MODIS en la figura 2, inicialmente se crea un mosaico y se reproyecta a UTM zona 18 utilizando interpolación de vecino más cercano con resolución de 250 m. Las imágenes de salidas si se requiere pueden ser cortadas a un subconjunto espacial determinado y se obtienen en formato GeoTiff. Actualmente, MRTWeb tiene disponible catorce proyecciones y tres output formatos de archivos (es decir, HDF-EOS, GeoTIFF y binario).

1.1.1.3 Descarga imágenes

La opción descarga MRTWeb proporciona el estado del procesamiento y un FTP-enlace a su producto (s) cuando haya terminado. En MODIS los registros de procesamiento, y los parámetros de procesos son también disponibles para descarga (Figura 4).



FTP directory /jobpull/CentAf_mos_MRT1285083813474 at mrtwebftp.cr.usgs.gov

To view this FTP site in Windows Explorer, click [Page](#), and then click [Open FTP Site in Windows Explorer](#).

[Up to higher level directory](#)

09/21/2010 10:43AM	48,511,287	MCD43A4_A2007217_h26v09_005_2007236061535_hdf
09/21/2010 10:43AM	48,396,750	MCD43A4_A2007217_h26v09_005_2007236035004_hdf
09/21/2010 10:43AM	50,908,982	MCD43A4_A2007217_h26v09_005_2007237022021_hdf
09/21/2010 10:43AM	56,901,624	MCD43A4_A2007217_h26v09_005_2007236094454_hdf
09/21/2010 10:44AM	47,549,221	mos_ftp_pull.tiff
09/21/2010 10:44AM	47,549,221	MCD43A4_NRTWEB_A2007217_005_Nadir_Reflectance_Band1.tif
09/21/2010 10:44AM	47,549,221	MCD43A4_NRTWEB_A2007217_005_Nadir_Reflectance_Band2.tif
09/21/2010 10:44AM	47,549,221	MCD43A4_NRTWEB_A2007217_005_Nadir_Reflectance_Band3.tif
09/21/2010 10:44AM	47,549,221	MCD43A4_NRTWEB_A2007217_005_Nadir_Reflectance_Band4.tif
09/21/2010 10:44AM	47,549,221	MCD43A4_NRTWEB_A2007217_005_Nadir_Reflectance_Band5.tif
09/21/2010 10:44AM	47,549,221	MCD43A4_NRTWEB_A2007217_005_Nadir_Reflectance_Band6.tif
09/21/2010 10:44AM	47,549,221	MCD43A4_NRTWEB_A2007217_005_Nadir_Reflectance_Band7.tif
09/21/2010 10:43AM	2,486	TepMosaicCentAf_mos_MRT1285083813474_1_104343.log
09/21/2010 10:43AM	428	TepMosaicCentAf_mos_MRT1285083813474_1_104343.prm
09/21/2010 10:44AM	3,578	TepParamCentAf_mos_MRT1285083813474_1_104403.log
09/21/2010 10:44AM	424	TepParamCentAf_mos_MRT1285083813474_1_104403.prm

Figura 4. Ventana donde se observa el estado del trabajo en MRTWeb y pantallas de descarga para un mosaico.



1.2 Descarga de datos MODIS usando Python

Recientemente, fue creado un programa (código) para descargar en python imágenes MODIS. Con este programa se descarga de datos MODIS conectado con website de USGS usando HTTP. El programa puede descargar datos para un determinado año tanto imágenes diarias, mensuales o de 8 días. Para esto solo se necesita el nombre del producto (numero de colección), el año, la referencia MODIS (title) y adicionalmente indicar donde se quiere que se guarde las imágenes. El usuario también puede seleccionar un intervalo de tiempo de días de un determinado año. El script es muy simple de usar: sólo se debe inicialmente llamar con la opción-h.⁴

- En una carpeta copie el programa a ejecutar get_modis-1.3.0 y cree un acceso directo a la línea de comando cmd.exe (Figura 5).



Figura 5. Archivos utilizados en la descarga de imágenes

- **Este es un ejemplo de cómo debe ir en la consola (CMD)**

```

$ ./get_modis.py -h
Usage
  
```

SYNOPSIS

```

./get_modis.py [-h,--help] [--verbose, -v] [--platform=PLATFORM, -s PLATFORM] [--product=PRODUCT, -p PRODUCT] [--tile=TILE, -t TILE] [--year=YEAR, -y YEAR] [--output=DIR_OUT, -o DIR_OUT] [--begin=DOY_START, -b DOY_START] [--end=DOY_END, -e DOY_END]
  
```

Ejemplo:

El siguiente es un ejemplo para descargar imágenes sobre surface reflectance desde la plataforma TERRA para el tile h17v04 del año 2004, entre el DoY 153 y 243:

⁴ http://github.com/jgomezdans/get_modis/. Consulta: 5 de Agosto de 2013.



```
$ ./get_modis.py -v -p MOD09GA.005 -s MOLT -y 2004 -t h17v04 -o /tmp/ -b 153 -e 243
```

Este script también se utiliza para descargar composiciones de datos mensuales o de cada 8 días. Este es otro ejemplo para descargar el producto mensual MCD45A1 (burned area) para el mismo periodo:

```
$ ./get_modis.py -v -p MCD45A1.005 -s MOTA -y 2004 -t h17v04 -o /tmp/ -b 153 -e 243
```

EXIT...

Opciones:

--help, -h	Muestra opciones de ayuda
--verbose, -v	salida detallada
--platform=PLATFORM, -s	Plataforma
o	Tipo plataforma o sensor: MOLA (agua), MOLT (Combinado) or MOTA (terra)
--product=PRODUCT, -p	PRODUCTO MODIS producto nombre (e.g. MOD09GA.005)
--tile=TILE, -t	TILE Requerido tile (por ejemplo: h17v04,)
--year=YEAR, -y	YEAR Años de interés
--output=DIR_OUT, -o	DIR_OUT Directorio de salida
--begin=DOY_START, -b	DOY_START Starting day of year (DoY)
--end=DOY_END, -e	DOY_END Ending day of year (DoY)

Así, se puede ver en los ejemplos anteriores que en realidad es muy fácil de usar el script⁵.

Para crear el mosaico de las imágenes descargadas utilice el script: modis_mosaic.py.
modis_mosaic.py -m /path/to/mrt/ -o /tmp/outputfile /tmp/listfileMOD11A1.005.txt

Nota: /path/to/mrt/ es el directorio donde Modis Reprojection Tools es almacenado.

Para convertir el mosaico de HDF a Geotiff se debe usar el script: modis_convert.py
modis_convert.py -s '(1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1)' -m /path/to/mrt/
-o /tmp/finalfile.tif -g 250 /tmp/outputfile.hdf5

1.3 Descarga de datos MODIS usando Software R.

A continuación se explica cómo automatizar la descarga, de productos MODIS a un SIG. Para lo cual nos centramos en el uno de los más conocidos productos MODIS para aplicaciones ambientales terrestres: el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), que es la mejora de NDVI (Huete et al, 2002). EVI corrige las distorsiones de la luz reflejada causada por las partículas en el aire, así como la cobertura del suelo por debajo de la vegetación. El EVI tampoco se satura con tanta facilidad como el NDVI durante la

⁵ <http://pymodis.fem-environment.eu/>. Consulta: 4 de Agosto de 2013.



visualización de las selvas y otras áreas con grandes cantidades de clorofila. EVI puede estar directamente relacionado con la producción fotosintética de las plantas, e indirectamente a la biomasa verde (Huete et al., 2002). Mediante la observación de la dinámica de EVI para un área de superficie de la Tierra, podemos inferir acerca de las dinámicas de la vegetación dentro de la temporada, sino también detectar las tendencias a largo plazo y los cambios repentinos en la biomasa (por ejemplo, debido a los incendios forestales, la deforestación, el crecimiento urbano y similares).

La importancia del índice de MODIS EVI para la gestión ambiental y la conservación de la naturaleza es enorme (Lunetta et. Al 2006). Imágenes MODIS se puede conseguir cualquiera en cualquier momento y pueden ser utilizados como una fuente independiente de información para demostrar la degradación de los sistemas naturales que posiblemente no son visibles a partir de fuentes locales de información. Imágenes MODIS EVI se pueden utilizar para probar los cambios en la cobertura del suelo, la deforestación, los daños causados por el calentamiento global o los procesos de sucesión aun finos a largo plazo. MODIS EVI está disponible desde el año 2000.

MODIS_download.R: R script para descargar automáticamente, mosaico y remuestreo MODIS a algún sistema de proyección local.

MRT_download_Win.zip: Herramienta de remuestreo MODIS.

Al ajustar este script en R, se podrá automatizar la descarga y preparar todo tipo de productos MODIS para su propia aplicación en mapas.

1.3.1 Instalación de software

Antes de que pueda empezar a descargar imágenes MODIS EVI en R, es necesario obtener e instalar algunos paquetes y bibliotecas de investigación:

RCurl --- permite listar directorios en un servidor FTP

wget --- permite automatizar la descarga de imágenes a partir de R,

Nota: asegúrese de desactivar las herramientas antivirus como Norton o McAfee de lo contrario podría bloquearse wget de ejecución.

MRT --- herramienta MODIS para reproyectar se puede utilizar para realizar mosaicos de imágenes MODIS, volver a muestrear a otros sistemas de coordenadas y exportar las imágenes a otros formatos comunes de SIG.

Una vez que haya terminado de instalar estos dos paquetes, también es necesario especificar la ubicación del MRT y el directorio donde desea emitir todos los mapas EVI que se producen:

- > Library (RCurl)
- > Library (rgdal)



```
> MOD13A3 <- "ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD13A3.005/"
> MOD13A3a <- "ftp://anonymous:test @ e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD13A3.005/"
MRT> <- "E:\\\\MODIS MRT\\bin\\'# MODIS reproyección exe Herramienta
> Workd <- "E:\\ PineBeetleBC\\MODIS\\" directorio de trabajo #
```

1.3.2 Descarga de MODIS - HDF

Imágenes MODIS se distribuyen normalmente como HDF (Formato de datos jerárquica) 10 por 10 arc degree-tiles, proyectadas en la proyección Sinusoidal (proyección Sinusoidal que ha sido promovido por los geógrafos como la proyección más adecuada para bases de datos de imágenes globales; Por lo tanto, antes de utilizar imágenes MODIS, tendrá que ejecutar algún tratamiento previo para pegar y coaccionar a los datos en un formato más fácil de usar. Por ejemplo si estuviéramos interesados en obtener imágenes mensuales MODIS EVI (este conjunto de datos se conoce con el nombre de "MOD13A3") de un 1 kilometro resolución, se debe volver a muestrear a nuestro sistema de proyección local (EPSG: 32617), y luego exportarlos a un formato GIS más comunes, a saber cómo GeoTiff.

Los MOD13A3 se pueden consultar / obtenerse directamente a través del servidor FTP de la NASA. Se inicia buscando en la lista de subdirectorios (la fecha) de interés:

```
# get the list of directories (thanks to Barry Rowlingson):
> items <- strsplit(getURL(MOD13A3), "\n")[[1]]
> items[2]
[1] "drwxr-xr-x  2 90 118784 Jan  5  2009 2000.02.01\r"
# you get the folders (and files) but the folder names are in the form of
# get the last word of any lines that start with 'd':
> folderLines <- items[substr(items, 1, 1)=='d']
# get the directory names and create a new data frame:
> dirs <- unlist(lapply(strsplit(folderLines, " "), function(x){x[length
> dates <- data.frame(dirname=unlist(strsplit(dirs, "\r")))
```

Luego, se necesita conocer la posición de los bloques de MODIS h / v.



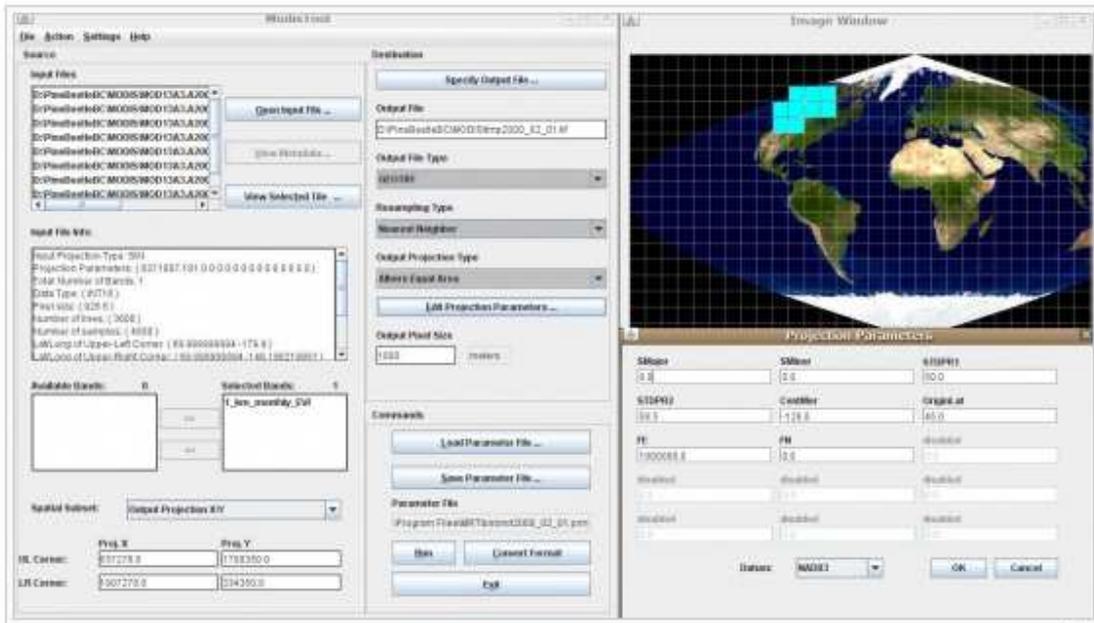


Figura 6: Sistema MODIS en MRT indicando en el mapa la posición h/v.

Cada mosaico MODIS tiene un nombre único. Podemos hacer una lista de directorios y obtener los nombres completos de los títulos en el FTP mediante la combinación de los métodos get URL y grep:

```

> getlist <- strsplit(getURL(paste(MOD13A3, dates$dirname[[1]], "/", sep=
+ .opts=curlOptions(ftplisonly=TRUE)), "\r\n")[[1])
> str(getlist)
chr [1:1144] "BROWSE.MOD13A3.A2000032.h00v08.005.2006271174446.1
> getlist[1101:1102]
## [1] "MOD13A3.A2000032.h31v10.005.2006271174005.hdf"
## [2] "MOD13A3.A2000032.h31v10.005.2006271174005.hdf.xml"
  
```

En este ejemplo, el directorio:

"ftp://e4ftl01u.ecs.nasa.gov/MOLT/MOD13A3.005/2000.02.01/" contiene un total de 1.144 archivos. Si desea obtener sólo los nombres de los archivos HDF (9 titles) para algún área de interés. Estos pueden ser obtenidos utilizando el método grep:

```

> BLOCK1 <- getlist[grep(getlist, pattern="MOD13A3.*h09v03.*.hdf") [1]]
> BLOCK2 <- getlist[grep(getlist, pattern="MOD13A3.*h09v04.*.hdf") [1]]
...
> BLOCK9 <- getlist[grep(getlist, pattern="MOD13A3.*h12v02.*.hdf") [1]]
> BLOCK1
[1] "MOD13A3.A2000032.h09v03.005.2006271173514.hdf"
  
```



Se observa solo el primer archivo (HDF). El segundo archivo con el mismo nombre lleva a los metadatos de producción (tanto del HDF y se puede leer ya desde el nombre de archivo, consulte las convenciones de nomenclatura MODIS).

A continuación, podemos descargar cada title con el método download.file, y con la ayuda del paquete wget (es necesario descargar la exe wget en el directorio de sistema de

```
> download.file(paste(MOD13A3a, dates$dirname[[i]], "/", BLOCK1, sep=""),
+ destfile=paste(getwd(), "/", BLOCK1, sep=""), mode='wb', method='wget',
--2009-03-01 18:21:37-- ftp://anonymous:*password*@e4ftl01u.ecs.nasa.gov
=> `D:/PineBeetleBC/MODIS/MOD13A3.A2000032.h09v03.005.20062711'
Resolving e4ftl01u.ecs.nasa.gov... 152.61.4.83
Connecting to e4ftl01u.ecs.nasa.gov|152.61.4.83|:21... connected.
Logging in as anonymous ... Logged in!
==> SYST ... done. ==> PWD ... done.
==> TYPE I ... done. ==> CWD /MOLT/MOD13A3.005/2000.02.01 ... done.
==> SIZE MOD13A3.A2000032.h09v03.005.2006271173514.hdf ... 3523318
==> PASV ... done. ==> RETR MOD13A3.A2000032.h09v03.005.2006271173514
Length: 3523318 (3.4M)
```

Windows, de lo contrario no será capaz de descargar las fichas del R):

1.4 Descarga imágenes de satélite “LANDSAT”

Existen varios portales para descargar imágenes Landsat en internet. Los más utilizados son los siguientes:

1.4.1 EarthExplorer

La aplicación está disponible para descargar a través de la EarthExplorer y discos duros. El usuario para descargar debe ser un usuario registrado de la Sistema EarthExplorer⁶.

1.4.1.1 Login

El proceso de registro permite al usuario registrado iniciar sesión en el sistema EarthExplorer. Como se mencionó anteriormente, como usuario registrado, puede utilizar todas las características del EarthExplorer, incluyendo la capacidad de guardar los criterios de búsqueda y los resultados, los datos de descarga, el acceso a servicios de suscripción y guardar parámetros específicos que usted desea.

1.4.1.2 Criterios de Búsqueda

El sistema EarthExplorer permite a los usuarios buscar, descargar y ordenar datos a través de una serie de opciones de consulta. El EarthExplorer utiliza pestañas en la

⁶ <http://earthexplorer.usgs.gov>. Consulta: 6 de Agosto de 2013.



aplicación para facilitar paso a paso a través de cada parte del proceso de búsqueda. El Proceso de búsqueda EarthExplorer se divide en cuatro (4) áreas principales:

- Criterios de Búsqueda - Proporciona la interfaz para la introducción de diversas opciones de búsqueda.
- Los conjuntos de datos - Proporciona la interfaz para seleccionar el tipo de datos que el usuario esté interesado.
- Criterios adicionales - Proporciona una interfaz para la introducción de criterios adicionales de búsqueda específica para el conjunto de datos seleccionado.
- Resultados - Proporciona la interfaz para mostrar una vista textual y gráfica de la resultados de la consulta.



Figura 7. EarthExplorer opciones de Búsqueda.

La ficha Criterios de búsqueda permite al usuario introducir sus criterios de búsqueda para el área o ubicación están interesados. Los usuarios tienen la opción de entrar en su búsqueda mediante la introducción de criterios en la información textual en los criterios de búsqueda en el panel de pestañas, o por medio de la interfaz de Google Map.

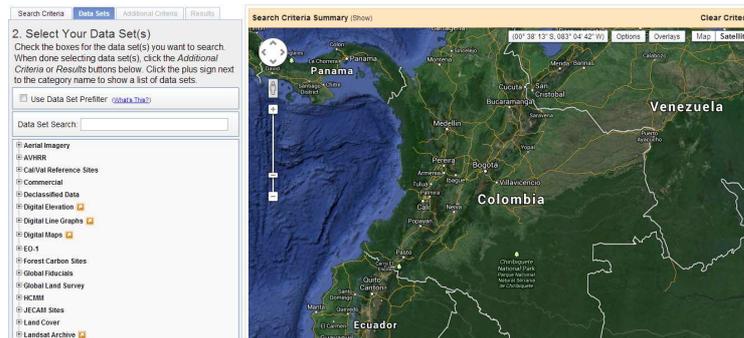


Figura 8 - Vista de búsqueda EarthExplorer

Las opciones de criterios de búsqueda incluyen:

- Google Map Interface - Permite al usuario introducir su área de interés a través de la Google interfaz de mapa.
- Dirección / Lugar - Permite al usuario introducir una dirección o ciudad.
- Área Seleccionada - Permite al usuario introducir las coordenadas para definir su área de interés. Además, esta zona se actualiza cuando la selección de áreas en



el mapa, o cuando se introduce una dirección o ciudad.

- Número de registros para volver - Permite al usuario modificar el número de escenas para volver de una búsqueda.

1.4.1.3 Introducir criterios adicionales - Tab

La ficha Criterios adicional es un área de entrada opcional que permite la entrada de búsqueda adicional criterios para el conjunto de datos (s) seleccionados. Seleccionar la pestaña "Criterios adicionales" muestra el primeros conjunto de datos forman.

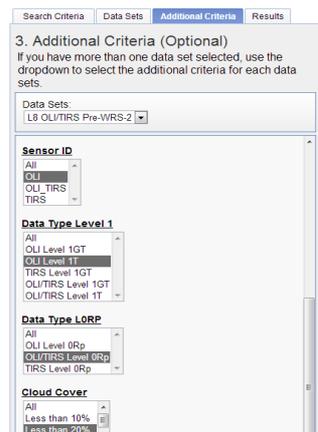


Figura 9. Ejemplo de formato para criterios adicionales

1.4.1.4 Resultados de Búsqueda - Tab

La ficha Vista Resultados muestra los resultados de los criterios de búsqueda especificados para el área o ubicación identificada. El panel de resultados muestra la imagen y la información textual para cada escena regresó de los criterios de búsqueda en la parte izquierda del panel. El lado derecho del formulario muestra el visor de Mapas Google con un esbozo de la zona identificada para la búsqueda.



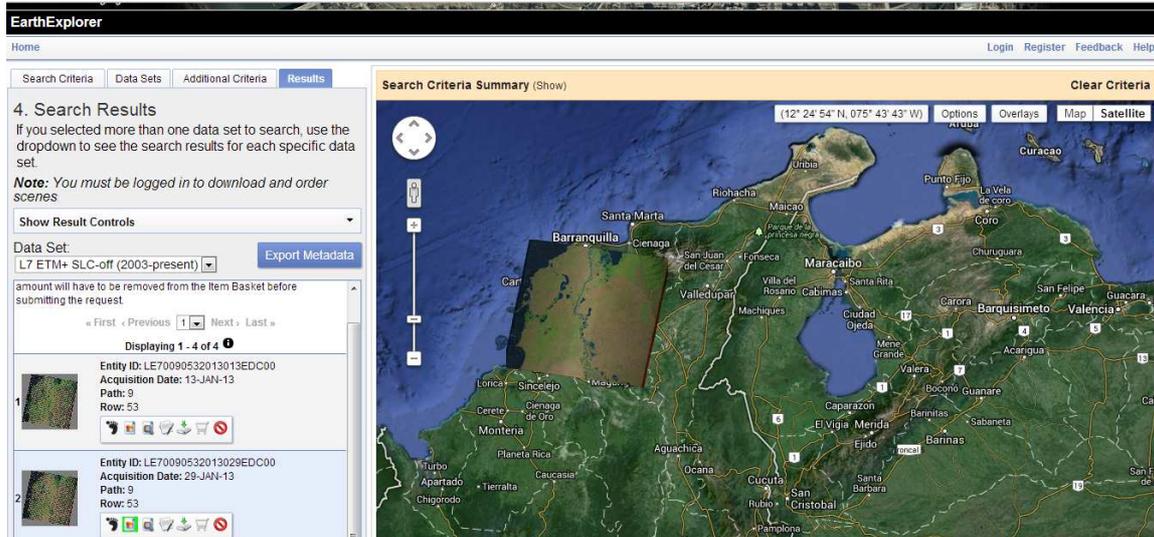


Figura 10. Ejemplo de resultados

Para descargar varias imágenes al mismo y compilar sus bandas (Stack) utilice el siguiente procedimiento:

1.4.2 GLOVIS: The USGS Global Visualization Viewer⁷

Se selecciona todas las imágenes en GLOVIS para las fechas de interés y con el menor porcentaje de nubes posible y se copian los ID de cada imagen en el archivo de texto (lista (2003->) o en (1999-2003) respectivamente según la época de las imágenes.

⁷ <http://earthexplorer.usgs.gov/resources>. Consulta: 8 de Agosto de 2013.



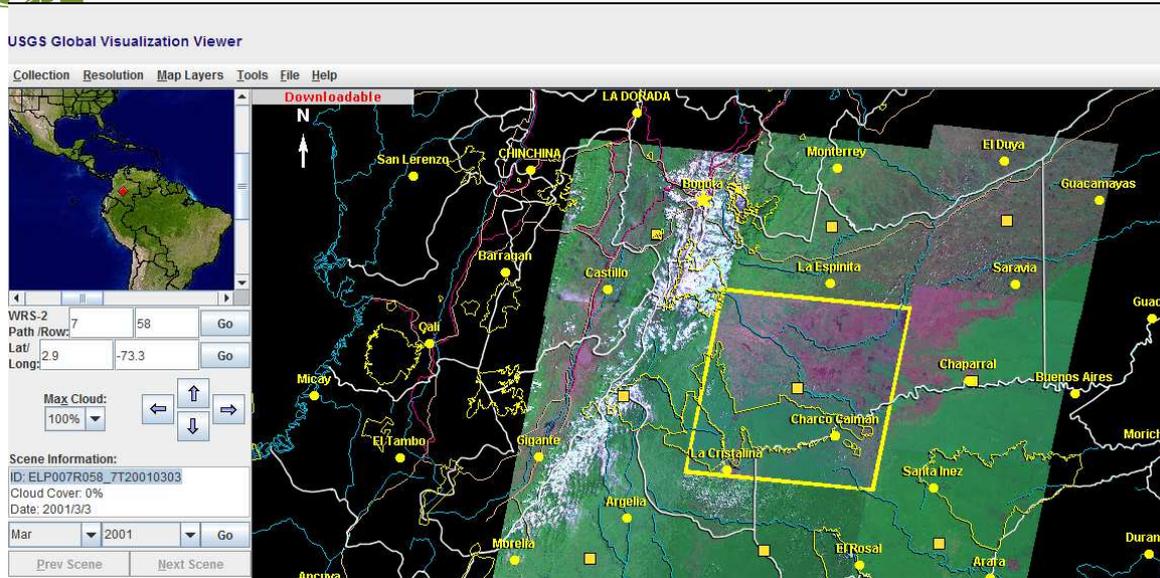


Figura 11. Visualización de datos landsat en GLOBIS para la escena 7-58.

Lo siguiente es un ejemplo de la lista de imágenes seleccionadas Landsat para descargar.

```
GloVis Scene List
sensor=L7 SLC-on (1999-2003)
ee_dataset_name=LANDSAT_ETM
LE70070602002017EDC01
LE70070602002033CUB00
LE70070602002049EDC00
LE70070602002081EDC00
LE70070602002097EDC00
LE70070602002129EDC00
LE70070602002145EDC01
LE70070602002161EDC00
LE70070602002177CUB00
LE70070602002193CUB00
LE70070602002209EDC00
LE70070602002225CUB00
LE70070602002241EDC00
LE70070602002257EDC00
LE70070602002273EDC00
LE70070602002289EDC00
LE70070602002305CUB00
LE70070602002321CUB00
```

- En el visualizador de datos landsat en GLOBIS seleccione el archivo de la lista en File --- Load saved scene list.



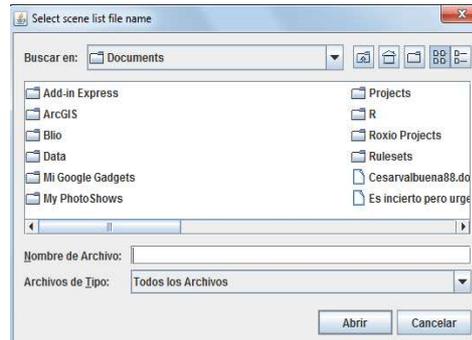


Figura 12. Selección del archivo de la lista de imágenes Landsat

- Seleccione  y las escenas a descargar y luego presiones continuar⁸.

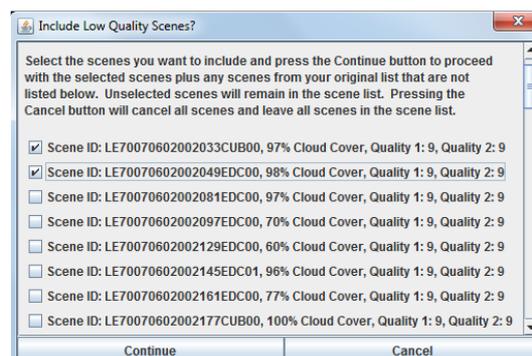


Figura 13. Selección de imágenes Landsat

- Instalar el programa “bda_windows_1_0_4” para descargar imágenes
- En un solo correo me indican que las imágenes están listas para descargar.
- Descomprima las carpetas y descargue las imágenes.
- Con Arcgis 10 o superior y Python se realiza la compilación de cada una de las bandas y se forma una sola imagen (Stack). Para lo cual se utiliza el Script Python “compilacion_bandas_landsat” el cual se puede modificar al abrir el archivo en formato txt.

⁸ <http://glovis.usgs.gov/>. Consulta: 9 de Agosto de 2013.



- En la carpeta de salida (script) se selecciona los archivos .TIFF y se visualizan en ERDAS.

LITERATURA CITADA

Chuvienco Salinero, Emilio. Iberoamérica Desde el Espacio. 1ra Edición. Madrid. 1992. Pág. 19.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83: 195–213.

Land Processes DAAC, 2008. MODIS Reprojection Tool User's Manual. USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, p. 61.

Lunetta, R.S., Knight, J.F., Ediriwickrema, J., Lyon, J.G., Dorsey Worthy, L., 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. Remote Sensing of Environment, 105(2): 142-154



Anexo 1

Instituciones dedicadas a la distribución de imágenes

- **Radar**

ERS y Envisat, Agencia Espacial Europea (incluye información sobre otros satélites de la agencia) <http://earth1.esrin.esa.it>

Radarsat International, 3851 Shell Rd, Suite 200, CDN-Richmond, B.C. V6X 2W2, Canadá: <http://radarsat.space.gc.ca>

Imágenes del radar de abertura sintética del SIR/C: www.jpl.nasa.gov/pictures

- **Imágenes ópticas de alta resolución espacial:**

GLOVIS, Visualizador de imágenes del servicio geologic de los Estados Unidos cuenta con imágenes de varios satélites. (<http://glovis.usgs.gov/>).

US Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls, SD 57198. Este organismo mantiene una base de datos sobre imágenes del programa Landsat. Se denomina *Global Land Information System (GLIS)* y es accesible a través en la página internet: <http://eros.usgs.gov/>

Servidor de imágenes del Departamento de Geografía de la Universidad de Maryland: (<http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>). Gran cantidad de imágenes Landsat de todo el planeta, además de otros productos.

INTA - División Ciencias del Espacio (representante español de la red europea EARTHNET), España.
<http://www.inta.es/investigacionesAplicadas/cienciasDelEspacio.asp>

Imágenes del satélite SPOT: *SPOT-Image*, 5 rue des Satelites, Toulouse, B.P. 4359, F-31030, Francia. <http://www.spotimage.fr/> . Representante español: Aurenca, San Francisco de Sales 38 - 1º, 28003 Madrid.

Imágenes del satélite IKONOS y otros de alta resolución:
<http://www.satimagingcorp.com/gallery-ikonos.html> <http://www.geoeye.com/>

- **Imágenes ópticas de baja resolución espacial**



Imágenes de distintos sensores de ámbito global: <http://gcmd.gsfc.nasa.gov/>

Imágenes NOAA

Página oficial de la NOAA. Contiene una sección dedicada a los satélites con imágenes e información. <http://www.noaa.gov/>

ESDIM Program. NOAA Environmental Services. Información, imágenes, etc.
<http://www.eis.noaa.gov/esdim/>

Imágenes Meteosat: <http://www.dkrz.de/sat/sat-eng.html>

Imágenes del SeaWiFS: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>

Imágenes de los distintos sensores del satélite Terra: <http://terra.nasa.gov/>

