



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de Altimetría de Radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquía Colombiana

Astrid Lili Puerta Monsalve

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Palmira, Colombia

2016

Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de Altimetría de Radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquía Colombiana

Astrid Lili Puerta Monsalve

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Director:

Ph.D., Juan Gabriel León Hernández

Línea de Investigación:

Monitoreo, Modelación y Gestión de Recursos Naturales

Grupo de Investigación:

Ecología y Contaminación Acuática

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Administración

Palmira, Colombia

2016

A mis 4 bellas mujeres: Mi madre que me ha dado los mejores y sabios consejos, Mis hermanas: Naz y Vicky que han sabido escucharme y mi sobrina Amalia, quien llena mi alma de sonrisas. Gracias por darme la fuerza necesaria para continuar.

*Súbete al ikrán más grande!, míralo a los ojos!
Y enfréntalo!.. Libérate de miedos y egocentricidades, ¡Siéntete libre! Y verás que con amor, paciencia, empeño, dedicación y esfuerzo logras volar muy alto!..*

Agradecimientos

Al Programa Jóvenes Investigadores e Innovadores “VIRGINIA GUTIERREZ DE PINEDA” del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIAS por la beca otorgada que permitió mi dedicación exclusiva al desarrollo de la investigación

A mi director de tesis, Profesor Juan Gabriel León por la confianza depositada y su colaboración en mi crecimiento como profesional e investigadora.

Al grupo de Investigación en Ecología y Contaminación Acuática de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, en especial a los profesores Guillermo Duque y Pilar Cogua por su apoyo y respaldo con el proyecto de investigación.

A todos los profesores de la Maestría en Ingeniería Ambiental que realizaron valiosos aportes y oportunas sugerencias en el desarrollo de la Tesis. En especial a los docentes Hernán Rojas, Luis Carlos Pardo, Carlos Humberto Mora, Viviana Vargas y Luz Stella Cadavid.

A los investigadores Stéphane Calmant, Frédérique Seyler, Gérard Cochonneau y los institutos LEGOS y LMTG del IRD en Francia, quienes aportaron la información necesaria para el desarrollo de la investigación, además de su valiosa asesoría técnica y científica.

A mi familia, compañeros y amigos: Daniel Herrera, Andrés Molina, Esteban Gamboa, Olga Pulido, Lilian Álvarez, Catherine Ballesteros, Nidia Tálaga, Harold Orosco, Leydi Hernández, Esperanza Solís, Wilson Murillo, Sebastián Mora, Milton Valencia, Aurélie Michel, Vanessa Drolón, Ángela Dumas, Romain Pinède, Jennifer Girón y en especial a Julián Benavides por su tiempo, aportes, críticas, consejos y palabras de aliento.

Resumen

La Altimetría Radar por Satélite (ARS) es una alternativa efectiva para mejorar las redes de monitoreo hidrológico de las cuencas del Orinoco y el Amazonas colombiano, gracias a la implementación de 186 estaciones virtuales (EV) Envisat y Jason 2. Una EV es toda aquella intersección entre el barrido del satélite y un cuerpo de agua (río, lago, zona inundación) de la cual se deduce una serie temporal que representa la variación de los niveles de agua. Dichas EV fueron caracterizadas hidráulicamente, mediante la estimación de 54 curvas de gasto (relación calibrada altura-caudal) para los principales cauces del Orinoco y el Amazonas. Concentrándose en cuatro aplicaciones básicas: i) Validación de series temporales en EV (36 series RMSE: 45 ± 14 cm), ii) Complemento de estaciones in-situ (30 estaciones), iii) Estimación de caudales en EV (RMSE: $\pm 1\%$) y iv) Caracterización hidráulica de EV. Estos resultados contribuyen a densificar los puntos de monitoreo hidrológico en estas cuencas.

Palabras Claves: Altimetría Radar, Estaciones Virtuales, Caracterización hidráulica, Curvas de Gasto, Monitoreo Hidrológico.

Abstract

The Satellite Radar Altimetry (ARS) is an effective alternative to improve hydrological monitoring stations of the Orinoco and Colombian Amazon, thanks to the implementation of 186 virtual stations (EV) Envisat and Jason 2. An EV is all that intersection of satellite tracking and a body of water (river, lake, and flood zone) from which a time series representing the variation of water levels. These EV were characterized hydraulically by estimating 54 rating curves (calibrated relationship high-flow) for the main channels of the Orinoco and Amazon the main channels of the Orinoco and Amazon. Focusing on four basic applications: i) Validation time series in EV (36 series RMSE : 45 ± 14 cm) , ii) complement of in- situ stations (30 stations) , iii) Estimation of flows in EV (RMSE stations : ± 1 %) and iv) hydraulic characterization of EV . These results contribute to densify the hydrological monitoring points in these basins.

Keywords: Radar Altimetry, Virtual Stations, Hydraulic Characterization, Rating Curves, Hydrological Monitoring,

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVII
Lista de Abreviaturas y Unidades	XVIII
Introducción	1
1. Cuencas del Orinoco y el Amazonas Colombiano: Importancia, características hidrológicas, monitoreo y problemática	5
1.1 Oferta hídrica Colombiana	5
1.2 Importancia de las cuencas hidrográficas del Amazonas y el Orinoco Colombiano.....	7
1.2 Descripción Geográfica de las Cuencas del Orinoco y el Amazonas Colombiano.....	8
1.2.1 Cuenca del Orinoco.....	8
1.2.2 Cuenca del Amazonas	9
1.3 Características Climáticas y Regímenes Hidrológicos de las Cuencas del Orinoco y el Amazonas Colombiano.....	11
1.3.1 Cuenca del Orinoco.....	12
1.3.2 Cuenca del Amazonas	13
1.4 Redes de monitoreo hidrológico en Colombia: Casos de las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano.....	14
1.4.1 La hidrometría y su problemática en las Redes de Monitoreo	14
1.4.2 Problemática del monitoreo in-situ en Colombia.....	17
1.4.3 Descripción y características de los registros in-situ a utilizar en el marco de este estudio.....	20
1.5 Conclusiones.....	21
2. Altimetría de radar por satélite: Historia, Principios de funcionamiento, Aplicaciones en la Hidrología y desarrollo en las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano	23

XII Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

2.1	Los satélites: Tipos y características.....	23
2.2	La Teledetección y surgimiento de la Altimetría de Radar por Satélite - ARS.....	25
2.3	Principio de la Altimetría de Radar por Satélite (ARS).....	27
2.4	Formas de Onda en los sistemas oceánicos y continentales y Tratamiento de las señales.	32
2.4.1	Formas de Onda	32
2.4.2	Tracking y Re tracking	34
2.5	Misiones de altimetría radar por satélite.....	35
2.5.1	Antiguas Misiones	36
2.5.2	Misiones Actuales	37
2.5.3	Futuras Misiones.....	38
2.5.4	¿Por qué las misiones Envisat y Jason 2?	41
2.6	Programas y Proyectos Internacionales en el campo de la altimetría.....	43
2.6.1	Programa Hybam	43
2.6.2	Proyecto PISTACH	44
2.6.3	Bases de datos del CTOH.....	44
2.6.4	Proyecto OSCAR	45
2.6.5	Proyecto CASH.....	45
2.6.6	Hydroweb.....	45
2.7	Aplicación de la Altimetría de Radar en Hidrología.....	46
2.7.1	Metodología para la aplicación de la ARS en las cuencas del Orinoco y el Amazonas.....	46
2.7.2	Definición de Estaciones Virtuales	47
2.7.3	Definición de Estaciones Virtuales Envisat Y Jason 2 para las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano.....	51
2.7.4	Extracción de medidas altimétricas y obtención de series temporales para las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano.....	55
2.7.5	Análisis Estadístico de las Series Temporales obtenidas en las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano	59
2.7.6	Validación de medidas altimétricas con información in-situ e interceptores en las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano.....	60
2.7.7	Modelo de Regresión Lineal y Prueba de Hipótesis para los datos altimétricos obtenidos en las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano.....	65
2.7.8	Complemento de Datos In-situ con información altimétrica en las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano	67
2.8	Conclusiones	69

3. Caracterización Hidráulica en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 sobre los principales cauces de las cuencas del Amazonas y Orinoco colombiano 71

3.1	Descripción del modelo hidrodinámico optimizado Muskingum-Cunge	71
3.2	Aplicación del método de Muskingum-Cunge en estaciones virtuales.....	75
3.3	Estimación de caudales medio diarios en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 para los principales cauces de la cuenca del Orinoco y el Amazonas.....	79
3.4	Interpolación de series temporales para las estaciones virtuales Envisat y Jason 2 de las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano.....	85
3.5	Curvas de Calibración o Curvas de Gasto obtenidas para Estaciones virtuales.....	89

3.6 Estimación de Curvas de Gasto para los principales cauces de las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano.....	95
3.7 Conclusiones.....	100
4. Conclusiones y recomendaciones.....	103
4.1 Conclusiones.....	103
4.2 Recomendaciones.....	105
5. Bibliografía.....	107

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Zonificación hidrológica de Colombia. Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM (1998) citado por García et al. (2001).....	6
Figura 1-2: Volumen de agua en áreas hidrográficas representativas (km ³). Fuente: IDEAM (2004).	7
Figura 1-3: Subcuencas hidrográficas de la Orinoquía Colombiana. Fuente: Romero et al. (2006) citado por Correa et al. (2005).	8
Figura 1-4: Cuenca del Amazonas Colombiano. Fuente: IDEAM (2004).	10
Figura 1-5: Componentes de un Sistema de Información Hidrológico. Fuente: OMM (2008) citado por Ortega & Pedrozo (2012).	15
Figura 1-6: Distribución mundial de la capacidad de monitoreo del agua. Fuente: Calmant & Seyler (2006).	16
Figura 1-7: Estadísticas de Estaciones Meteorológicas en Suramérica. Fuente: IDEAM (2009).	17
Figura 1-8: Estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM en las cuencas del Orinoco y el Amazonas. Fuente: Adaptado de IDEAM (2012).	19
Figura 2-1: Composición de la radiación electromagnética. Fuente: RNCAN (2008).	24
Figura 2-2: Espectro electromagnético. Fuente: Casanova (2012).	25
Figura 2-3: Componentes de la Teledetección. Fuente: RNCAN (2008).	26
Figura 2-4: Principio la altimetría de radar por satélite para el medio oceánico. Fuente: Adaptado del Centre National d'Études Spatiales - CNES (2013)	28
Figura 2-5: Elipsoide (Izquierda) y Geoide Terrestre (Derecha). Fuente: National Aeronautics and Space Administration - NASA (2004) citado por Schmidt et al. (2006)..	28
Figura 2-6: Principio de la medida altimétrica en los sistemas continentales. Fuente: Adaptado de Da Silva (2010).	31
Figura 2-7: Corrección del error de órbita en diferentes misiones altimétricas. Fuente: Adaptado de Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data - AVISO (2009).	32
Figura 2-8. Formación de la señal del altímetro sobre una superficie plana (izquierda y una superficie desigual (derecha). Fuente: Mercier (2001).	33
Figura 2-9. Diferencia entre una medida altimétrica de una superficie Continental (a) y una superficie Oceánica (b). Fuente: Adaptado de Calmant et al. (2008).	34
Figura 2-10: Mediciones del altímetro Topex/Poseidón en el río Amazonas cerca de Manaos. Fuente: Collecte Localisation Satellites - CLS (2010).	35

Figura 2-11: Algunas de las antiguas misiones satelitales. Fuente: AVISO (1997-2013) y Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère - CTOH (1997-2013).....	37
Figura 2-12: Algunas de las actuales misiones satelitales. Fuente: AVISO (1997-2013) y CTOH (1997-2013).....	38
Figura 2-13: Futuras misiones satelitales Fuente: AVISO (1997-2013) y ESA (2000-2013).....	40
Figura 2-14: Cobertura espacial de las misiones Envisat (En Amarillo) y Jason 2 (en Rojo) sobre las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano. Fuente: AVISO (1997-2013) y Google Earth (2012).	43
Figura 2-15: Diagrama simplificado de la metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 2-16: Estación Virtual definida a partir de una traza del satélite Fuente: AVISO (1997-2013) y Google Earth (2012).	48
Figura 2-17: Estación virtual y Serie Temporal de datos Topex/Poseidón, sobre el río Negro - cuenca del Río Amazonas (Da Silva, 2010).....	49
Figura 2-18: Estaciones virtuales Envisat, definidas para toda la hidrografía Colombiana y ejemplo de una serie temporal obtenida. Fuente: Navarro (2009).....	49
Figura 2-19: Componentes de la Base de Datos ALTICO a partir de datos satelitales del radar Envisat. Fuente: Navarro (2009).	50
Figura 2-20: Cuencas del Orinoco y el Amazonas con estaciones virtuales Envisat (Puntos en Amarillo), Jason 2 (Puntos en Azul) y estaciones in-situ (Puntos Rojos). Fuente: Elaboración Propia en plataforma Google Earth (2012).....	52
Figura 2-21: Densificación de la red de monitoreo hidrológico sobre el río Meta. Sub cuencas a partir de estaciones in-situ (izquierda). Sub cuencas a partir de estaciones virtuales (derecha). Fuente: León et al. (2012).	53
Figura 2-22: Densificación de la red de monitoreo sobre la cuenca del río Putumayo en la cuenca del Amazonas. Sub cuencas a partir de estaciones in-situ (izquierda). Sub cuencas a partir de estaciones virtuales (derecha). Fuente: (Arbeláez, 2012).	54
Figura 2-23: Extracción de Serie Temporal mediante la utilización de Vals. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 2-24: Sistema de monitoreo automático de la ORE HYBAM.	57
Figura 2-25: Series Temporales Envisat para los cauces principales del Orinoco y Amazonas. Fuente: Elaboración Propia.	58
Figura 2-26: Ejemplo de Validación realizada en el río Meta con la estación in-situ Puerto Fortuna y la estación virtual EV_035Meta01. Fuente: Elaboración Propia.	61
Figura 2-27: Validaciones de estaciones virtuales Envisat y Jason 2, con registros hidrométricos in-situ en la cuenca del Orinoco. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 2-28: Validación de Intercaptadores entre las misiones Envisat y Jason 2, en algunos cauces de la cuenca del Orinoco y el Amazonas. Fuente: Elaboración propia. .	64
Figura 2-29: Ejemplos de Correlación para las estaciones validadas. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 2-30: Resultado de la prueba de hipótesis para un caso de validación intercaptadores. Fuente: Elaboración propia.	66

Figura 2-31: Ejemplo de complemento de datos faltantes en estaciones in-situ mediante estaciones virtuales. Elaboración propia.	69
Figura 3-1. Sección considerada para la aplicación de un Modelo M-C de acuerdo con las Ecuaciones de Saint Venant.....	73
Figura 3-2: Secciones Hidráulicas para caracterización de estaciones virtuales. Estaciones in-situ (en rojo), Estaciones Virtuales (en Amarillo) y distancia de cada sección en Kilómetros. Fuente: Elaboración propia.....	81
Figura 3-3: Series temporales de caudales para los principales cauces de las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 3-4. Ejemplo de Interpolación realizada en las estaciones virtuales con el programa R. Fuente: Elaboración propia.....	89
Figura 3-5. Expresión de la relación en función de la altura altimétrica. Fuente: León et al. (2006).....	92
Figura 3-6: Ejemplo de una relación existente entre los valores de niveles y caudales en forma de lazo. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 3-7: Curvas de Gasto deducidas para los principales cauces de la Cuenca del Orinoco y el Amazonas. Fuente: Elaboración propia.....	96

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Características hidrológicas de algunos cauces principales del Amazonas y Orinoco. Fuente: SIAC (2002).	11
Tabla 1-2: Disponibilidad de información hidrométrica in-situ, registro IDEAM para las cuencas del Orinoco y el Amazonas. Fuente: Adaptado del reporte de cotizaciones de datos, hechas por el IDEAM entre los años 2012 y 2013.	19
Tabla 1-3: Listado de Estaciones in-situ utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración propia.	21
Tabla 2-1: Correcciones Ambientales. Fuente: ESA (2000-2013).	29
Tabla 2-2: Correcciones Geofísicas. Fuente: ESA (2007).	29
Tabla 2-3: Características de las misiones Envisat Y Jason 2.	42
Tabla 2-4: Total de Estaciones Virtuales (Envisat y Jason 2) e in-situ (IDEAM), presentes en las cuencas de estudio.	52
Tabla 2-5: Densificación de los puntos de control sobre las cuencas del Amazonas y el Orinoco. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 2-6: Estadísticos Descriptivos para las Estaciones virtuales Envisat y estaciones in-situ sobre el río Orinoco. Fuente: Elaboración Propia.	59
Tabla 2-7: Número de Estaciones Virtuales validadas con estaciones in-situ del IDEAM y cálculo de RMSE correspondiente.	62
Tabla 2-8: Prueba Post-ANOVA. Fuente: Elaboración propia	67
Tabla 3-1: Número de estaciones virtuales para caracterización hidráulica. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 3-2: Estimación de caudales medios diarios para estaciones virtuales Envisat. Fuente: Elaboración propia.	82
Tabla 3-3: Estimación de caudales medios diarios para estaciones virtuales Jason 2. Fuente: Elaboración propia.	83
Tabla 3-4: Estaciones virtuales seleccionadas a interpolar y estaciones in-situ utilizadas en el proceso de interpolación. Fuente: Elaboración propia.	87
Tabla 3-5: Características hidráulicas de las estaciones virtuales. Fuente: Elaboración propia.	99

Lista de Abreviaturas y Unidades

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ALTICO	Altimetría para Colombia
ANOVA	Analysis Of Variance
AOD	Ayuda Oficial al Desarrollo
ARS	Altimetría de Radar por Satélite
AVISO	Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data
CAR	Corporaciones Autónomas Regionales
CASH	Contribution de l'Altimétrie Satellitaire à l'Hydrologie
CGR	Contraloría General de la República
CHAMP	Challenging Minsatélite Payload
CIO	Comisión Internacional de Oceanografía
CLS	Collecte Localisation Satellites
CMGRD	Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CNSA	Academia China de Tecnología Espacial
CPER	Océan Pôle-Altimétrie Climat
CRYOSAT	Cryosphere Satellite
CORPOICA	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
ECMWF	European Center for medium ranger Weather Forecast
EGM	Earth Gravitational Model
ENVISAT	Environmental Satellite
ERS	European Remote Sensing
ESA	European Space Agency
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
EV	Estaciones Virtuales
GCOS	Global Climate Observing System
GDRs	Geophysical Data Records
GEO	Geostationary Earth Orbit
GEOS	Geodynamics Experimental Ocean Satellite
GEOSAT	Geodetic Satellite
GET	Laboratorio de Géosciences Environnement Toulouse
GFO	Geosat Follow On
GOCE	Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
HYBAM	Geodynamical, Hydrological and Biogeochemical Control of Erosion/Alteration and Material Transport in the Amazon Basin
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia

IGDRs	Interim Geophysical Data Records
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRD	Instituto de Investigación para el Desarrollo
ISRO	Indian Space Research Organisation
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LEGOS	Laboratorio de Estudios en Geofísica y Observación Espacial
LEO	Low Earth Orbit
LMTG	Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie
M-C	Muskingum-Cunge
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
MEO	Medium Earth Orbit
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OMM	Organización Meteorológica Mundial
OMP	Observatoire Midi-Pyrénées
OPT	Optimización Multiobjetivo
ORE	Environmental Research Observatory
OSCAR	Observation des Surfaces Continentales par Altimétrie Radar
PHI	Programa Hidrológico Internacional
PISTACH	Prototype Innovant de Système de Traitement pour les Applications Côtières et l'Hydrologie
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
POD	Precise Orbit Determination
R	The R Project for Statistical Computing
RMSE	Root Mean Square Error
SAR	Synthetic Aperture Radar
SARAL	Satellite with ARGOS and ALtiKa
SDRs	Sensor Data Records
Seasat	Seafaring Satellite
SIAMAC	Sistema de Información de la Amazonia Colombiana
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SPOT	Satellite pour l'Observation de la Terre
SWOT	Surface Water Ocean Topography
T/P	Topex Poseidón
UPS	Université Paul Sabatier
VALS	Virtual Altimetry Local Station
WGS	World Geodetic System
WSOA	Wide Swath Ocean Altimeter

Unidades y Símbolos

Símbolo	Término
C	velocidad de la luz
°C	grado Celsius
Cm	centímetro
f	frecuencia
km	kilómetro
km ²	kilómetro cuadrado
λ	longitud de onda
l	litro
l/s/km ²	litros por segundo por kilómetro cuadrado
m	metro
m ³	metro cúbico
m ³ /s	metro cúbico por segundo
mm	milímetro
mm/año	milímetros por año
s	segundo

Introducción

A pesar de los esfuerzos técnicos para la adquisición de información hidrométrica apropiada en los contextos actuales, la evaluación de la cantidad y la calidad del recurso hídrico disponible en grandes cuencas colombianas está sistemáticamente afectada por la disminución de las estaciones de monitoreo, particularmente las empleadas para el seguimiento de los regímenes hidrológicos que tienen ocurrencia en las mismas. Tal situación se evidencia en dos problemas fundamentales: una baja densidad espacial de estaciones de monitoreo ligada a una distribución no uniforme sobre las redes hidrológicas que ellas conforman, y una deficiente calidad en los datos que se registran a partir de estas, en términos de continuidad y disponibilidad de la información en el corto y mediano plazo. De hecho, en Colombia, la Contraloría General de la Nación reporta en su Informe del Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente 2007-2008, que las autoridades ambientales colombianas no realizan procesos de seguimiento y monitoreo adecuados en términos de periodicidad, sistematización y articulación de la información (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT, 2010); ésta problemática además desencadena limitaciones para el desarrollo de iniciativas que giran en torno a la gestión integrada del recurso hídrico (Espinoza, et al., 2009); (León *et al*, 2011).

En el contexto colombiano, las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco no son la excepción. En ambas regiones la falta constante de información hidrométrica en espacio y tiempo, son un inconveniente importante para la comprensión del comportamiento hidrológico de estos sistemas; en especial, si se tiene en cuenta que por sus dimensiones continentales estas cuencas incluyen diversos regímenes de precipitación e hidrológicos que son necesarios evaluar con el fin de conocer la disponibilidad del recurso hídrico en relación a la ocurrencia de fenómenos naturales que por factores del cambio climático serán cada vez más frecuentes (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2007). Si bien, el desarrollo de modelos hidrológicos aptos para el análisis de tales regímenes sobre estas zonas es cada vez mayor, su nivel de aplicabilidad y precisión redunda en la falta de información inmediata, actualizada y de buena calidad.

En este sentido, es válido afirmar que, de manera general, los sistemas de monitoreo hidrométrico, particularmente sobre las cuencas del Amazonas y Orinoco colombiano, carecen de inversión técnica y económica suficientes para la adecuada adquisición, tratamiento, organización y manejo de los datos que estos registran. Esta realidad, la cual no es comparable con las tendencias a nivel de monitoreo hidrológico mundial en los últimos años, genera la necesidad de buscar alternativas que permitan dar una respuesta

rápida y confiable a dicho problema; en la actualidad dar solución a esto es uno de los desafíos más importantes de la hidrología.

En este contexto, varios estudios (Brooks, 1982); (Morris & Gill, 1994 a); (Morris & Gill, 1994 b); (Ponchaut & Cazenave, 1998); (Mercier, 2002); (De Oliveira, et al., 2001); (Birkett, Mertes, Dunne, Costa, & Jasinski, 2002); (Maheu, Cazenave, & Mechoso, 2003); (Crétau & Birkett, 2006); (Frappart, Seyler, Martínez, León, & Cazenave, 2005); (León, et al., 2006); (Calmant & Seyler, 2006); (Roemer, Légrésy, Horwath, & Dietrich, 2007); (Chu, et al., 2008); (Swenson & Wahr, 2009); (Crétau, et al., 2011) han venido demostrando desde hace más de una década la aplicación del principio de la Altimetría de Radar por Satélite (ARS); una tecnología que ha permitido el estudio y comprensión del comportamiento hidrológico en grandes cuencas; mediante el desarrollo de un campo de investigación conocido como: Hidrología Espacial (Guyot J., 2009); (Seyler, et al., 2009); (León, Domínguez & Duque, 2008). Particularmente sobre la cuenca Amazónica, el programa de Hidrología del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD por sus siglas en francés) se ha encargado de llevar a cabo el monitoreo de las inundaciones, el análisis del relieve y también la estimación de los flujos sedimentarios en los ríos y lagos de la Amazonia apoyándose en la Hidrología Espacial (Guyot J., 2009); (Guyot J., 2007). Este trabajo de investigación se suma a las iniciativas actualmente en curso (Da Silva et al., 2010); (Calmant et al., 2012); (Seyler, Calmant, Da Silva, Medeiros, Mercier & Shum, 2012); (Hall, Guy, Schumann, Bamber, & Bates, 2011); (Zhang et al., 2010); (Seyler, 2007); (Laraque, Moquet, Alkattan, Steiger, Mora, Adéle et al., 2013) por cuanto se relaciona con la implementación de un sistema de monitoreo hidrológico, para las grandes cuencas de la Amazonía y Orinoquía a partir de medidas altimétricas de las misiones satelitales Envisat y Jason 2.

Uno de los mayores avances en el dominio de la Hidrología Espacial y sobre el cual este trabajo de tesis está articulado, tiene que ver con la puesta en marcha de estaciones virtuales sobre grandes cauces. De manera general, entiéndase como estación virtual a toda aquella intersección que pueda existir entre la órbita de un satélite proyectada sobre la superficie terrestre y un plano de agua continental (un río, un lago, una zona de inundación etc.), de la cual se puede deducir una serie temporal que representa la variación de la altitud de los niveles de agua de dichos cuerpos (León, Seyler, Bonnet, Cauhope, Frappart, & Filizola, 2006). Dichos avances han permitido inclusive caracterizar hidráulicamente estas secciones de la misma forma en que son caracterizadas las estaciones in situ, es decir, llegar a estimar para estas las curvas de gasto (relación altura/caudal), a partir de las cuales es posible deducir características hidráulicas de la sección transversal que representan estas estaciones (León et al, 2011). Con el establecimiento de estaciones virtuales, la obtención de series temporales representando la variación de los niveles del agua y su caracterización hidráulica, es viable pensar en densificar las redes de monitoreo hidrológico in-situ, tanto en el espacio como en el tiempo, para finalmente poner en conocimiento la dinámica hidrológica de grandes cuencas mal instrumentadas tales como las cuencas hidrográficas del Amazonas y el Orinoco.

Particularmente esta investigación tiene como objetivo general caracterizar hidráulicamente las estaciones virtuales Envisat y Jason 2 identificadas y validadas sobre los cauces principales de las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco en los sitios donde exista disponibilidad de datos altimétricos y registros in-situ.

Para tal fin la investigación, se concentrará específicamente en: i) Definir sobre los principales cauces de la zona de estudio las estaciones virtuales de las misiones mencionadas, ii) validar las series temporales de estas estaciones a partir de registros de estaciones in-situ, (Cahuopé, 2004); (Berry, Freeman, Smith, & Benveniste, 2007), iii) estimar caudales en estaciones virtuales mediante la aplicación de un modelo hidrodinámico (León , 2006) y, iv) estimar curvas de gasto y parámetros hidráulicos sobre estaciones virtuales (León , et al., 2006).

Lo anterior permitirá resolver la hipótesis que se plantea a continuación: Los datos altimétricos de las misiones Envisat y Jason 2 brindan información necesaria para comprender el comportamiento hidrológico de las cuencas del Orinoco y del Amazonas, analizando las dinámicas de variación de la oferta hídrica en el tiempo.

En virtud de las expectativas planteadas, el capítulo 1 de este documento, presenta el contexto general de las cuencas del Orinoco y el Amazonas, su importancia, las características físicas e hidrológicas, las redes de monitoreo existentes en estas cuencas y la problemática que presentan con relación a la falta de información para llevar a cabo el seguimiento de los recursos hídricos. El capítulo 2 presenta el contexto general y particular de la aplicación de la Altimetría de Radar por Satélite (ARS) como alternativa de solución a la problemática de las redes de monitoreo y las aplicaciones en hidrología como: definición de estaciones virtuales, extracción de series temporales, validación con datos in-situ y complemento de datos faltantes; presentado los resultados obtenidos en cada uno de estos pasos para las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano

El capítulo 3 presenta la descripción y aplicación de un modelo hidrodinámico para la estimación de caudales medios diarios sobre estaciones virtuales con el fin de caracterizar hidráulicamente dichas secciones. Tal metodología está ubicada en la complejidad de varios principios matemáticos los cuales están explicados, paso a paso, para la comprensión de su aplicación. Al mismo tiempo se presenta la aplicación del modelo para estimar caudales en las estaciones virtuales Jason 2 y Envisat definidas en la cuenca del Amazonas y el Orinoco.

Finalmente, el capítulo 4 plantea las conclusiones obtenidas a partir de este trabajo de investigación y las diferentes recomendaciones obtenidas de diversas fuentes secundarias.

1. Cuencas del Orinoco y el Amazonas Colombiano: Importancia, características hidrológicas, monitoreo y problemática.

1.1 Oferta hídrica Colombiana

Dentro de un contexto global, el agua dulce representa tan sólo 2,5% de la masa líquida del planeta, siendo el 0,01% el que está disponible para uso humano. La mayor parte de este recurso se concentra en los casquetes polares y depósitos subterráneos (99,5%), por lo que apenas una fracción se encuentra en los ecosistemas acuáticos en forma de ríos o lagos (MAVDT, 2010).

De esta proporción de agua dulce en el mundo, Colombia se puede considerar privilegiada al contar con vertientes hidrográficas que drenan desde las cordillera de Los Andes hacia los océanos Atlántico y Pacífico y hacia las grandes cuencas del Amazonas y Orinoco (Sistema de Información Ambiental de Colombia - SIAC, 2002). Tales características ubican a Colombia como uno de los países con mayores riquezas hídricas en el mundo (García et al., 2001). Con 58 l/s/km², seis veces más que el promedio mundial (Marín, 1992), dicha riqueza se distribuye en 720.000 microcuencas, que componen los 15.519 km de red fluvial; representando caudales cercanos a 54.839 m³/s (Marín, 2003), en 17.000 cuerpos de agua que inundan 2,68 millones de hectáreas (González et al., 2006).

Esta oferta hídrica colombiana puede distribuirse en cinco (5) grandes áreas hidrográficas: 1) La vertiente Caribe, conformada por grandes sistemas fluviales que fluyen hacia el océano Atlántico como el Río Sinú y el Catatumbo, 2) La vertiente del Magdalena, alimentada por las tres cordilleras andinas, conforma principalmente, los ríos del Magdalena, el Cauca, el Fundación, Riohacha, Cesar, Sogamoso, Lebrija, Saldaña, Bogotá, Sumapaz, Chicamocha, entre otros; 3) La vertiente Oriental que la conforman los principales cauces del Orinoco, Arauca, Meta, Inírida, Vichada y Guaviare; 4) la vertiente Amazonas que se compone de los ríos Amazonas, Caquetá, Vaupés, Apaporis y Putumayo; 5) la vertiente del Pacífico, constituida por los ríos Baudó, San Juan, Atrato, Patía, Mira, Micay, Dagua, Anchicayá, Yurumanguí, Naya, Guapí, Iscuandé y Mataje (Figura 1-1).

En términos generales, este conjunto de redes hidrográficas presentan el alto potencial hídrico de las cuencas de la Amazonia y Orinoquia, las cuales componen el 66% de la

6 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

disponibilidad de agua del país; en un 34% y 32% respectivamente (Figura 1-2). Esta riqueza hidrológica crea la necesidad de llevar a cabo un monitoreo que represente la dinámica de los regímenes hidrológicos y la disponibilidad de agua en el tiempo, conociendo sus rangos, variaciones y amplia estacionalidad.

Figura 1-1: Zonificación hidrológica de Colombia. Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM (1998) citado por García et al. (2001).

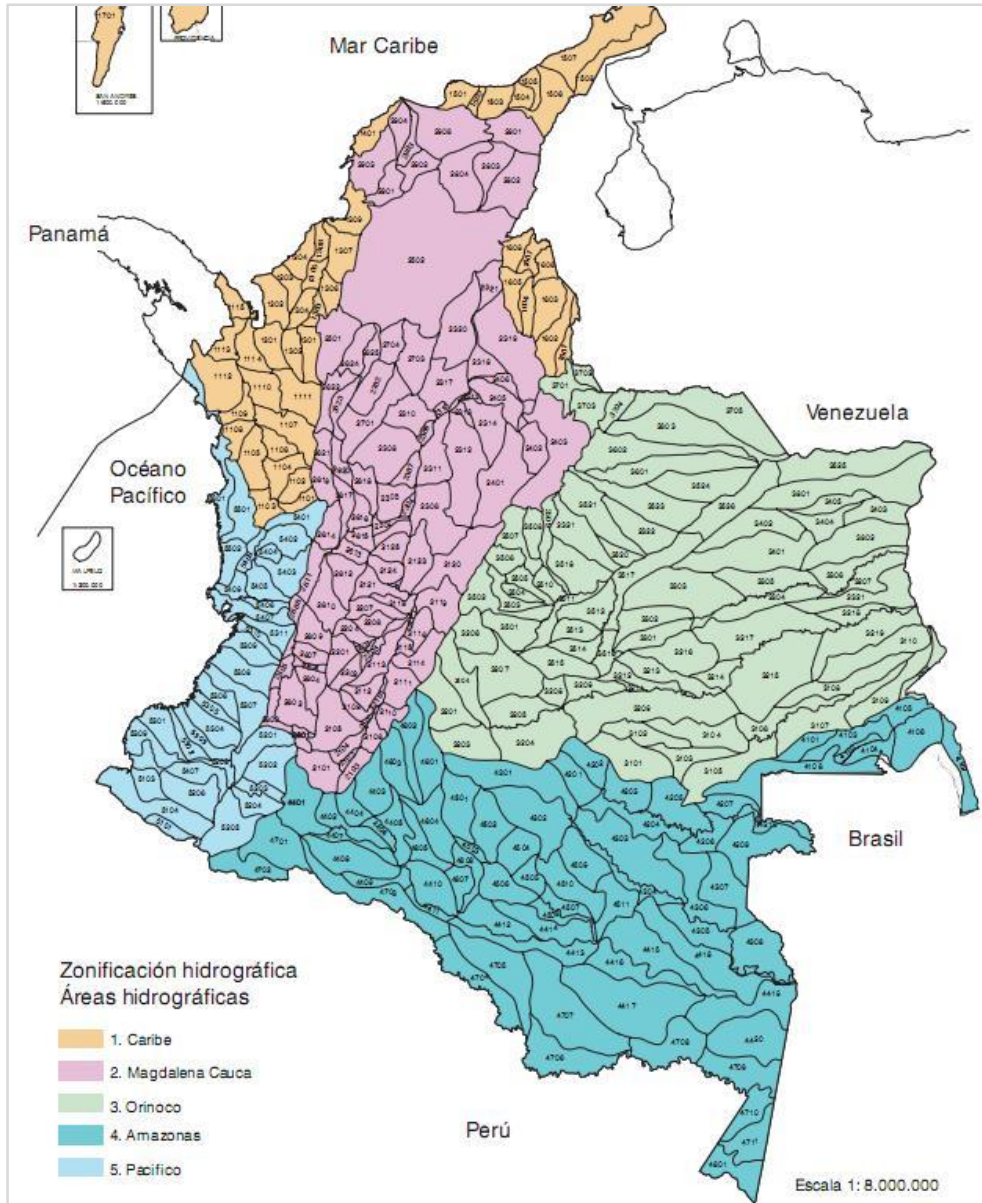
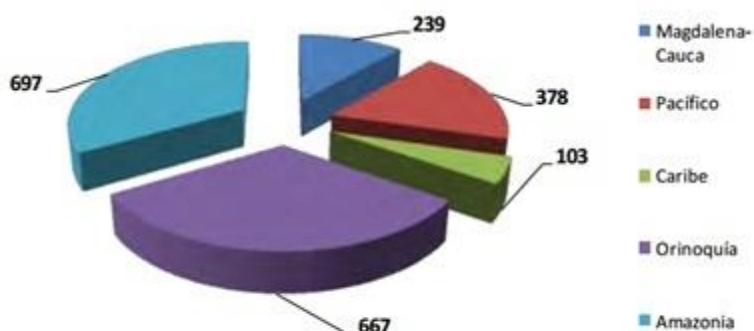


Figura 1-2: Volumen de agua en áreas hidrográficas representativas (km³). Fuente: IDEAM (2004).



1.2 Importancia de las cuencas hidrográficas del Amazonas y el Orinoco Colombiano

Las cuencas del río Orinoco y del Amazonas en Colombia se destacan por su riqueza hídrica, cualidad que hace de estas cuencas un excelente escenario para albergar una diversidad de paisajes, ecosistemas y hábitats, los cuales poseen distintas formas de vida. Adicionalmente, la diversidad cultural que presentan, la importancia histórica y la alta diversidad ecológica caracterizan estas regiones como heterogéneas en muchas dimensiones: culturales, sociales, fisiográficas, etc. Gran parte de esos territorios están conformados por ambientes acuáticos, ríos, lagunas, pantanos, zonas inundables, en contraste con extensos bosques y praderas; topográficamente, abarcan zonas desde el nivel medio del mar hasta los 4.000 m de altura.

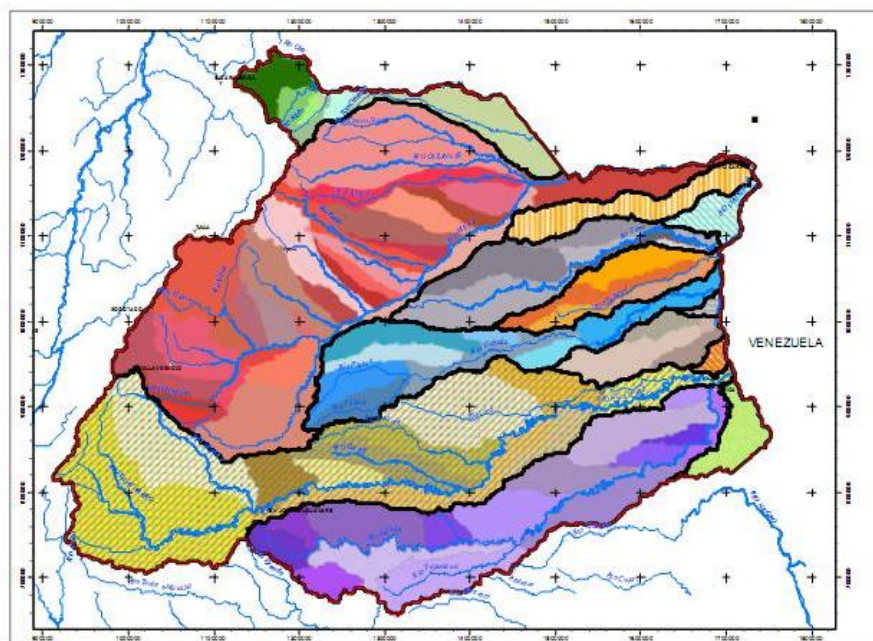
Estas cuencas, por sus dimensiones continentales y la variabilidad de sus regímenes de precipitación presentan unas dinámicas hidrológicas muy diversas, representadas en situaciones extremas como déficits y superávits. Por ejemplo, las importantes disminuciones de caudales reportadas durante el 2005 (Labat et al., 2005), en relación con los importantes registros del 2009 (Espinoza et al., 2010). Tal variabilidad hace necesario estudiar el comportamiento espacial y temporal de las variables hidrológicas asociadas a la disponibilidad de agua y comportamiento del ciclo hidrológico en estas regiones; con el fin de identificar los niveles de estiaje o de inundaciones que pueden causar serios impactos sobre los ecosistemas. Para ello, es necesario inicialmente, describir las características fisiográficas e hidrológicas de cada una de estas cuencas.

1.2 Descripción Geográfica de las Cuencas del Orinoco y el Amazonas Colombiano.

1.2.1 Cuenca del Orinoco

La cuenca del Orinoco cuenta con un área aproximada de 991.587 km², distribuida entre Colombia y Venezuela en porcentajes del 35% y el 65%, cerca de 347.165 km² y 644.423 km² respectivamente. El río Orinoco nace en la serranía Parima ubicada en el extremo sur del macizo de Guyana (Estado del Amazonas, Venezuela) y desemboca en el delta del mismo nombre al oriente venezolano, después de recorrer una extensión aproximada de 2.140 km. Se extiende desde la Cordillera Oriental de los Andes colombianos hasta la planicie de los llanos y el escudo Guyanés venezolano. Su curso delimita la frontera Colombia-Venezuela hasta la confluencia con el río Meta y su ancho máximo oscila entre 500 a 700 metros. En Venezuela, esta cuenca se extiende por 17 de sus 23 estados: Amazonas, Bolívar, Apure, Táchira, Mérida, Trujillo, Barinas, Portuguesa, Lara, Yaracuy, Cojedes, Carabobo, Aragua, Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro (Silva, 2005). En Colombia, se compone regionalmente por cinco (5) subcuencas importantes: Arauca, Meta, Vichada, Inírida y Guaviare que hacen parte de los departamentos de: Casanare, Meta, Arauca, Cundinamarca, Boyacá, Norte de Santander, Guaviare y Vichada (Correa et al., 2005). La Figura 1-3, muestra las subcuencas hidrográficas que componen la Orinoquia Colombiana.

Figura 1-3: Subcuencas hidrográficas de la Orinoquia Colombiana. Fuente: Romero et al. (2006) citado por Correa et al. (2005).



La mayor distancia en la cuenca es de 1.723 km, la cual se establece entre un punto del alto Guaviare, ubicado a 2° 13' N y 74° 36' O en el límite de los departamentos del Meta y Caquetá en Colombia; y un punto de la costa deltaica situado a 9° 22' N y 60° 48' O en la isla Tobejuba, estado Delta Amacuro en Venezuela. Ambos puntos definen un eje longitudinal de la cuenca que tiene 903 km en Colombia y 820 km en Venezuela. La mayor distancia norte-sur es de 870 km entre los paralelos 2° 30' N y 10° 20' N (Silva, 2005).

La cuenca se encuentra dividida en tres áreas de drenaje o regiones hidrográficas que son heterogéneas entre ellas: Alto Orinoco (10 %); Orinoco Medio (60 %) y bajo Orinoco (30 %) (Silva, 2005). El Alto Orinoco, abarca 101.000 km² del territorio venezolano perteneciente al estado Amazonas, que corresponde al área de la cuenca aguas arriba. Los tributarios principales son los ríos Mavaca, Ocamo, Padamo, Cunucunuma, Yagua y Ventuari (Silva, 2005).

El Orinoco Medio, tiene una superficie de 598.000 km² de la cual más del 90 % se ubica a la margen izquierda del río Orinoco; comprende la Orinoquia colombiana y sus afluentes son: Guaviare, Vichada, Tuparro, Tomo, Vita y Meta, que vienen de Colombia; luego están los cauces de Cinaruco, Capanaparo y Arauca (Silva, 2005).

El Bajo Orinoco tiene un área de drenaje de 301.000 km² sobre el territorio venezolano, de los cuales 189.000 son de Guayana y otros 74.000 son de la subregión deltaica, que incluye su cuenca colectora. Tiene más de 300 caños e innumerables islas fluviales. Entre los caños destacan Mánamo, Pedernales, Capure, Cocuina, Tucupita, Macareo, Mariusa, Araguao, Merejina y Río Grande, citados en el sentido de las agujas del reloj, siendo más importantes los de Mánamo, Macareo y Río Grande (Silva, 2005).

1.2.2 Cuenca del Amazonas

La cuenca del Amazonas es la mayor cuenca hidrográfica de Suramérica, se encuentra distribuida en nueve países: Brasil (63%), Bolivia (12%), Perú (16%), Ecuador (2%), Colombia (6%), Venezuela, Guyana, Guayana Francesa y Surinam (1%) (British Broadcasting Corporation - BBC, 2008). Se extiende desde los Andes orientales hasta el Océano Atlántico cubriendo aproximadamente 6.869.344 km² equivalentes al 40% del territorio sudamericano. El río Amazonas, que nace en la Cordillera de los Andes, es considerado el más largo y caudaloso del mundo. Recorre una distancia cerca de 6.000 kilómetros antes de desembocar en el Océano Atlántico con cerca de 200.000 m³/s en promedio. Este último valor corresponde a casi el 20% del total de agua superficial a nivel mundial (Vierns et al., 2005).

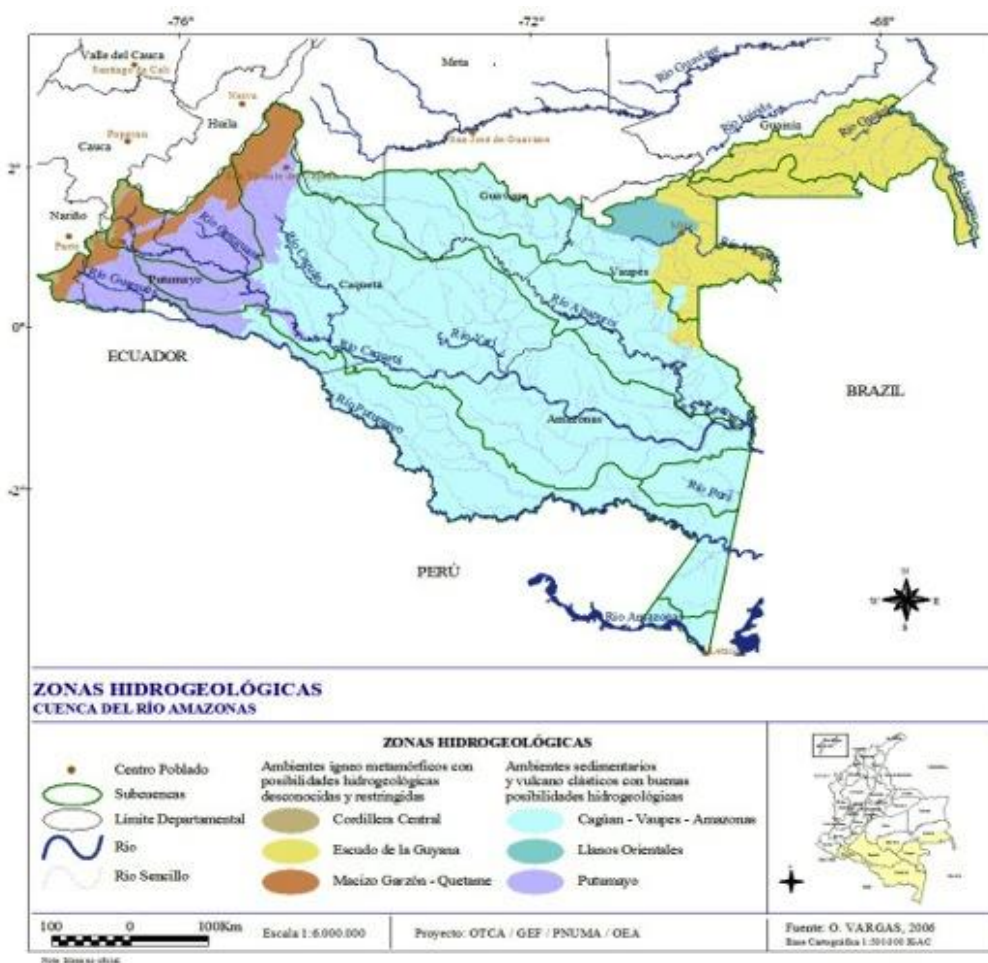
Por otro lado, el río Amazonas es el más profundo, en el estrecho de Óbidos (Brasil) alcanza los 300 m de profundidad (Brack, 1998); lo que le permite el ingreso de grandes embarcaciones hasta Iquitos en Perú, 2.375 km aguas arriba de la desembocadura en el océano atlántico. Además, el Amazonas es también el río más ancho de la Tierra. Su

10 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

anchura es variable, dependiendo de las crecientes, que en algunas partes llegan a inundar entre 20 y 50 km en ambos lados. Es por ello, que esta cuenca cuenta con una gran cantidad de humedales centrales amazónicos que están constituidos por una compleja red de lagos y llanuras de inundación, llamado Varzeas, que se extienden a lo largo de 300.000 km². Se estima que casi el 24% de la superficie total de la Amazonia está cubierta por cuencas sedimentarias (Pimentel & Hamza, 2012).

La Amazonia colombiana cuenta con un territorio aproximado de 476.000 km² representando el 6,4% del total del bioma amazónico (Sevilla, 1997) y el 42% del territorio nacional. Está compuesta por los departamentos de: Amazonas, Caquetá, Guainía, Guaviare, Putumayo y Vaupés (Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL, 2012). En el territorio colombiano, el río Amazonas solamente recorre un trayecto de 116 km que delimita la frontera con el Perú y marca la zona sur del trapecio amazónico (Mojica et al., 2005), (Figura 1-4).

Figura 1-4: Cuenca del Amazonas Colombiano. Fuente: IDEAM (2004).



1.3 Características Climáticas y Regímenes Hidrológicos de las Cuencas del Orinoco y el Amazonas Colombiano.

Las características y dinámica del régimen hídrico, la oferta, calidad y su variación espacial y temporal en la cuenca de la Amazonia y la Orinoquia, son factores determinantes para conocer vulnerabilidades y potencialidades. El régimen hidrológico de las cuencas del río Amazonas junto con las del Orinoco, están caracterizados como los de menor variabilidad en el país. Los rendimientos hídricos de la región superan ampliamente el promedio mundial, 58 l/s/km² siendo tres veces mayor que el promedio suramericano y seis veces más que la oferta hídrica promedio mundial (Laraque et al., 2013).

Los ríos que forman las extensas llanuras de inundación de las cuencas del Orinoco y el Amazonas dependen del sistema andino; desde allí, arrastran sedimentos en suspensión que les dan una apariencia barrosa; de ahí su apelativo de "ríos de aguas blancas" (Herrera, 2004). Las áreas de mayor precipitación en dichas cuencas varían entre 3.500 a 6.000 mm anuales, las cuales influyen en el clima, la hidrografía y los ciclos hidrológicos. Estas cuencas aportan el 15% del agua dulce que se vierte a los océanos. El régimen hidrológico tanto de la vertiente del Orinoco como de la vertiente del Amazonas, presentan un comportamiento mono modal, donde los meses más húmedos son de junio a agosto y los más secos de enero a marzo especialmente Orinoco, mientras que en la vertiente del Amazonas a partir del mes de octubre se inicia el período de mayor estiaje que se prolonga hasta el mes de marzo (SIAC, 2002). La Tabla 1-1 presenta algunas características hidrológicas de los cauces principales asociados a estas cuencas.

Tabla 1-1: Características hidrológicas de algunos cauces principales del Amazonas y Orinoco. Fuente: SIAC (2002).

Área Hidrográfica	Corriente	Área (Km ²)	Longitud (Km)	Caudal (m ³ /S)	Escorrentía (mm)	Rendimiento l/s/km ²	Volumen (m ³)
Orinoco	Arauca	8.649	439	828	3.020	96	26.120
	Meta	98.666	711	4.756	1.520	48	149.972
	Guaviare	139.731	468	7.621	1.720	55	240.337
	Vichada	25.235	624	1.232	1.540	49	38.862
Amazonas	Caquetá	199.200	1.242	15.286	2.420	77	482.064
	Putumayo	53.165	89	4.552	2.700	86	143.546

1.3.1 Cuenca del Orinoco

El régimen de temperatura es típicamente isotérmico, caracterizándose por una temperatura media relativamente uniforme en el ciclo anual. La temperatura media de la cuenca del Orinoco es de 26,7 grados Celsius (°C), la máxima media es de 32,3 °C y la mínima media es de 23 °C. Esta isoterma es propia de las bajas latitudes del trópico. Sin embargo, las variaciones de temperatura durante el día llegan a tener más de 10 °C de amplitud (Silva, 2005). La humedad del aire es de origen marítimo y continental, los vientos que la movilizan son principalmente alisios del noreste y los del sureste, respectivamente.

El régimen de precipitación es típicamente mono modal, con lluvias concentradas entre los meses de Mayo y Octubre, por causa de la mayor actividad de la convergencia intertropical a mediados y al término del verano astronómico. Se distingue claramente una estación seca desde Diciembre hasta Abril, principalmente porque aumenta la permanencia de la convergencia intertropical. Las precipitaciones varían mucho en la cuenca; en el lado guayanés Venezolano la precipitación media anual varía en rangos entre los 2.000 y 3.500 mm; 1.500 y 3.000 mm/año en los llanos orientales (ríos Apura y Orinoco); 2.300 mm/año en el sector de Puerto Ayacucho y 3.000 mm/año en San Fernando de Atabapo (Silva, 2005).

En la cuenca del Orinoco Colombiano, la precipitación media anual varía de la siguiente manera: 2.000 mm/año en Arauca); 2500 mm/año en Puerto Carreño-San José del Guaviare); 2.800 mm/año en Puerto Inírida y aumenta hacia la cordillera oriental, alcanzando los 4.000 mm/año en Puerto López-Meta y Yopal-Casanare, siendo estas zonas las partes más lluviosas de la cuenca, debido a la elevada humedad atmosférica local y al efecto orográfico. La parte menos lluviosa de la cuenca es la zona semiárida de Barquisimeto Venezuela, que promedia 55 mm/año (Silva, 2005).

En la ruta del cauce principal del Orinoco, la zona más húmeda se encuentra en el alto Orinoco, aguas abajo de La esmeralda, con precipitaciones entre 3.000 y 3.500 mm/año. Mientras que la zona más seca está en inmediaciones de Ciudad Bolívar con 1.000 mm/año (Silva, 2005).

Presenta una variación de escorrentía decreciente del piedemonte hacia la zona baja. En el piedemonte de la cordillera Oriental se presentan 3 zonas con características pluviométricas diferentes: la parte sur de la serranía de la Macarena, la zona central, que corresponde a las cuencas del alto Meta (ríos Guatiquía, Humea y Upía) y el alto Guaviare (ríos Guayuriba y Ariari) y, la zona norte, con las cuencas de los ríos Arauca (ríos Cobugón y Margua) y Casanare

El río Orinoco es considerado el tercer sistema ribereño más importante del mundo, después del Congo y el Amazonas, su descarga promedio es de 36.000 m³/s hacia el océano atlántico y ocupa el puesto número 20 en área de captación. Con sus 2.140 km de longitud es uno de los ríos más largos de América del Sur.

Los ríos principales que conforman el Orinoco en la parte Venezolana son el río Caroní, segundo más importante en la cuenca del Orinoco, siendo el segundo de mayor caudal y longitud con 4.850 m³/s y 952 km.

El río Orinoco tiene variaciones en el caudal debido a los cambios de temporada de lluviosa a seca. La escorrentía media de Agosto es del orden de los 28.000 m³/s y la media de marzo es del orden de los 5.000 m³/s, mientras que su caudal promedio máximo supera los 40.000 m³/s y su caudal mínimo absoluto puede ser de 5.000 donde los extremos históricos registros pueden llegar a 2.000 m³/s. Este régimen unimodal, determina una estacionalidad marcada en los ecosistemas (Pimentel & Hamza, 2012). Según datos registrados en la estación de ciudad Bolívar este régimen unimodal se caracteriza con altos flujos entre agosto y septiembre y bajos flujos entre febrero y marzo.

1.3.2 Cuenca del Amazonas

La cuenca Amazónica está constituida principalmente por el río Amazonas, el cual se origina en los nevados de los Andes peruanos, a más de 5.000 metros de altura. Recorre 5.890 km para llegar al Océano Atlántico, 2.969 km entre territorio peruano y colombiano y 2.921 km en territorio brasileño. El Amazonas es parte de los cuatro grandes sistemas hidrográficos que producen el 70 % de la descarga de agua dulce en América Latina. Siendo el primero en el mundo en total de descarga, con un promedio de 200.000 m³/s. Según el Sistema de Información de la Amazonia Colombiana (SIAMAC), de la Universidad Nacional de Colombia en Leticia, la cuenca amazónica descarga cerca del 15,47% del agua dulce de la Tierra, lo que representa entre 6,3 y 6,9 billones de m³ al año.

Durante el estiaje, el caudal en su desembocadura es de 80.000 m³/s, mientras que durante el periodo de máximo caudal en aguas altas, alcanza los 220.000 m³/s (Mojica, et al., 2005). Los caudales de los ríos que hacen parte de la cuenca Amazónica aumentan a partir del mes de abril y alcanzan un máximo en Julio. La mayoría de los cauces superan 5 o 6 veces el caudal del periodo seco. Luego de la época de lluvias comienza la temporada seca hasta finales de Noviembre. Con niveles de estiaje máximos en los meses de diciembre a febrero (Espinoza et al., 2008). En el río Amazonas, el caudal máximo promedio es tres veces el caudal mínimo promedio (Vierns et al., 2005).

El Amazonas tiene un régimen ecuatorial de lluvias con dos picos de precipitación. Es una de las regiones con mayor precipitación del mundo y una fuente importante de vapor de agua. El 20 % del promedio de la escorrentía mundial corresponde a la cuenca amazónica. Pero también ocurren sequías intensas (Espinoza et al., 2010). La distribución de la precipitación oscila entre los 2.500 y los 4.500 mm y del volumen de precipitación anual en

la cuenca, se estima que un 61% se convierte en escorrentía superficial, generando caudales medios de 62.000 m³/s (González et al., 2006). Sin embargo, la variabilidad interanual de la cuenca del Amazonas puede causar eventos extremos significativos. Por ejemplo, la sequía del año 2005 que afectó las cuencas de los ríos Solimões y Madeira en términos ecológicos, sociales y económicos (Espinoza et al., 2010).

La riqueza hídrica de la región de la cuenca del Amazonas en Colombia está representada por la extensa red fluvial, las condiciones de almacenamiento de aguas subterráneas, la existencia de cuerpos lenticos y la presencia de humedales y planicies inundables de los grandes ríos y sus afluentes. En la zona de piedemonte Amazónico Colombiano, la escorrentía oscila entre 3.000 y 4.200 mm, siendo la parte alta del río Caquetá la que mayor aporta con 130 l/s/km² y un caudal estimado de 175.000 m³/s. La variación del nivel de este río entre aguas altas y bajas es de 7,5 a 5 m. En el caso de las subcuencas como la del río Putumayo y Apaporis se presentan rendimientos de 86 y 80 l/s/ km², respectivamente. En las partes bajas, la escorrentía está entre 1.500 y 3.000 mm con rendimientos de 799 l/s/km² y un área de drenaje de 332 km². El Vaupés y el Guanía son ríos de gran importancia y sus áreas de drenaje ocupan el 8,7 y 5,6% de la región colombiana, dando origen al río Negro, el mayor afluente de la cuenca del río Amazonas (González et al., 2006).

1.4 Redes de monitoreo hidrológico en Colombia: Casos de las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano.

A causa de la variación de los regímenes hidrológicos la disponibilidad del agua cambia continuamente, con incidencias desde lo regional a lo continental. De ahí, la necesidad de desarrollar e implementar sistemas locales de observación que permitan monitorear la variabilidad espacio temporal de los caudales superficiales con el fin de registrar, día a día, tales variaciones llegando a generar registros históricos de los mismos. Estas mediciones son la base fundamental sobre la cual se apoyan los estudios hidrológicos en términos de modelación de la ocurrencia del recurso hídrico en el espacio y en el tiempo. La precisión en tal conjunto de predicciones está fuertemente condicionada por la calidad de los datos que son utilizados para tal fin. Dicha calidad, a su vez, es dependiente de un conjunto de procesos y actividades que forman parte de un campo de aplicación de la hidrología llamado la hidrometría.

1.4.1 La hidrometría y su problemática en las Redes de Monitoreo

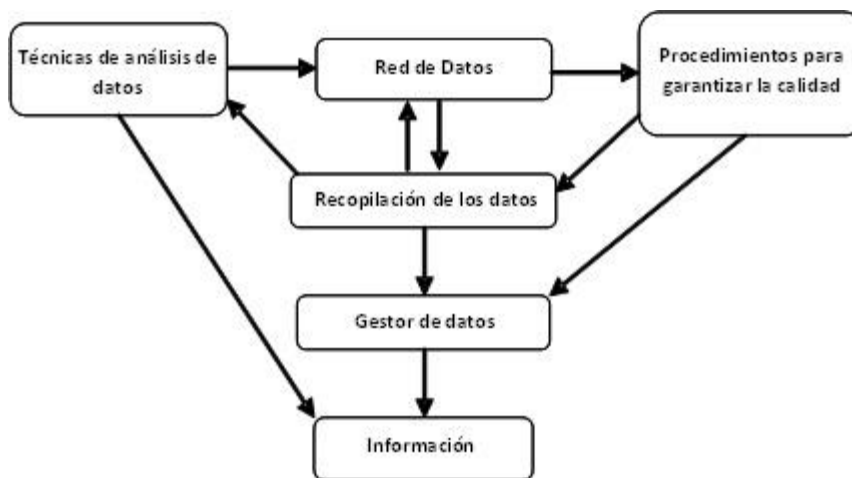
La hidrometría se encarga de medir y registrar los datos relacionados con la distribución espacial y temporal del agua sobre la Tierra, además, de procesar y proveer la información de manera confiable y oportuna con el fin de conocer la dinámica y evolución de las variables hidrológicas en tiempo y espacio (IDEAM, 2007). La Organización Meteorológica Mundial (OMM) establece que para la obtención de información hidrométrica efectiva se

requiere de medios físicos (estaciones) que permitan comunicar la información recolectada y una capacidad de disponer datos históricos mediante la toma de datos, procesamiento, almacenamiento y posterior disponibilidad de estos de manera oportuna (OMM, 2011). Gracias al desarrollo de la hidrometría es posible analizar procesos hidrológicos como: sequías, inundaciones, desbordamientos, entre otros efectos que actualmente a razón del Cambio Climático se estima serán cada vez más intensos (IPCC, 2007).

Una Estación Hidrométrica es aquella que se ubica en un río y/o cuerpo de agua para desarrollar mediciones constantes de variables hidrológicas específicas. El conjunto de estaciones hidrométricas constituye lo que se denomina Red Hidrológica.

El actual sistema de información hidrológico establecido por la OMM consiste en el procesamiento de datos mediante técnicas de análisis seleccionadas y a través de herramientas de apoyo como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permiten integrar los datos y representarlos de forma espacial con buena calidad. La calidad, es un componente integrante del sistema de información, que va desde las actividades de campo en la medición hasta la difusión de los datos e información (Ortega & Pedrozo, 2012) (Figura 1-5).

Figura 1-5: Componentes de un Sistema de Información Hidrológico. Fuente: OMM (2008) citado por Ortega & Pedrozo (2012).



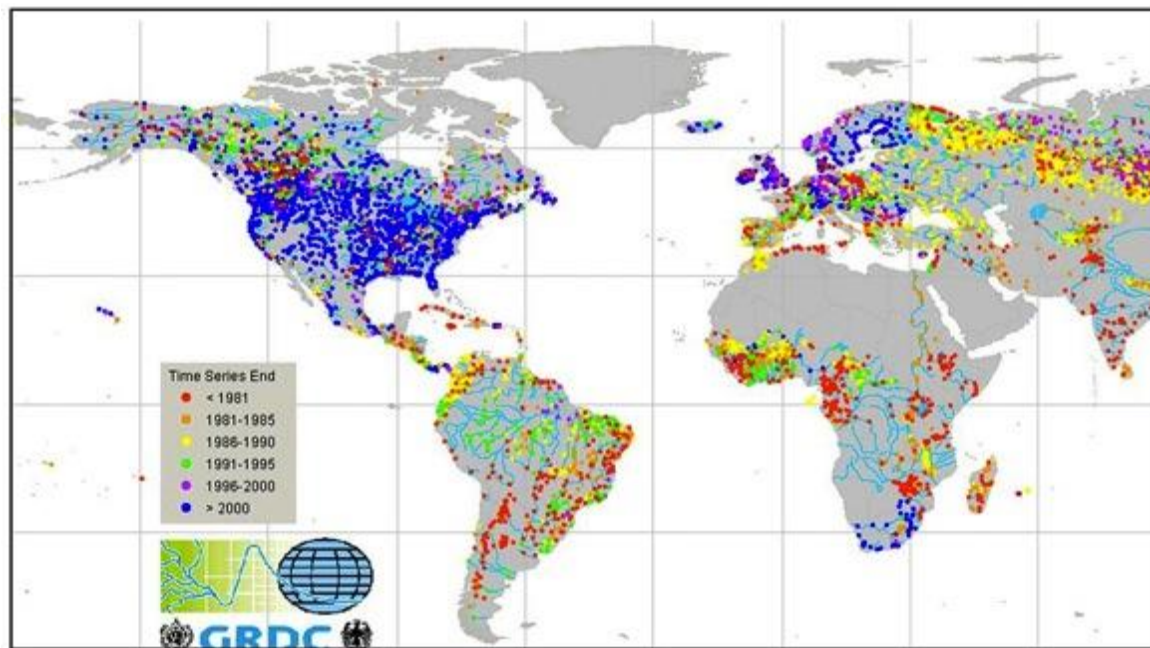
En este contexto mundial, para asegurar la disponibilidad información hidrométrica, cuatro organizaciones internacionales se articularon en 1992 para poner en práctica el Sistema Mundial de Observación del Clima (*Global Climate Observing System - GCOS*) (Da Silva, 2010). La Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Comisión Internacional de Oceanografía (CIO), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y los Concejos Internacionales para la Ciencia, son las entidades que dirigen el sistema de información hidrológico mundial.

A pesar de estos esfuerzos muchas redes hidrológicas carecen de un nivel adecuado de calidad los de los datos, de fiabilidad de los instrumentos de calibración y, aún más

delicado, una importante disminución de las estaciones de monitoreo. Según un estudio realizado por Calmant & Seyler (2006), se afirma que la base de datos Global Runoff Data Center (GRDC), desarrollada por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), que almacenaba desde 1970 entre 6.000 a 4.000 registros hidrométricos diarios por año a nivel mundial, evidencia una reducción significativa de estaciones hidrométricas de monitoreo desde 1980, a pesar de que la distribución espacial es de 7.362 estaciones con registros mensuales (Figura 1-6). Además, se analiza que el tiempo de acceso a los registros puede demorar varios años y la mayoría de países en situación de pobreza, no registran datos para periodos superiores a 30 años (Da Silva, 2010).

Este problema se evidencia aún más en los países en vía de desarrollo, donde es común la falta de registros hidrométricos in-situ, debido al poco presupuesto de las agencias administradoras de estas redes lo cual dificulta, no sólo la instalación de nuevas estaciones, sino que también el mantenimiento de las que se encuentran en funcionamiento, siendo en algunos casos ineficientes e inexistentes (León et al., 2011).

Figura 1-6: Distribución mundial de la capacidad de monitoreo del agua. Fuente: Calmant & Seyler (2006).



Dicha situación dificulta sin duda el desarrollo de modelos hidrológicos capaces de representar la variabilidad de caudales superficiales en el espacio y en el tiempo. Los aspectos que han determinado la baja utilidad práctica de la información para el desarrollo

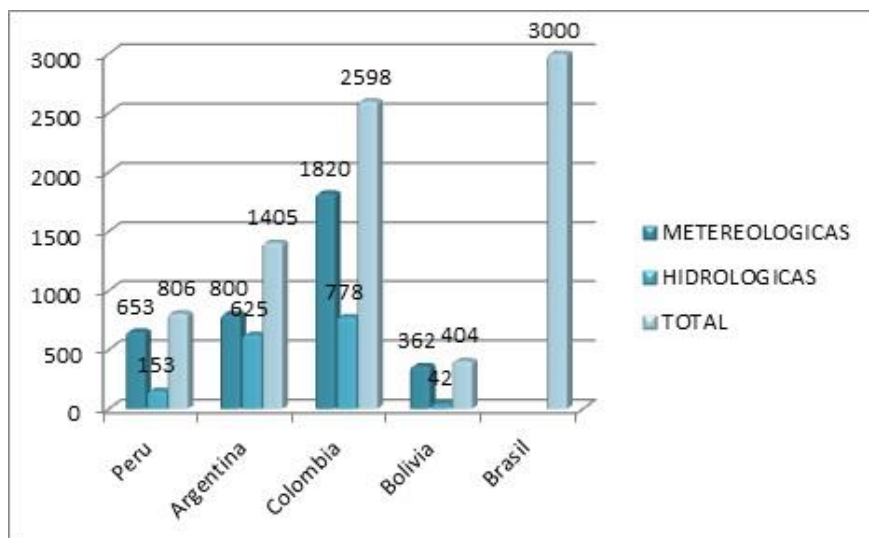
de modelos es: i) la poca confiabilidad de la información existente; ii) el difícil acceso en razón de la heterogeneidad y dispersión de los datos; iii) la deficiente sistematización, la multiplicidad y diferencias de las entidades encargadas de la información básica, con las encargadas de adoptar las políticas y toma las decisiones respectivas en materia de medio ambiente, recurso hídrico y ordenamiento territorial; iv) las deficiencias de actualización y v) los formatos ajenos a las demandas tecnológicas actuales (IDEAM, 2009).

1.4.2 Problemática del monitoreo in-situ en Colombia

En el contexto colombiano la experiencia se reduce a un sistema de información que, en comparación con otros países de Latinoamérica, cuenta con mayor número de estaciones in-situ en todo el territorio nacional (Figura 1-7). Sin embargo, la realidad sobre las redes hidrométricas nacionales está caracterizada por la deficiente calidad espacio temporal de los datos, la dificultad de acceso a los ya existentes; la poca modelación y análisis de los regímenes hidrológicos en las cuencas que articulen esta información para una adecuada gestión del recurso hídrico.

De hecho, la Contraloría General de la República (CGR), reporta en su Informe sobre el Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente 2007-2008 (CGR, 2007), que las autoridades ambientales colombianas no realizan procesos de seguimiento y monitoreo adecuados en términos de periodicidad, sistematización y articulación de la información. Es decir, esto es un problema nacional que desde hace varios años se ha reconocido.

Figura 1-7: Estadísticas de Estaciones Meteorológicas en Suramérica. Fuente: IDEAM (2009).



Sin duda, para decidir sobre la gestión del recurso lo primero es conocer de cuánto, cuándo y dónde se dispone del mismo; y esto no es posible si no se conocen registros diarios de

niveles y/o caudales de cauces principales y secundarios distribuidos espacialmente de forma homogénea.

En Colombia, la autoridad nacional encargada de operar y mantener la red básica hidrológica nacional es el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, la cual tiene entre sus principales funciones el obtener, almacenar, analizar, procesar y divulgar información sobre la hidrología, hidrogeología, meteorología y otros aspectos biofísicos de la nación (Ministerio de Ambiente - Minambiente, 1994). Por lo tanto es la entidad encargada de administrar las 1.400 estaciones pluviométricas, 520 estaciones climatológicas y 775 estaciones hidrológicas con las que cuenta el país. De estas últimas, 358 estaciones son limnimétricas y 417 estaciones son limnigráficas, cada una de ellas para el registro diario de niveles de agua y caudales. En Colombia, funcionan aproximadamente 1.500 estaciones hidrométricas, de las cuales el 50% son operadas por el IDEAM (IDEAM, 2007). Sin embargo, la red meteorológica nacional ha disminuido considerablemente a lo largo de los años. A pesar de contar con un número alto de estaciones, la realidad es que las redes hidrométricas nacionales, incluidas las instaladas en las cuencas del Orinoco y Amazonas, presentan una baja densidad espacial ligada a una distribución no uniforme y una deficiente calidad en los datos que se registran a partir de ellas.

En efecto, en las cuencas del Orinoco y el Amazonas, el IDEAM cuenta con una red de estaciones limnimétricas y limnigráficas para registro de niveles y caudales diarios, localizadas en los cauces principales y secundarios de estas cuencas (Figura 1-8), las cuales conforman el programa de monitoreo in-situ desarrollado para estas regiones.

De acuerdo con el catálogo del IDEAM, las Cuencas del Orinoco y el Amazonas cuentan con un total de 143 estaciones limnimétricas y limnigráficas: 56 estaciones para la cuenca del Amazonas, y 87 estaciones para la cuenca del Orinoco. A pesar de la capacidad instalada, la totalidad de la información hidrométrica no es completa en todas las estaciones. En cuanto a información de Niveles, el 72% de ellas, (103 estaciones de las 143) dispone de datos y el restante 28% (40 estaciones de las 143) no reporta información de este tipo. Para el caso de la información de Caudales, solo el 31% (44 estaciones de las 143) dispone de datos, mientras que el restante 69% (99 estaciones de las 143) no presenta información de este tipo. La Tabla 1-2, sintetiza para las dos cuencas, el número de estaciones que cuentan con información de Niveles y Caudales, considerando periodos mayores a 5 años, entre 3 y 5 años y menores a 3 años o sin datos.

Figura 1-8: Estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM en las cuencas del Orinoco y el Amazonas. Fuente: Adaptado de IDEAM (2012).

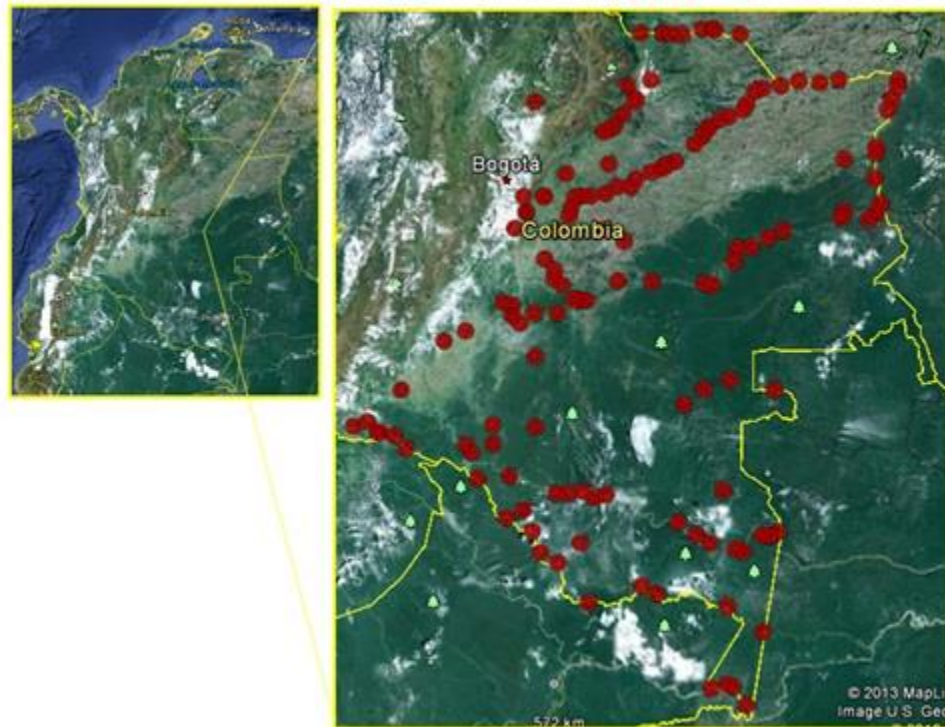


Tabla 1-2: Disponibilidad de información hidrométrica in-situ, registro IDEAM para las cuencas del Orinoco y el Amazonas. Fuente: Adaptado del reporte de cotizaciones de datos, hechas por el IDEAM entre los años 2012 y 2013.

Periodos Disponibles de 2002 a 2010	No. Estaciones del IDEAM con Información Disponible			
	Cuenca del Amazonas		Cuenca del Orinoco	
	Niveles	Caudales	Niveles	Caudales
Sin Datos, 1 año o 2 años	8	39	35	62
3 años a 5 años	8	3	11	6
5 años a 9 años	40	14	41	19

La Cuenca del Orinoco, presenta mayor disponibilidad de información de Niveles en periodos mayores a 5 años, gracias al número de estaciones limnimétricas que posee (41 estaciones de 87); sin embargo, registra la mayor deficiencia de información de Caudales (62 estaciones que constituyen el 71%) para periodos de 1 o 2 años; tan solo el 22% (19 estaciones) de las estaciones que proporcionan información de Caudales registran información para periodos mayores a 5 años.

En el caso de la Cuenca del Amazonas, la deficiencia de registros se mantiene, el 70% (40 estaciones) registran información de niveles para periodos superiores a 5 años y el 15% (8 estaciones) no reportan información o presentan disponibilidad de 1 o 2 años. En el caso de las estaciones que registran caudales, el 69% (39) de las estaciones reportan no tener datos, estar suspendidas o contar con información de 1 o 2 años para niveles y caudales. Tan solo el 25% (14 estaciones) registran caudales con periodos mayores a 5 años.

En conclusión, en el momento de adquirir los datos o acceder a ellos, la Cuenca del Orinoco cuenta con menos del 53% de la información que se considera aprovechable en el catálogo del IDEAM y la Cuenca del Amazonas, cuenta con menos del 40%. La mayoría de las estaciones presenta registros para periodos inferiores a 3 años y datos faltantes en el resto.

Bajo este contexto, se hace necesario optimizar los sistemas de monitoreo hidrológico nacionales, a través de la densificación de estaciones hidrométricas, actualizaciones técnicas y tecnológicas, mejoramiento de las operaciones en terreno, eficiente gestión de los datos y difusión en tiempo real. En efecto, el mejoramiento del registro de las variaciones de los Niveles y Caudales medios en dichos cauces, permitiría mejorar los modelos hidrológicos y de predicción de eventos climáticos utilizados para la toma de decisiones territoriales, tanto por el mismo IDEAM, como por instituciones como las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), las Secretarías Municipales de Ambiente y Agricultura, los Consejos Municipales para la Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), entre otras.

1.4.3 Descripción y características de los registros in-situ a utilizar en el marco de este estudio.

Como ya se ha descrito anteriormente, el IDEAM es la entidad encargada de reportar la información de Niveles y Caudales para la mayoría de la red hídrica del país. Los datos de niveles in-situ son obtenidos a partir de las mediciones realizadas a los niveles de agua con las escalas de las estaciones hidrométricas. Los datos de los caudales in-situ se obtienen mediante una práctica conocida como aforo. Los aforos realizados son distribuidos durante el ciclo hidrológico y posteriormente se realiza un ajuste de curva de calibración. Para llevar a cabo el aforo se utilizan equipos como el molinete o el ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler); este último es comúnmente utilizado para medir caudal en grandes cauces como el Orinoco o el Amazonas. Los registros in-situ utilizados en este estudio se sintetizan en la Tabla 1-3; considerando la disponibilidad de información para los principales cauces de la cuenca del Orinoco y el Amazonas. Presentando información detallada del número de estaciones in-situ, el periodo y tipo de información disponible, con el número de años que presentan registros. En este último aspecto, como ya se ha señalado, en algunas estaciones la información está incompleta, ya sea por falta de presupuesto para el mantenimiento de las estaciones o porque no se detecta a tiempo la falta de datos.

Tabla 1-3. Listado de Estaciones in-situ utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

Cuenca	Cauce	Estacion	Tipo de Estación	Periodo Disponible Niveles	No. Años Disponibles	Periodo Disponible Caudales	No. Años Disponibles	
ORINOCO	ARAUCA	NUBIA LA FINCA	Limnimetrica	2002-2006	5	2002-2006	5	
		PTE INTERNATIONAL	Limnimetrica	2002-2010	9	2002-2010	9	
		PTO COLOMBIA	Limnimetrica	2002-2004	3	Sin Datos	0	
		ALCARABAN EL	Limnigrafica	2002-2010	9	2002-2010	9	
		ANGELITOS LOS	Limnimetrica	2002-2006	5	2002-2006	5	
	CAJAROS LOS	Limnimetrica	2002-2006	5	2002-2005	4		
	META	PARAISO PEREGRINO	Limnimetrica		2002;2008-2010	4	Sin Datos	0
		POYATA LA	Limnimetrica		2002-2008	7	Sin Datos	0
		PTO TEXAS	Limnimetrica		2002-2010	9	Sin Datos	0
		CABUYARO	Limnimetrica		2002-2010	9	2002-2010	9
		HUMAPO	Limnigrafica		2002-2010	9	2002-2010	9
		AGUAVERDE	Limnigrafica		2002-2010	9	2002-2010	9
		PATEVACAL	Limnimetrica		2002-2010	9	Sin Datos	0
		PTO FORTUNA	Limnimetrica		2002-2010	9	Sin Datos	0
		SAN JORGE	Limnimetrica		2002-2008	9	Sin Datos	0
		ACEITICO	Limnigrafica		2002-2010	9	2002-2010	9
	STA MARIA	Limnimetrica		2002-2010	9	2002-2010	9	
	GUAVIARE	BARRANCO MURCIELAGO	Limnigrafica		2002-2010	9	2002-2010	9
		PUEBLO NUEVO	Limnimetrica		2002-2010	9	2002-2010	9
		SAPUARA	Limnimetrica		2003;2008-2010	4	Sin Datos	0
		GUAYARE	Limnimetrica		2002-2010	9	2002-2010	9
		BAJO GUAYABERO	Limnimetrica		2002-2010	9	Sin Datos	0
		MAPIRIPANA	Limnigrafica		2002-2010	9	2002-2010	9
		PTO ARTURO	Limnigrafica		2002-2010	9	2002-2010	9
		CEJAL	Limnimetrica		2002-2010	9	2002-2010	9
	TRAPICHE EL	Limnimetrica		2002-2003	2	2002-2003	2	
	ORINOCO	MATAVEN	Limnimetrica		2002-2003;2008-2010	4	2003	1
		PTO NARINO	Limnigrafica		2002-2003;2008-2010	4	2003	1
		CASUARITO	Limnimetrica		2002-2003	2	2003	1
		RONCADOR	Limnigrafica		2002-2003;2008-2010	4	2003	1
		PTO CARREÑO	Limnimetrica		2002-2010	9	2002-2010	9
	AMAZONAS	CAQUETA	MONOS LOS	Limnimetrica	2002-2008	7	Sin Datos	0
			MARIA MANTECA	Limnimetrica	2002-2008	7	2002-2008	7
MERCEDES LAS			Limnigrafica	2002-2008	7	2002-2008	7	
ARACUARA			Limnimetrica	2002 - 2010	9	Sin Datos	0	
VAUPES		CUEMANI	Limnimetrica	2003;2007-2010	5	Sin Datos	0	
		CERROS LOS	Limnimetrica	2002-2009	8	2002-2009	8	
PUTUMAYO		MITU AUTOMATICA	Limnigrafica	2002-2010	8	2002-2009	8	
		SAN AGUSTIN	Limnimetrica	2007-2010	4	2007-2010	4	
		PTO TOLOZA	Limnimetrica	2002-2010	9	Sin Datos	0	
VICHADA		BELLAVISTA	Limnimetrica	2008-2010	3	2008-2010	3	
		STA RITA	Limnimetrica	2003; 2008-2010	3	2003;2008-2010	3	
AMAZONAS		LETICIA	Limnigrafica	2002-2010	9	2002-2010	9	

1.5 Conclusiones

Las cuencas del río Orinoco y del Amazonas en Colombia, por sus dimensiones continentales, presentan una dinámica hidrológica de gran importancia la cual resulta difícil de comprender por la escasez de registros hidrométricos de buena calidad en el espacio y en el tiempo. Esta deficiencia redundará en la consecuente incapacidad que tiene la comunidad científica para valorar de manera acertada la riqueza hídrica de estas regiones, que sin duda afecta directamente en el desarrollo de ecosistemas y por consiguiente en las formas de vida. La necesidad de desarrollar e impulsar iniciativas que permitan mejorar el monitoreo de las corrientes superficiales de esas zonas, para comprender su comportamiento hidrológico es cada vez más evidente.

A nivel mundial entidades como la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Comisión internacional de oceanografía (CIO), el programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP) y demás institutos nacionales encargados del monitoreo hidrológico y climatológico en los países, como es el caso del IDEAM; han desarrollado programas que responden a los objetivos de la entidad y actualmente se realizan esfuerzos para desarrollar alianzas, programas y convenios de cooperación internacional, que permitan la transferencia de tecnologías, conocimientos, habilidades o experiencias por parte de países u organizaciones multilaterales, conocida como la Ayuda Oficial al Desarrollo (AOD), cuya finalidad busca llevar a cabo un constante seguimiento de los recursos hídricos. Sin embargo, a pesar de que Colombia a través del IDEAM ha realizado un significativo esfuerzo con la modernización de la red hidrometeorológica en el 2014 con la cual busca tener un buen sistema de monitoreo hidrológico, la información aportada por dichos sistemas está enfocada a la vertiente del Magdalena y la región Caribe; para el caso de la Amazonía y la Orinoquia, la infraestructura que actualmente existe, no es suficiente para cualquier tentativa de modelación hidrológica, principalmente en grandes cauces como el Orinoco o el Amazonas.

La cuenca del Orinoco y el Amazonas presenta una red hidrométrica que en los últimos diez (10) años ha disminuido el registro de información en un 46% de sus estaciones, lo que afecta la calidad y representatividad de la información hidrológica disponible y obliga a que personas u organismos ajenos al ente oficial en muchos casos realicen interpolaciones para cubrir los vacíos de información, estimando variables que incrementa el grado de incertidumbre en el monitoreo hidrológico (Ortega & Pedrozo, 2012).

Esta situación, pone en manifiesto la importancia de integrar los sensores remotos al sistema de monitoreo hidrológico, para mejorar la adquisición, manipulación y acceso a la información hidrológica; permitiendo desarrollar un sistema que organice la información hidrológica, para realizar un mejor ajuste y precisión de los modelos (León et al, 2006).

2. Altimetría de radar por satélite: Historia, Principios de funcionamiento, Aplicaciones en la Hidrología y desarrollo en las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano.

2.1 Los satélites: Tipos y características

Un satélite es cualquier objeto que orbita alrededor de otro. Estos pueden ser naturales, como la Luna terrestre, o artificiales, como los satélites meteorológicos, multispectrales, GPS, entre otros. Los satélites artificiales pueden orbitar alrededor de lunas, cometas, asteroides, planetas, estrellas o incluso galaxias. Al entrar en posición, cada uno de ellos sigue un recorrido el cual es conocido como órbita. Particularmente sobre la Tierra, cuando un satélite se encuentra en órbita, es porque la gravedad de la Tierra sostiene el satélite en una trayectoria que va alrededor de esta. La órbita de un satélite es seleccionada encima de la superficie terrestre por la empresa gestora y está determinada principalmente por la altura del satélite y la inclinación en relación al Ecuador. Este posicionamiento del satélite se conoce como la orbitografía del mismo y tendrá consecuencias sobre la resolución temporal y espacial del satélite para la adquisición de datos. En efecto, el cálculo de la orbitografía de un satélite resulta de varias consideraciones tales como: la naturaleza de los fenómenos estudiados, las especificaciones y capacidad de los instrumentos embarcados a bordo, las muestras espacio-temporal y los objetivos de la misión.

Existen varios tipos de órbitas donde se ubican los satélites: Órbita baja LEO (*Low Earth Orbit*), donde los satélites orbitan entre 100 y 300 millas de la Tierra. Órbita media MEO (*Medium Earth Orbit*), en la que los satélites orbitan entre 6.000 y 12.000 millas de la Tierra y Órbita Geoestacionaria GEO (*Geostationary Earth Orbit*), en la cual los satélites están fijos y situados sobre el Ecuador, encontrándose a 22.282 millas sobre la Tierra (Boeing, 2012).

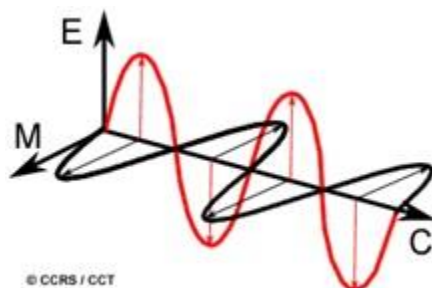
Cuando un satélite está en órbita alrededor de la Tierra, los sensores a bordo para el estudio de fenómenos que tienen ocurrencia sobre la superficie terrestre, observan una cierta parte de dicha superficie. Esta zona se llama: traza, franja o barrido. Los sensores ubicados en un satélite para la observación de la superficie terrestre tienen una franja cuya anchura varía por lo general entre 10 y 100 kilómetros. La órbita del satélite y la rotación de la Tierra trabajan juntas para permitir una cobertura completa de la superficie del planeta, conocida como ciclo orbital (Ressources Naturelles Canada - RNCAN, 2008). El

tiempo requerido para completar un ciclo orbital varía de un satélite a otro en función de su orbitografía. Así pues, un satélite ubicado a 1.300 km de altitud tendrá una resolución espacial más baja que otro ubicado a 800 km de altitud, es decir, que la distancia entre trazas o franjas del primero será más importante que la distancia entre trazas para el segundo. Sin embargo, la resolución temporal del primero, es decir, el tiempo que tomará el satélite en completar una órbita completa alrededor de la Tierra, serán más alta que la resolución temporal del segundo.

En la actualidad existen millares de satélites en órbita alrededor de la Tierra, los objetivos se diversifican y las tecnologías se mejoran año tras año, gracias a una mejor comprensión de las leyes de la física y del espacio. Se distinguen varios tipos de misiones: Satélites Astronómicos, Satélites de Comunicaciones, Satélites de Reconocimiento, Satélites de Navegación, Satélites Meteorológicos, Satélites de Observación de la Tierra. Estos últimos son particularmente utilizados para observar desde el espacio la variabilidad del comportamiento espacial y temporal de diversos fenómenos que tienen ocurrencia sobre la superficie terrestre a nivel de la variabilidad del uso de suelo, de cuerpos de agua continentales y oceánicos, de glaciares, entre otros. Este tipo de satélites fundamentan el tipo de observación deseado en función a la cuantificación de energía (espectral, radar o láser, según corresponda al tipo de sensor a bordo) emitida y la energía reflejada por el objetivo barrido en superficie.

Tal tecnología permite la adquisición de información sobre la superficie de la Tierra a través de la interacción energía-materia que ocurre con la radiación electromagnética, de acuerdo a las longitudes de onda o frecuencia de energía. La radiación electromagnética se compone de un campo eléctrico (E) y un campo magnético (M). El campo eléctrico varía en magnitud, en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la radiación. El campo magnético está orientado perpendicular al campo eléctrico. Los dos campos se están moviendo a la velocidad de la luz (C) (Figura 2-1) (RNCAN, 2008).

Figura 2-1: Composición de la radiación electromagnética. Fuente: RNCAN (2008).

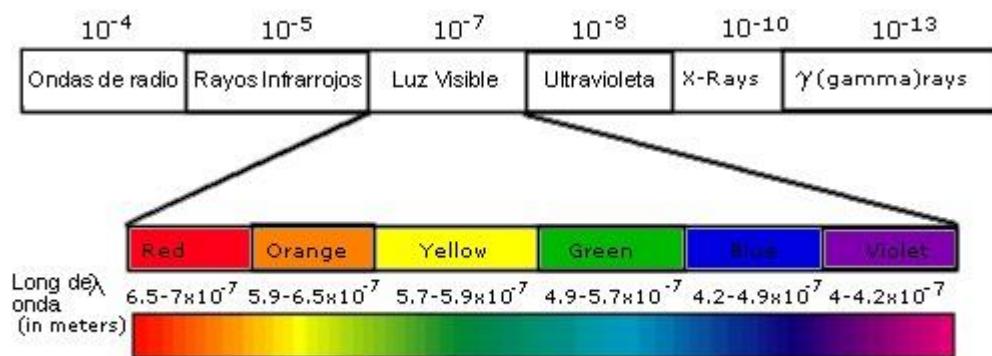


Este conjunto de ondas electromagnéticas presentan una distribución que hacen referencia al espectro electromagnético. El espectro es la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Mediante el espectro se permiten realizar medidas como la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la radiación. La longitud de onda (λ) es el periodo espacial de la misma, es decir, la distancia que hay de pulso a pulso y la Frecuencia (f) es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico (Casanova, 2012).

El espectro se extiende desde la radiación de menor longitud de onda como los rayos gamma y los rayos x, pasando por la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio (Figura 2-2).

Todos los materiales naturales o artificiales de la superficie de la Tierra, pueden emitir, reflejar, transmitir o absorber selectivamente la energía electromagnética caracterizada por reflectancias propias en cada banda del espectro electromagnético. La reflectancia es una medida de superficie que representa la capacidad de esa superficie para reflejar la luz. Es a través de esa característica que el sensoramiento remoto determina la naturaleza de los objetivos analizados, a través de una técnica llamada teledetección.

Figura 2-2: Espectro electromagnético. Fuente: Casanova (2012).



2.2 La Teledetección y surgimiento de la Altimetría de Radar por Satélite - ARS.

La teledetección es una técnica que proporciona información sobre la superficie de la Tierra. Abarca todo el proceso de captura, almacenamiento de energía de la radiación electromagnética emitida o reflejada, procesa y analiza la información. La teledetección implica una interacción entre una serie de componentes como: La fuente de energía e iluminación (A), la radiación y la atmósfera (B), la interacción con la superficie de la Tierra (C), la detección de energía por el sensor (D), la transmisión, recepción y el procesamiento en una estación receptora (E), Interpretación y análisis (F), aplicación de la información obtenida para resolver un problema particular (G) (Figura 2-3).

2.3 Principio de la Altimetría de Radar por Satélite (ARS)

Un radar es un dispositivo que emite una señal electromagnética que se desplaza a la velocidad de la luz. Dicha señal es reflejada por un objeto, a partir del cual una fracción de la energía es retornada al emisor y la otra es dispersada en diferentes direcciones. La interpretación de la energía retornada al emisor da cuenta de la naturaleza del objeto observado por el satélite.

Un radar altimétrico es un dispositivo a bordo de un satélite. Su principio de funcionamiento es exactamente el de un radar, como el descrito anteriormente. Este instrumento se basa en la emisión de una onda electromagnética vertical, midiendo el intervalo de tiempo que separa la emisión de las ondas electromagnéticas hasta recibir un eco como respuesta de la reflexión del objeto iluminado; este tiempo es luego convertido en distancia al ser multiplicado por la velocidad de la luz, espacio en el que las ondas electromagnéticas se propagan. Específicamente, para una determinación precisa en la distancia altimétrica (R) es necesario conocer el tiempo que tarda la onda radar en hacer un trayecto ida y vuelta a la superficie y la órbita del satélite (H) (Figura 2-4).

En otras palabras, este principio de Altimetría de Radar por Satélite (ARS) se utiliza para medir la distancia instantánea que separa el satélite de una superficie oceánica o continental. Donde (h) es la medida del nivel del agua, que se obtiene a partir de la diferencia entre la altura de la órbita del satélite (H) y la distancia altimétrica (R). La Ecuación 2-1 expresa este principio.

$$h = H - R \quad 2-1$$

Para obtener la medida altimétrica (h) que da cuenta del nivel instantáneo de un cuerpo de agua observado, se debe tener en cuenta la referencia orbital en la que se encuentre el satélite; generalmente es el elipsoide terrestre y en algunos casos se ha utilizado el geoide terrestre. El elipsoide terrestre, al igual que el geoide terrestre, son referencias muy importantes para muchas aplicaciones como la geodesia, geofísica, el clima, la hidrología, estudio de las cuencas hidrográficas, la aeronáutica, las comunicaciones, entre otras.

El elipsoide es una superficie definida matemáticamente que representa una forma de la Tierra físicamente idealizada como una elipse. El elipsoide está asociado con un sistema de referencia, como por ejemplo el WGS (World Geodetic System) 1984 o el EGM (Earth Gravitational Model) 2008. Por el contrario, el geoide, corresponde a la superficie imaginaria sobre la cual la atracción gravitacional es igual en todas partes, es decir el geoide es la representación de una superficie de referencia equipotencial a la gravedad terrestre. La imagen derecha de la Figura 2-5 representa la variación de los campos gravitatorios, es decir la forma del geoide. Actualmente el satélite GOCE (Gravity field and

28 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

steady-state Ocean Circulation Explorer) de la Agencia Espacial Europa es la encargada de monitorear el Geode terrestre.

Figura 2-4: Principio la altimetría de radar por satélite para el medio oceánico. Fuente: Adaptado del Centre National d'Études Spatiales - CNES (2013)

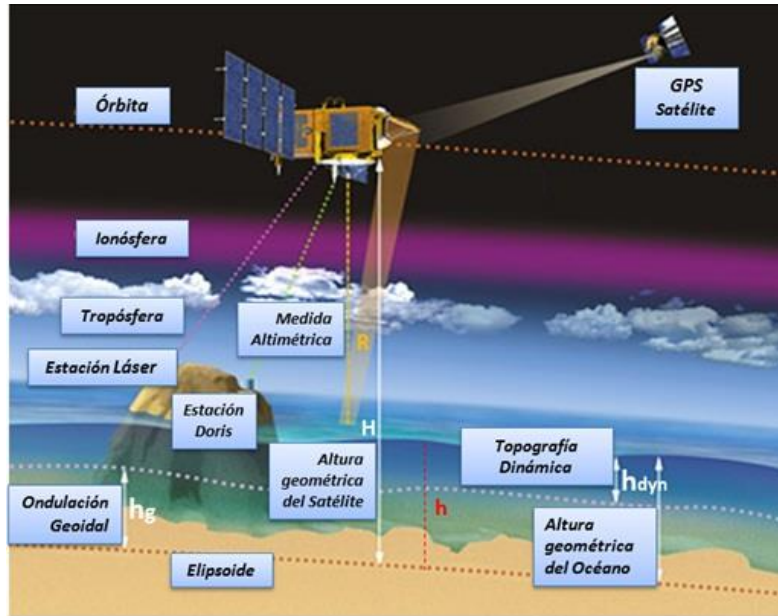
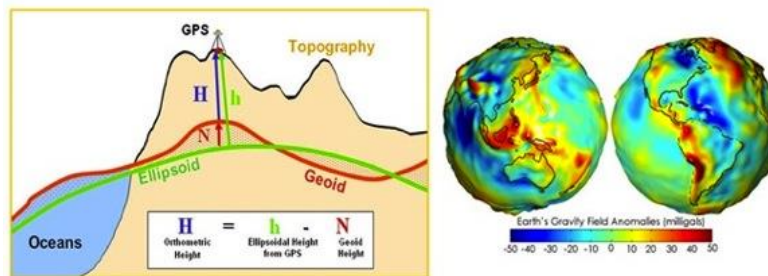


Figura 2-5: Elipsoide (Izquierda) y Geode Terrestre (Derecha). Fuente: National Aeronautics and Space Administration - NASA (2004) citado por Schmidt et al. (2006).



Sin embargo, para el caso del medio continental, las medidas altimétricas que se obtienen a partir de la ARS muestran una gran variabilidad, presentando errores que pueden deberse a las señales de retorno se ven interferidas por la composición de gases en la atmósfera como el oxígeno, el ozono, el vapor de agua o a señales electromagnéticas que afectan la señal emitida por el radar. Es por esta razón, que para lograr una buena precisión en las medidas altimétricas se requieren unas correcciones instrumentales, ambientales y geofísicas (Tabla 2-1 y Tabla 2-2) para el tratamiento de las señales (European Space Agency - ESA, 2000-2013).

Tabla 2-1. Correcciones Ambientales. Fuente: ESA (2000-2013).

Corrección Ionosférica	Corrección de Tropósfera Seca	Corrección de Troposfera Húmeda
Esta es la corrección de la propagación de la onda por el tiempo que tarda en regresar al radar altímetro, debido a la cantidad de electrones presentes en la atmósfera. Esta corrección se calcula a partir de la combinación de las medidas de radar altímetro en cada una de las frecuencias a partir de las mediciones del sistema DORIS. Estas mediciones se realizan con bandas C y Ku para Tópex, Jason 1 y Jason 2; con bandas Ku y S para Envisat. Con orden de magnitud de 5,5 cm +/- de 1 cm para las bandas S y Ku (ESA, 2007).	Esta es la corrección del tiempo que tarda la trayectoria de la onda del radar altímetro debido a la densidad de la atmósfera, como resultado de la presencia de gases en las capas inferiores de la atmósfera (0 a 15 km). Estos gases alteran los índices de refracción atmosféricos. Esta corrección es calculada a partir de los modelos meteorológicos desarrollado por Trenberth y Oldon en 1998, en el ECMWF (European Center for medium ranger Weather Forecast) con una magnitud que varía de 2,30 m del nivel del mar a 1,80 m para otras altitudes con una incertidumbre de 0,2 a 200 cm (Esa, 2007).	Está relacionada con el tiempo que tarda la trayectoria de la onda radar debido al agua contenida en la atmósfera. Se calcula a partir de medidas de radiómetro para las medidas del medio oceánico y por modelos meteorológicos del ECMWF (European Center for medium ranger Weather Forecast) y algoritmos de redes neuronales con una magnitud que varía de 0 a 40 cm y una incertidumbre de 0,5 cm para las áreas continentales (Esa, 2007).

Tabla 2-2: Correcciones Geofísicas. Fuente: ESA (2007).

Corrección de Marea Sólida	Corrección de Marea Polar
El fenómeno conocido como la marea sólida, viene de la deformación de la parte sólida del planeta, bajo la acción conjunta de atracción de la Luna y el Sol, de acuerdo con un proceso comparable a la marea oceánica. El desplazamiento vertical de la corteza terrestre y el agua puede alcanzar varios centímetros, este movimiento es perfectamente modelado con una magnitud que varía de 0 a 20 cm, con una incertidumbre de 1mm (ESA, 2007).	Corresponde a un desplazamiento vertical de la superficie de la tierra causado por las variaciones de la fuerza centrífuga producida por el cambio de orientación del eje de rotación de la tierra, cuya posición media coincide con la posición fija del eje vertical del elipsoide de referencia. La amplitud de la manera polar es aproximadamente de 2 cm durante varios meses, y este efecto está perfectamente modelado con incertidumbre de 1 mm (ESA, 2007).

Para las misiones altimétricas Topex/Poseidón (T/P), Jason 1, Jason 2 y Envisat, estos tratamientos correctivos son realizados por el CNES y la NASA, y están disponibles a la comunidad científica mediante el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES). Para el caso de las medidas continentales, los registros de datos SDRs (Sensor Data Records) son tratados directamente sobre el satélite mediante el tratamiento de señales y una vez corregidos se tienen disponibles en registros de datos GDRs (Geophysical Data Records). Los registros de los datos geofísicos son tratados mediante IGDRs (Interim Geophysical Data Records).

En conclusión, los niveles del agua H deducidos a partir de las medidas altimétricas en el dominio continental se obtienen por la diferencia entre la órbita del satélite en relación con un elipsoide de referencia y a la distancia altimétrica (ρ), teniendo en cuenta las correcciones instrumentales, ambientales y geofísicas (δR_j) (Ecuación 2-2).

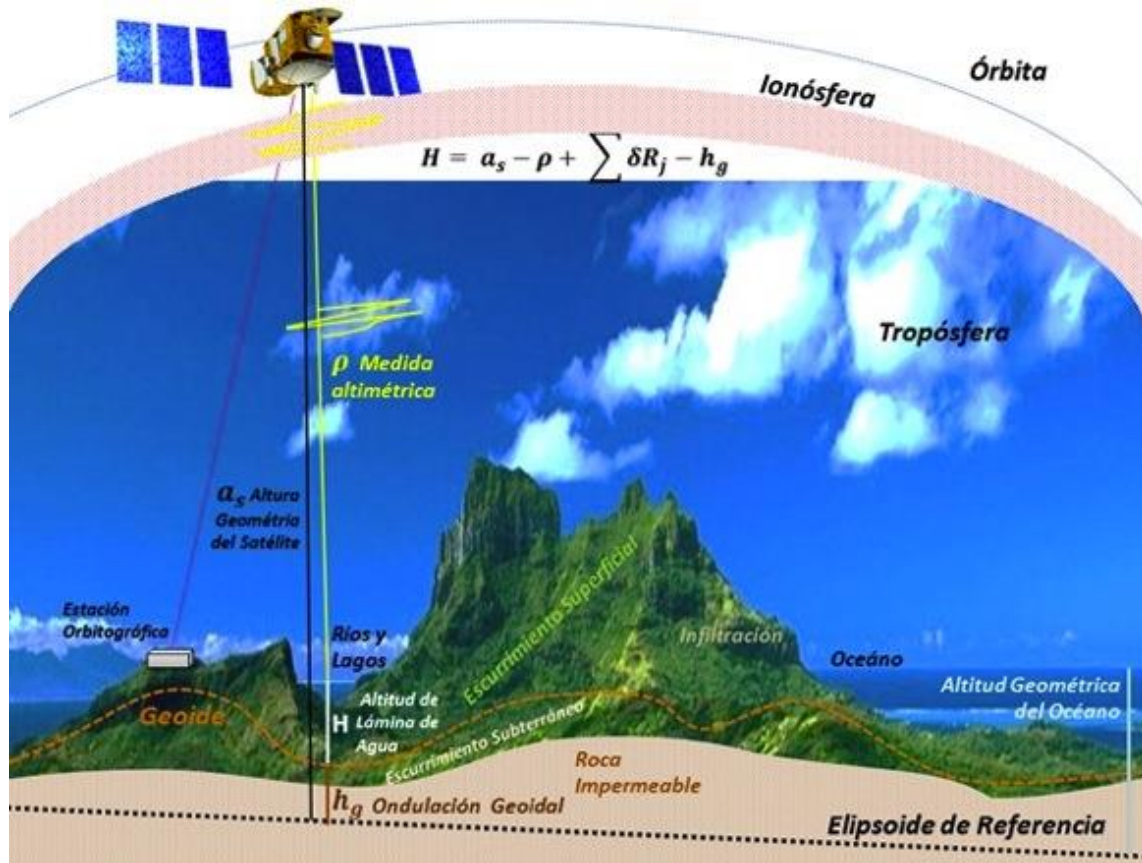
$$H = a_s - \rho + \sum \delta R_j - h_g \quad (2-2)$$

Donde h_g es la ondulación geoidal. Un H_g se determina mediante el cálculo de una superficie media a partir de series temporales de superficies instantáneas, para conocerlo es necesario estudiar con precisión la topografía, el geoide, las mareas oceánicas y los efectos atmosféricos. Estos últimos, hacen referencia a la perturbación sufrida de la onda de radar y que debe ser sometida a diferentes correcciones, ya sean instrumentales y/o atmosféricas. Una vez aplicadas la correcciones necesarias, la distancia final (distancia R) se estima con una precisión de 2 cm (Figura 2-6)

Adicionalmente, a esta serie de correcciones; la órbita del satélite debe ser corregida periódicamente. La fricción causada por la atmósfera de la Tierra es la principal causa de esta desviación de la órbita de su satélite inicial. Para corregir la trayectoria, un centro de control en la Tierra envía instrucciones para poner el satélite en su órbita. La mayoría de los satélites tienen una vida útil de varios años. Al final de su vida útil, un satélite puede simplemente dejar de funcionar correctamente o sufren de una gran desviación de su órbita, lo que es inutilizable.

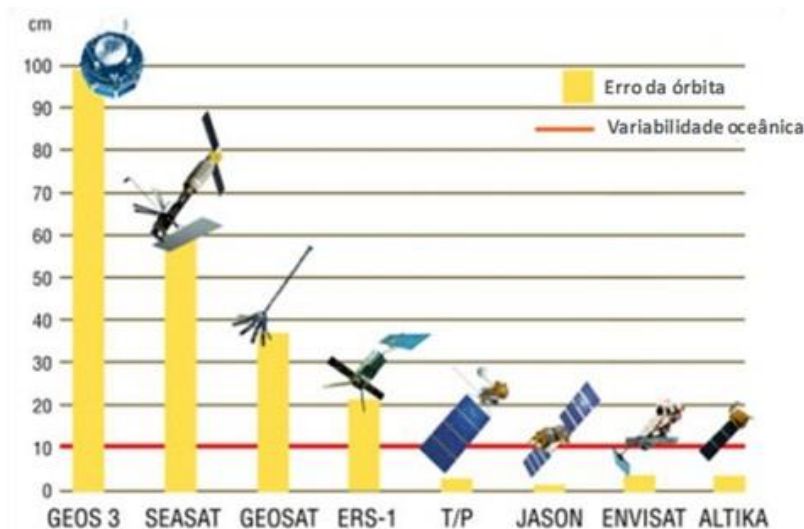
En el caso de las correcciones Instrumentales, los movimientos de los satélites están sujetos a las leyes de movimiento en un campo de la gravedad, a la que se añaden los efectos perturbadores, como los efectos atmosféricos y los efectos de atracción de la luna, el sol y las mareas. Cuánto más cerca de la Tierra, el satélite es más sensible a longitudes de onda del campo de gravedad de la Tierra. Las mejoras progresivas en el área de conocimiento de gravedad, han sido ampliadas por misiones gravimétricas como CHAMP (Challenging Minsatélite Payload) que permiten calcular órbitas cada vez más precisas, en términos de la componente radial y de orden centimétrico, que aumenta progresivamente con la acumulación de medidas: una precisión de 10 cm RMSE para los datos de tres horas, 4 cm de RMS para los datos de tres días y 2,5 cm RMSE datos durante 30 días, con el objetivo de conseguir hasta 1 cm. Esta precisión es posible en virtud de la cooperación voluntaria de equipos franco-americanos responsables en la determinación precisa de la órbita, llamado POD (Precise Orbit Determination). La Figura 2-7, presenta la reducción de este error con diferentes misiones altimétricas.

Figura 2-6: Principio de la medida altimétrica en los sistemas continentales. Fuente: Adaptado de Da Silva (2010).



En relación con las bandas que utilizan los altímetros radar, normalmente trabajan en la banda E, Ka, Ku o banda S para los casos que se requieran medir el nivel del mar (RNcan, 2008). Un altímetro utilizando la banda Ka es menos afectado por perturbaciones ionosféricas que un altímetro de banda Ku, siendo más eficiente en términos de resolución vertical y espacial, tratamientos de ecos y ruido de la señal. Para el 2020 con la misión SWOT (Surface Water Ocean Topography) se tiene previsto lanzar un altímetro interferométrico: Wide Swath Ocean Altimer (WSOA) el cual permitirá obtener simultáneamente varias medidas, simples o combinadas que proporcionarían una mayor cobertura espacial.

Figura 2-7: Corrección del error de órbita en diferentes misiones altimétricas. Fuente: Adaptado de Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data - AVISO (2009).



2.4 Formas de Onda en los sistemas oceánicos y continentales y Tratamiento de las señales.

2.4.1 Formas de Onda

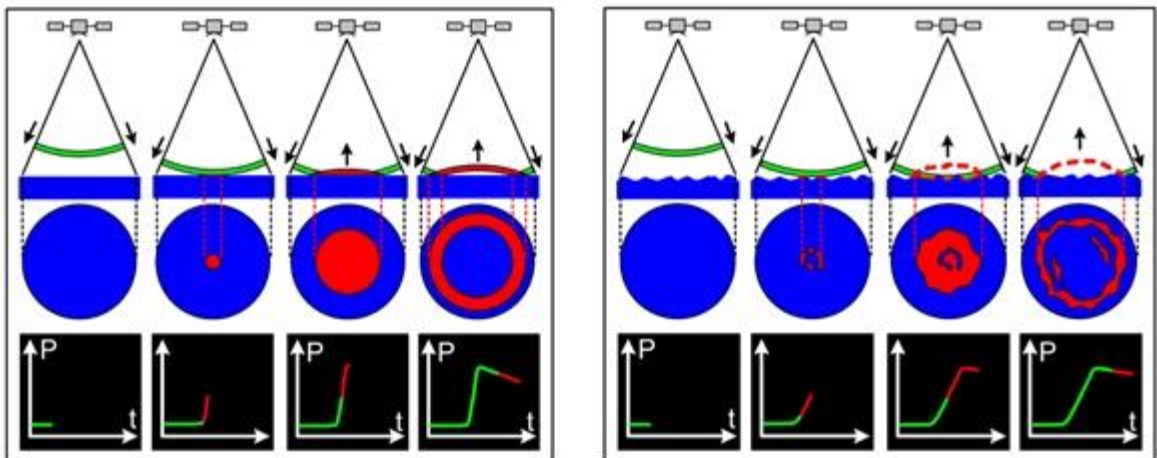
La forma de onda es la representación de la potencia recibida por el altímetro en función del tiempo. Específicamente, el altímetro radar emite una señal electromagnética en forma de pulso. Estos pulsos de elevadas frecuencias (1700 impulsos por segundo aproximadamente) son enviados a la superficie de la Tierra. Después de llegar sobre el objetivo, una parte de la señal emitida se devuelve al satélite (León , 2006). Cada forma de onda es, en consecuencia, el resultado de un eco (un pulso) individual emitido por el satélite. Este pulso toca inicialmente la superficie en forma de punto y a medida que toda la onda hace contacto con la superficie el punto se convierte progresivamente en un disco. La onda de la superficie es reflejada y la fuerza de este eco reflejado aumenta, alcanzando su máxima dimensión con un nombre conocido como huella (pulse limited footprint), en seguida se forma una corona de superficie constante con un diámetro que aumenta sucesivamente hasta un punto llamado huella superior (beam limited footprint).

En las formas de onda se espera que la cantidad de energía que regresa al radar sea la misma que es emitida, es decir, que la energía emitida por el radar no disminuya cuando regrese. Allí se habla de forma de onda perfecta. Sin embargo, teniendo en cuenta la gran variedad de facetas que componen los cuerpos de agua iluminados por el satélite, la energía emitida por el radar es dispersada y sólo una parte de ella retornará al satélite

dando origen a diferentes tipos de formas de onda. Así, la forma de onda oceánica será diferente a la forma de onda de un río; las cuales serán diferentes a las de una zona inundada, etc. Es decir, que dependiendo del tipo de forma de onda es posible comprender la naturaleza del cuerpo de agua iluminado por el satélite.

La medida altimétrica, es decir la distancia que separa el satélite de la superficie del cuerpo de agua iluminado (Figura 2-8) está contenida en la forma de onda interpretada por el satélite. En efecto, este valor de medida altimétrica corresponde al tiempo en que la forma de onda tarda en llegar al punto de emisión de la señal. En las formas de onda se espera que la cantidad de energía que regresa al radar sea la misma, es decir, que la energía emitida por el radar no disminuya cuando regrese. Allí se habla de forma de onda perfecta. Dependiendo de la superficie la distribución de la energía cambia, por lo tanto la forma de onda varía. Este pulso toca inicialmente la superficie en forma de punto (pulse limited footprint) y a medida que toda la onda hace contacto con la superficie del agua, el punto se convierte progresivamente en forma de disco (beam limited footprint), la onda de la superficie es reflejada y la fuerza de este eco reflejado aumenta, alcanzando su máxima dimensión. La representación de la potencia recibida por el altímetro con respecto al tiempo se denomina generalmente forma de onda (FO). Esta forma de onda distribuye su energía recibida, mediante una curva ascendente (transición de verde a rojo) que generalmente es irregular, cuando la energía se dispersa. Por ejemplo, las formas de onda cambian cuando las longitudes de onda, se emiten en el medio oceánico o continental.

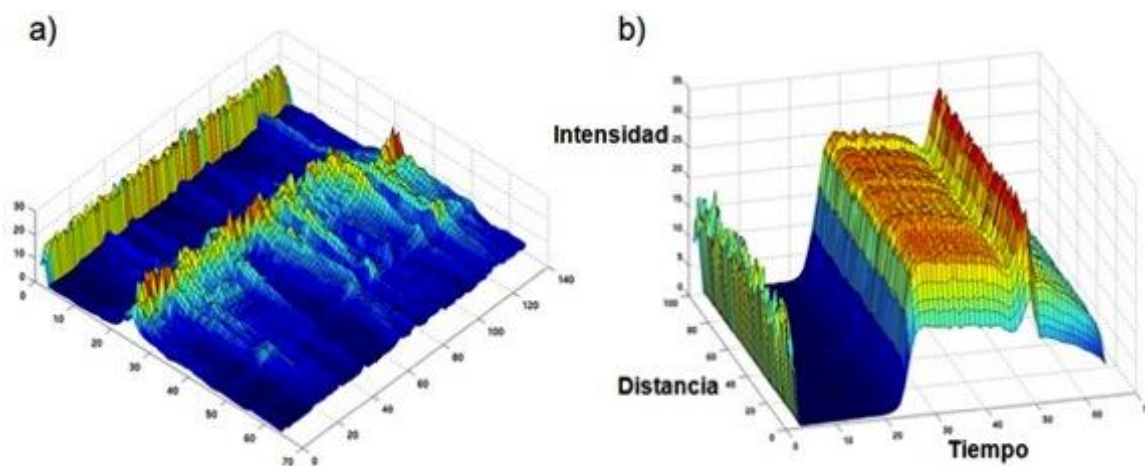
Figura 2-8. Formación de la señal del altímetro sobre una superficie plana (izquierda) y una superficie desigual (derecha). Fuente: Mercier (2001).



Cómo se ha mencionado, los radares altimétricos han sido concebidos para observar la superficie de los océanos. Desde el punto de vista de la medida altimétrica, el medio oceánico puede ser considerado como homogéneo, es decir que el eco es reflejado únicamente por agua representada por una homogeneidad espacial realmente importante. En los continentes, esta homogeneidad es mucho más limitada y se presenta sólo en grandes espejos de agua (grandes ríos, grandes lagos) y, de forma general, las mediciones

realizadas por el radar tienden a ser afectadas por la topografía continental que se encuentra rodeando dichos cuerpos de agua (Calmant, Seyler & Crétaux, 2008) (Figura 2-9). Esta es en realidad la gran limitación que tiene la aplicación de la altimetría radar en medio continental. En efecto, las formas de onda reflejadas por los hidrosistemas continentales son extremadamente diversas, lo que dificulta el proceso de tratamiento de las mismas. La principal diferencia entre las mediciones oceánicas y las continentales se encuentran en la densidad de los datos registrados. En el medio oceánico existe una abundancia tal de mediciones que es posible hacer una selección extremadamente minuciosa para escoger sólo aquellas que son más claras y representativas. En el medio continental, la densidad de los datos registrados es tan baja que resulta necesario establecer metodologías que permitan recuperar el mayor número de datos potencialmente precisos.

Figura 2-9. Diferencia entre una medida altimétrica de una superficie Continental (a) y una superficie Oceánica (b). Fuente: Adaptado de Calmant et al. (2008).



2.4.2 Tracking y Re tracking

Las formas de onda son también el resultado de un tratamiento de la señal recibida a bordo del satélite. Parte del tratamiento de las señales se realiza dos procesos denominados Tracking y Re tracking. Una vez el altímetro comienza a recibir respuesta de las señales emitidas, estas son sometidas a un tratamiento a bordo del satélite. El primer tratamiento recibe el nombre de tracking y consiste en ajustar lo mejor posible tales respuestas de la señal a un modelo de forma de onda teórico. Cada altímetro tiene su propio modelo de tracking; por ejemplo, satélites como: Envisat y Tópex/Poseidón y Jason 2, una vez que capturan la señal que regresa, realizan el tratamiento de tracking.

El re tracking es el tratamiento de las formas de onda, efectuado en Tierra. Este es un re-procesamiento de los algoritmos utilizados de las medidas que fueron adquiridas. El

objetivo de esta última operación es obtener los mismos parámetros obtenidos durante el tracking pero con un grado de precisión más fina. El re tracking se aplica debido a que en las zonas continentales, la huella del altímetro está frecuentemente contaminada por la multiplicidad de superficies. Esta contaminación tiene consecuencias importantes en la complejidad de la forma de onda y en la precisión de las mediciones. Es por ello que el tratamiento de las señales deben ser de máximo cuidado, con el fin de garantizar la calidad de los datos y contar con la mayor precisión posible (Navarro, 2009). La Figura 2-10 es un ejemplo de estos procesos de tratamiento. Los puntos rojos corresponden a la interpretación de los pulsos tratados a bordo del satélite mediante los algoritmos de tracking y los puntos amarillos representan un post-procesamiento en Tierra del conjunto de señales (retracking) permitiendo aumentar el número de mediciones altimétricas disponibles para un mismo cuerpo de agua.

Figura 2-10: Mediciones del altímetro Topex/Poseidón en el río Amazonas cerca de Manaus. Fuente: Collecte Localisation Satellites - CLS (2010).



2.5 Misiones de altimetría radar por satélite

Las misiones altimétricas se han llevado a cabo gracias a la cooperación internacional de las agencias espaciales, las cuales en las últimas décadas han mejorado los niveles de precisión en las mediciones oceánicas y continentales. Hoy en día existen varios equipos en el mundo que participan en el desarrollo de misiones altimétricas, como: La NASA (National Aeronautics and Space Administration), la ESA (European Spatial Agency) y el CNES (Centre National d'Etudes Spatiales de Francia), entre otras. Desde el satélite SEASAT (Seafaring Satellite), a la actualidad con SARAL (Satellite with ARGos and ALtiKa) y en un futuro a SWOT (Surface Water Ocean Topography), se ha ido mejorando

la calidad de las mediciones a medida que se ha optimizado la precisión de los satélites. A continuación se presentan algunos aspectos relevantes de las distintas misiones que han contribuido al desarrollo de la ARS.

2.5.1 Antiguas Misiones

Inicialmente fue GEOS3S (Geodynamics Experimental Ocean Satellite), la primera misión altimétrica dedicada a la oceanografía espacial, comenzó en 1976, seguido de SEASAT en 1978 y GEOSAT (Geodetic Satellite) en 1985. Siendo la última las más destacada por ser la misión que proporcionó a largo plazo un mejor calidad en los datos altimétricos. Esta misión fue desarrollada por la Marina de los Estados Unidos (EE.UU) con el objetivo de describir el geoide marino. La segunda familia de satélites que aportaron a la hidrología espacial fueron los satélites European Remote Sensing ERS1 y ERS-2, lanzados por la ESA (Agencia Espacial Europea) con el fin de observar la Tierra, en la particular la atmósfera y el océano desde el año de 1991 hasta el año 2000.

En 1981 el CNES estaba evaluando Poseidón, un altímetro que iba poner a bordo del satélite SPOT (Satellite pour l'Observation de la Terre). Al mismo tiempo que la NASA, iba a fomentar el lanzamiento de Topex (Experimento en Topografía). En 1983 se contempló la posibilidad de combinarlos dos proyectos. En 1987 el CNES y la NASA crearon formalmente la asociación de TOPEX/POSEIDON (T/P), misión que fue puesta finalmente en órbita en 1992. El objetivo de esta misión fue observar y comprender la circulación oceánica. T/P estuvo órbita durante 14 años proporcionando datos cada 10 días. Los datos se encuentran disponibles por NASA y centro de datos de altimetría CNES. Seguido a la misión Topex, se lanzó la misión GFO (Geosat Follow On) por parte de la marina de EE.UU en el año 1998, la cual se mantuvo durante diez (10) años midiendo la topografía del océano. Después de T/P, sobre la misma órbita, bajo las mismas colaboraciones internacionales y con el mismo objetivo particular de T/P, se inició la misión Jason 1 en el año de 2001, seguida de misión Jason-2 y JASON-3 en 2008 y 2016, respectivamente. La misión JASON-1 registró datos hasta 2013, año en el cual se pierde comunicación con el satélite y bajo la imposibilidad de recuperación se da fin a la misión. Jason 2 y Jason 3 son aun operacionales.

Finalmente Envisat fue la primera misión que desarrolló la ESA, con el fin de estudiar el Medio Ambiente y, en espacial, dar seguimiento al Cambio Climático mediante observaciones atmosféricas que permitan determinar el grado de contaminación y los riesgos de desastres naturales. Esta misión permitió mejorar las aplicaciones de altimetría de radar en el medio continental y se mantuvo en órbita desde el 2002 hasta el 2010, proporcionando datos cada 35 días (Figura 2-11).

Figura 2-11: Algunas de las antiguas misiones satelitales. Fuente: AVISO (1997-2013) y Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère - CTOH (1997-2013).



2.5.2 Misiones Actuales

Actualmente en el espacio se encuentran en órbita las misiones JASON-2 un satélite lanzado para el estudio de la variabilidad oceánica global. Trabajo desarrollado en conjunto por las agencias CNES, EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites), NASA y NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Reemplazó las misiones Topex/Poseidón y Jason-1, proporcionando mediciones muy precisas de la superficie oceánica mundial desde a partir del 2008 durante cada diez (10) días. En el 2010, la ESA lanzó CRYOSAT-2 (Cryosphere Satellite) con el fin de realizar observaciones sobre los polos; particularmente en lo relacionado con el adelgazamiento del hielo en el ártico. Este radar apunta a mejorar las mediciones de superficies de los glaciares y determinar el espesor del hielo marino flotante. La primera misión de CRYOSAT se perdió en el lanzamiento, el 8 de octubre de 2005, debido a una anomalía en la secuencia de lanzamiento (CTOH, 1997-2003).

En Febrero de 2013 fue embarcado a bordo de la misión SARAL el altímetro ALTIKA construido por el CNES. Este proyecto se realizó en asocio entre la ISRO (Indian Space Research Organisation) y el CNES (Space Agency of France). Este satélite se construyó con el fin de obtener datos ambientales por medio de 2 instrumento principales: Argos-3 y AltiKa. El receptor de ARGOS-3 es la tercera generación del sistema Argos que puede localizar y recoger datos ambientales en cualquier "objeto" con un transmisor. En el caso de AltiKa, este altímetro llevará a cabo mediciones altimétricas diseñadas para estudiar la circulación oceánica, la variación de la superficie del océano, la superficie de hielo continental y en general contribuirá al monitoreo y vigilancia del clima y la meteorología

marina. Esta misión se puso en órbita en reemplazo de Envisat con la misma resolución temporal (cada 35 días) y promete mejorar los niveles de precisión para las mediciones de la superficie marina, además de mejorar la oceanografía operacional y la comprensión del clima.

Otro satélite que se encuentra actualmente en órbita hace relación a la familia de satélites de HY. Estos satélites son iniciativa china. Denominados así porque 'mar' significa Haiyang en chino. Pertenece a una serie de satélites orientadas a observar la dinámica de los océanos. HY-1A y HY-1B fueron lanzados en mayo de 2002 y abril de 2007 respectivamente. HY-2 y HY-3 se centraron en el estudio de la dinámica marina (diseñados para medir el color del océano y la temperatura). Finalmente, en el 2011 el CNES en conjunto con CNSA (Academia China de Tecnología Espacial) y la NOAA pusieron en órbita el HY-2A para continuar las investigaciones en el océano (Figura 2-12).

Figura 2-12. Algunas de las actuales misiones satelitales. Fuente: AVISO (1997-2013) y CTOH (1997-2013).



2.5.3 Futuras Misiones

Futuros satélites buscan mejorar la frecuencia de sus radares, utilizando bandas como la Ka, que opera a 35,75 GHz, teniendo un mejor rendimiento en la obtención de información. Estas mejoras sustanciales en los radares contribuirá a optimizar las medidas en las zonas costeras y las observaciones de fenómenos climáticos a meso escala. El reto científico es extender plenamente la altimetría a las masas de agua continentales y del océano costero

con el fin de obtener éxito en la vigilancia del océano abierto a nivel global. Es por esta razón que, a mediano plazo, los proyectos se orientan a detallar la superficie del océano, a mejorar la resolución espacial, con una escala del orden de aproximadamente decenas de kilómetros y una resolución temporal, retornando a los mismos puntos terrestres en pocos días (RNCAN, 2008).

En el marco de las futuras misiones se encuentra continuar con el lanzamiento de la familia de satélites Sentinel; estos son una serie de cinco satélites que buscan llevar un conjunto de instrumentos de última generación, con el objetivo de medir sistemáticamente los océanos, suelos, hielo y atmósfera para vigilar y entender la dinámica de la Tierra a gran escala. Además, proporcionar información esencial en tiempo casi real para el océano y la predicción del tiempo.

Sentinel-1: asegurará las mediciones continuas de radar SAR (Synthetic Aperture Radar) operados por los satélites ERS (European Remote Sensing) y Envisat. Sentinel 2: será un satélite óptico para la observación del espectro. Sentinel 3 es una misión que dará continuidad a las observaciones marítimas y terrestres realizadas por las misiones ERS y Envisat. Tendrá a bordo un Radiómetro especializado para medir la temperatura superficial del mar y de la Tierra.

Este satélite proporcionará datos en tiempo casi real para el monitoreo y seguimiento del océano, los ecosistemas marinos, la calidad del agua, la actividad fotosintética y permitirá deducir la cartografía del hielo marino. Tendrá una repetitividad de 27 días. Sentinel 3 fue lanzado en febrero de 2016 (ESA, 2000-2013) y es el segundo satélite que se planea por el CNES y los organismos operacionales como la NOAA y la EUMETSAT. Sentinel 4, estará en una órbita geoestacionaria, dedicada al monitoreo de la contaminación atmosférica y Sentinel 5, se utilizará en una órbita baja para el estudio de la química atmosférica. La siguiente misión de Sentinel se espera lanzar en el año 2017.

Así mismo, en el marco de las futuras misiones, se encuentra Jason 3, una satélite que se lanzó en enero del año 2016, con el fin de garantizar la sostenibilidad de medidas de la misión Jason 2. Actualmente los dos satélites sobrevuelan juntos durante al menos 6 meses. La órbita de Jason 3 será la misma de la misión Topex/Poseidón y Jason 2 (AVISO, 1997-2013).

Seguido a JASON-3, se lanzará el segundo componente de la solución híbrida de (Jason 3), que es Jason-CS (Jason Continuity of Service) para garantizar una cobertura adecuada de Jason 3 y, consecuentemente de Jason 2, Jason 1 y T/P. Jason-CS o conocido también como Sentinel-6 será el seguimiento de Jason 3. Jason-CS se asegurará la continuidad con Jason 3 con un primer lanzamiento en el año 2020 (Jason-CS / Sentinel-6A) y en el año 2026 (Jason-CS / Sentinel-6B). El Jason-CS / Sentinel es parte del Programa de Copérnico y es el resultado de la cooperación internacional entre la ESA, EUMETSAT, Unión Europea, NOAA, CNES y la NASA / JPL (Jet Propulsion Laboratory).

40 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

Se seguirán las misiones de referencia topográfica de la superficie oceánica, incidas en el año 1992, con una alta inclinación de la órbita en 1336 km. Esta misión ofrecerá el mismo nivel o superior de desempeño de las misiones anteriores de Jason. Se ampliará la colaboración existente entre los Estados Unidos y Europa (NOAA, NASA, EUMETSAT, ESA, el CNES y la industria). La división detallada de las responsabilidades aún no ha sido definida, pero se espera asegurar el máximo nivel de precisión que se requiere para el éxito de la misión.

Jason-CS / Sentinel 6 utilizará un nuevo bus del satélite basado en CryoSat, con una capacidad para mitigar los desechos orbitales (salida de órbita dentro de los 25 años requeridos). El altímetro Poseidón 4 operará en el llamado modo entrelazado que proporciona formas de onda simultáneamente (calculadas a bordo y en línea con las misiones de referencia anteriores) y las formas de onda completa que permiten el procesamiento de SAR en el suelo.

Por último, SWOT un satélite desarrollado por el CNES y la NASA, promete alcanzar una resolución sin precedentes (10 veces más que la resolución de las tecnologías actuales). Esta misión proporcionará la primera visión integral de masas de agua dulce de la Tierra desde el espacio y permitirá determinar el área de agua dulce en todo el mundo. El objetivo de este satélite será unir el estudio de la Hidrología y la Oceanografía, con el fin de cuantificar la disponibilidad de agua superficial a nivel global. La repetitividad será de 21 días y estará a una altura de 970 km. Se espera lanzar en el año 2020 (

Figura 2-13).

Figura 2-13: Futuras misiones satelitales Fuente: AVISO (1997-2013) y ESA (2000-2013).



2.5.4 ¿Por qué las misiones Envisat y Jason 2?

Porque la cobertura espacial y temporal que han tenido los satélites en las diferentes misiones desarrolladas en las últimas décadas ha permitido estudiar no sólo la superficie oceánica sino también el medio continental con mayor precisión. Lo cual ha significado un gran avance en materia de hidrología en el medio continental gracias al aporte de mediciones que anteriormente eran tomadas directamente en campo.

Estas aplicaciones de la ARS, ha sido gracias al esfuerzo de cooperación entre científicos y en conjunto con instituciones de investigaciones a nivel mundial, las cuales han permitido desarrollar misiones en conjunto y tener a disposición los datos tomados por los satélites para toda la comunidad científica. Permitiendo desarrollar investigaciones no sólo en el ámbito oceánico, sino también en el medio continental.

Es por ello que satélites como Envisat Y Jason 2 han sido utilizados ampliamente en por diversas investigaciones (Berry et al., 2007); (Legrésy, Papa, Rémy, Vinay, Bosh & Zanife, 2005); (Da Silva et al., 2007); (Seyler et al., 2008); (León et al., 2009); (Da Silva, 2010); (León et al., 2011) para estimar variables hidrológicas con excelentes resultados.

Los datos provenientes de la misión Envisat¹, son pertenecientes al período comprendido entre los años 2002 - 2008 y presentan una resolución temporal de 35 días. La información de la misión Jason 2², es obtenida para el periodo 2008 - 2011 y presenta una resolución temporal de 10 días.

La información de ambos satélites está garantizada por el Laboratorio de Estudios en Geofísica y Observación Espacial (LEGOS) y el Laboratorio de Mecanismos de Transferencia en Geología (LMTG por sus siglas en francés) perteneciente al Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) en Francia, quienes han permitido el acceso a su base de datos CTOH³, la cual contiene la totalidad de datos altimétricos de diferentes misiones satelitales a nivel mundial.

El presente estudio se basa principalmente en la utilización de medidas altimétricas registradas por los satélites Envisat Y Jason 2 para las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano. Las principales características de estas misiones se resumen en la Tabla 2-3.

¹ Mayor información: <http://Envisat.esa.int/>

² Mayor información: <http://smc.cnes.fr/JASON2/Fr/>

³ Mayor información: <http://ctoh.legos.obs-mip.fr/>

- 42 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

Tabla 2-3: Características de las misiones Envisat Y Jason 2.

Misión	Envisat	Jason 2
Lanzamiento	Marzo 2002	Junio 2008
Objetivo	Estudio de los océanos y el medio ambiente.	Estudio variabilidad oceánica global
Altitud	800Km	1336 Km
Inclinación de la órbita	98.5°	66°
Distancia inter-traza con el ecuador	80 Km	315 Km
Repetitividad	35 días	10 días
Algoritmo de tracking	Ocean, Ice-1, Ice-2, Sea Ice	Ice 1 , Ice2 - Ice 3
Frecuencia de Medición	20 Hz	10 Hz
Distancia entre dos medidas	80 Km	350 km
Número de Trazas	1002	254
Referencia	WGS84	T/P
Periodo	2002 - 2010	2008 – Funcionando actualmente.

Ambos satélites presentan una cobertura espacial densa y homogénea. La Figura 2-14 presenta las trazas satelitales de los respectivos satélites. Envisat (Color Amarillo) y Jason 2 (Color rojo) donde se aprecia la resolución espacial, con una distancia entre trazas de 80 km y 350 km respectivamente. Este conjunto de datos permiten consolidar cientos de mediciones periódicas desde el año 2002 hasta el 2010 para el caso de Envisat y desde el 2008 hasta la actualidad para Jason 2.

- 44 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas
-

desarrolla proyectos de investigación en hidráulica geodinámica de la cuenca amazónica (CTOH, 1997-2013).

2.6.2 Proyecto PISTACH

PISTACH (Prototype Innovant de Système de Traitement pour les Applications Côtières et l'Hydrologie), es un proyecto financiado por el CNES para mejorar los productos de la altimetría de Radar por satélite en las zonas costeras y las aguas continentales. Liderado por el CLS con el apoyo del LEGOS, CEMAGREFT (Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural, des Eaux et des Forêts) e IRD/HYBAM. PISTACH es un proyecto que se basa en el desarrollo hidrológico en el medio continental a partir de la misión Jason-2. Este se desarrolló con tres objetivos principales: Productos hidrológicos de acuerdo con las necesidades de los usuarios, desarrollo de nuevos estándares para aplicaciones ambientales; Desarrollo de nuevos algoritmos dedicados al retracking de las formas de onda, modelos locales de alta resolución, modelos globales de topografía, geoide, mareas, entre otras aplicaciones. Por último, implementación de prototipos, proporcionar datos de alta resolución y validación de datos altimétricos (AVISO, 1997-2013). Del marco de este proyecto se obtienen los datos altimétricos continentales de la misión Jason 2 - Ice 3.

2.6.3 Bases de datos del CTOH

El CTOH (Centre of Topography of the Oceans and the Hydrosphere) es un servicio de Observación francés dedicado a los estudios por satélite, pretende ayudar a los científicos desarrollar nuevos productos altimétricos y aplicaciones. Establecido en 1989, cuenta con el apoyo del CNRS, el CNES, el OMP y el CPER (Océan Pôle-Altitude Climat). EL CTOH desarrolló una base de datos que contiene datos de series de tiempo de los ríos más caudalosos, humedales y lagos de todo el mundo. Estas series temporales hacen parte de los datos altimétricos proporcionados por Topex/Poseidón, que contienen alrededor de 100 lagos (en Europa, Asia, África, América del Norte y del Sur) disponibles, incluidos los mares Caspio y el Aral (Crétaux & Birkett, 2006). Contiene cerca de 250 estaciones virtuales en grandes ríos y los usuarios de esta base de datos pueden visualizar las series de tiempo que representan las variaciones de los niveles de agua, así como la imagen Landsat que muestra la ubicación geográfica. Permite hacer el seguimiento a largo plazo del nivel del mar, corrientes lacustres, marinas, niveles de los ríos y el clima del planeta. En esta base de datos se pueden extraer los datos satelitales actualizados con correcciones sobre los océanos y las superficies continentales, para diferentes misiones altimétricas (Topex/Poseidón, Jason 1, Jason 2, GFO, Envisat). Los datos altimétricos de Envisat y Jason 2 - Ice 1 que se trabajan en esta investigación se obtienen de la base de datos del CTOH.

2.6.4 Proyecto OSCAR

El proyecto OSCAR (Observation des Surfaces Continentales par Altimétrie Radar) propone el desarrollo de la altimetría de radar por fuera del océano. En el año 2000 reunió una docena de laboratorios en todo el continente; con la introducción de las aplicaciones de altimetría radar en las capas de hielo, un procedimiento de nuevo retracking se diseñó para procesar las formas de onda de superficies no oceánicas. Esta técnica de retracking se denominó ICE-2 y se aplicó con éxito en misiones como: Topex/Poseidón, ERS y Envisat (Legrésy et al., 2005); presentando las aplicaciones en las superficies continentales, los glaciares, las áreas inundables, lagos, ríos y zonas costeras del océano. Así mismo, el proyecto se centra en la definición de técnicas para maximizar el alcance de futuros altímetros (AltiKa, SWOT) en las mediciones continentales y polares.

2.6.5 Proyecto CASH

CASH (Contribution de l'Altimétrie Satellitaire à l'Hydrologie), se trata de una Red creada por el Ministerio de Investigación de Francia, para desarrollar nuevos servicios a partir de datos provenientes del espacio. En este contexto, el objetivo del proyecto es demostrar la efectiva contribución de la altimetría radar por satélite para el establecimiento de un sistema integral de monitoreo de los recursos hídricos. El proyecto gira en torno a dos ejes: I) La creación de una base de datos de profundidad de agua de los ocho ríos más importantes del mundo. Estas profundidades se obtienen en los cuerpos de agua ubicados en las estaciones virtuales definidas por el altímetro Topex/Poseidón, actualmente Jason 2. II) La definición de un conjunto de datos hidrológicos a partir de mediciones de altimetría de los cuerpos de agua. La relevancia de estos datos hidrológicos será evaluada por los diferentes usuarios en función de sus necesidades.

2.6.6 Hydroweb

Hydroweb⁴ es una base de datos que proporciona datos de altimetría de satélite para calcular series temporales sobre los principales ríos, lagos y llanuras de inundación con base en datos de varios satélites de altimetría (Topex/Poseidón, ERS, Jason 1, GFO y Envisat). Estos datos son puestos a disposición por el centro de datos de altimetría CNES, el cual ha realizado las validaciones sobre el Amazonas y el Congo, con datos in-situ disponibles de otras misiones.

⁴ Mayor información: <http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb>

2.7 Aplicación de la Altimetría de Radar en Hidrología.

En la hidrología, la altimetría de radar presenta diversas aplicaciones. La principal ha sido en el conocimiento del nivel del agua de los sistemas oceánicos y continentales. Dicha variable es fundamental para el estudio no sólo de la hidrología, sino también de otras ciencias como la oceanografía, la geología, la climatología, entre otras. La facilidad de mediciones del nivel de agua a partir de medidas de satélite es un gran avance para optimizar los sistemas de monitoreo in-situ.

La aplicación de la Altimetría de Radar por Satélite (ARS) en grandes cuerpos de agua continentales tales como ríos, lagos y zonas de inundación, ha dado origen a diferentes investigaciones lideradas por autores como: Crétaux & Birkett (2006); Roemer et al. (2007); Swenson y Wahr (2009); Kouraev, et al. (2009), han demostrado los beneficios de esta tecnología para el monitoreo de cuerpos de agua superficiales. Ejemplos de estas primeras aplicaciones es posible mencionar los estudios realizados sobre las variaciones de los niveles de grandes reservorios continentales como los Grandes Lagos de América del Norte (Brooks, 1982); (Morris & Gill, 1994 a); (Morris y Gill 1994 b); (Mercier, 2001), los Lagos Africanos (Birket, 1995), mares interiores (Ponchaut & Cazenave, 1998); (De Oliveira et al., 2001) y grandes ríos como el Amazonas (Birkett et al., 2002); (Frappart et al., 2006); (León et al. 2006 a); río La Plata (Maheu et al., 2004) y río Ob en Rusia (Kouraev et al., 2007) entre otros.

Sin embargo, el desarrollo de esta herramienta ha sido tan significativo, que ha permitido la obtención de otros parámetros, mediante el desarrollo de modelos hidrológicos que permitan no sólo conocer las variaciones de los niveles de agua, sino también conocer las variaciones en términos de volumen, profundidad de cauces, incluso llegar a estimar parámetros de carácter hidráulico como la pendiente y el coeficiente de Rugosidad de Manning. Estudios realizados en los años 2005, 2006, 2008 y 2010 demuestran que, con las bondades de la tecnología ARS, es posible definir Estaciones Virtuales en grandes cuencas como la del río Amazonas (León et al., 2005); (Seyler et al., 2008); (Da Silva, 2010), estimar curvas de calibración (León et al., 2005); (Moreira et al., 2011); e incluso estimar volúmenes de agua en zonas inundadas (Barry et al., 1995); (Bonnet et al., 2008); (Benveniste et al., 2008); (Frappart et al., 2006). Es importante resaltar, que a medida que se van desarrollando las etapas metodológicas de esta investigación, se detallarán estudios que han aportado a la aplicación de la ARS en la hidrología

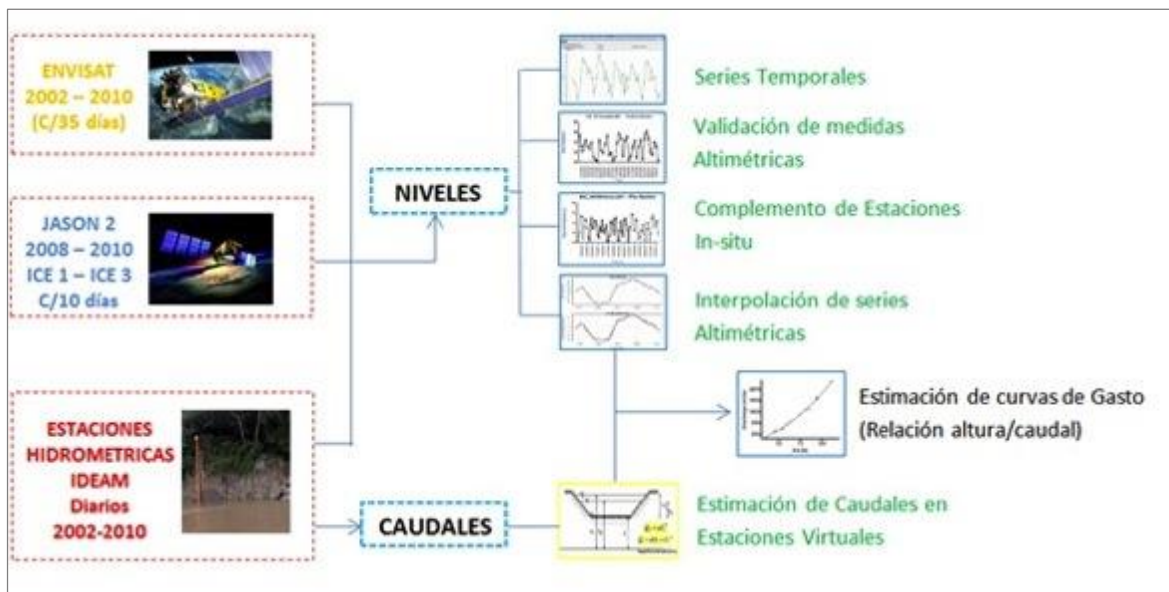
2.7.1 Metodología para la aplicación de la ARS en las cuencas del Orinoco y el Amazonas

La metodología que se expone a continuación toma como base las investigaciones anteriormente descritas, para proponer un proceso que permite desarrollar diversas aplicaciones de la ARS en la hidrología colombiana (Figura 2-15). Se encuentra enfocada en el estudio de la dinámica hidrológica de las cuencas del Amazonas y el Orinoco a partir

de mediciones radar realizadas con los satélites Envisat y Jason 2, en los principales cauces. Los métodos aplicados para tal fin se concentraron en: i) Definir sobre los principales cauces de la zona de estudio, las Estaciones Virtuales de las misiones mencionadas y sus correspondientes Series Temporales, ii) validar las series temporales de estas estaciones a partir de registros hidrométricos de estaciones in-situ del IDEAM, iii) complementar la información hidrométrica in-situ a partir de los datos altimétricos, iv) estimar caudales medios diarios en estaciones virtuales mediante la aplicación de un modelo hidrodinámico, v) realizar interpolaciones diarias de las series temporales y vi) estimar curvas de gasto (relación calibrada altura/caudal) y parámetros hidráulicos sobre estaciones virtuales.

En síntesis, esta metodología se concentrará en la obtención de información hidrológica a partir de datos altimétricos sobre los principales afluentes de las cuencas hidrográficas del Orinoco y del Amazonas, que en la mayoría de los casos se encuentran con deficiencias en instrumentación y presentan debilidades en la eficiencia y calidad de la información, siendo este el principal aporte del presente trabajo.

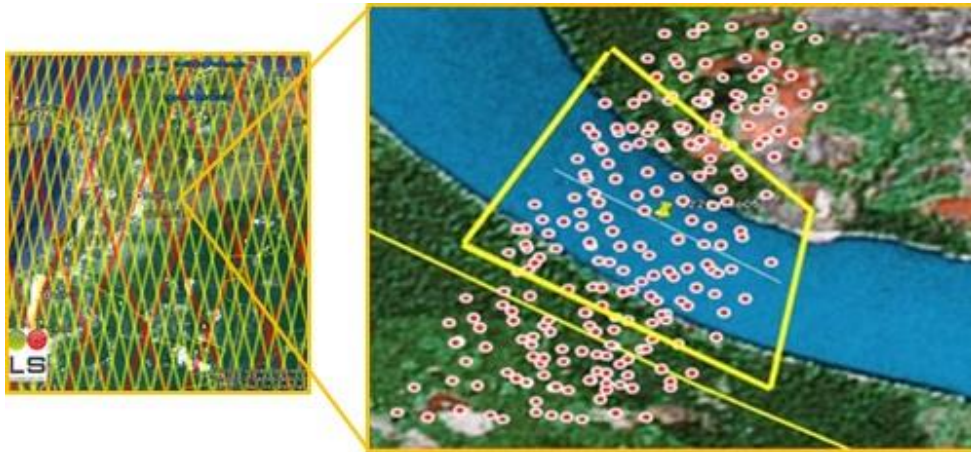
Figura 2-15: Diagrama simplificado de la metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia.



2.7.2 Definición de Estaciones Virtuales

Tal y como se mencionó en la sección 2.7, uno de los mayores aportes de la altimetría radar es la definición de estaciones virtuales. Se le denomina Estación Virtual (EV) a toda aquella intersección que pueda existir entre el barrido del satélite o traza satelital y un plano de agua continental (un río, un lago, un mar interior, una zona de inundación) del cual es posible deducir una serie que representa la variación de la altitud de los niveles de agua de dichos cuerpos en el tiempo (León et al., 2006) (Figura 2-16).

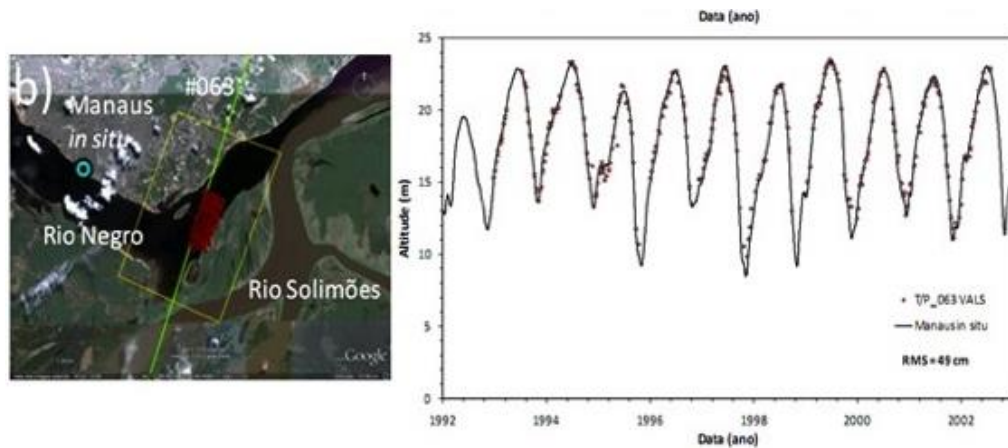
Figura 2-16: Estación Virtual definida a partir de una traza del satélite Fuente: AVISO (1997-2013) y Google Earth (2012).



El CTOH define la EV como la intersección de la trayectoria del satélite con un río. En dicha intersección, es posible obtener la medición de la altura de la superficie del agua a diferentes intervalos de tiempo; permitiendo construir series de temporales de niveles de agua que se pueden comparar con series de tiempo obtenidas por estaciones hidrométricas in-situ. Para conocer la variación de los niveles de agua y analizar las épocas hidrológicas (niveles máximos o de estiaje), se realizan series temporales, cuyo caso es una gráfica que relaciona los niveles medidos en el tiempo. Dicha serie está en función de la calidad y cantidad de los datos. A mayores mediciones, mejor representación de la serie de niveles en el tiempo.

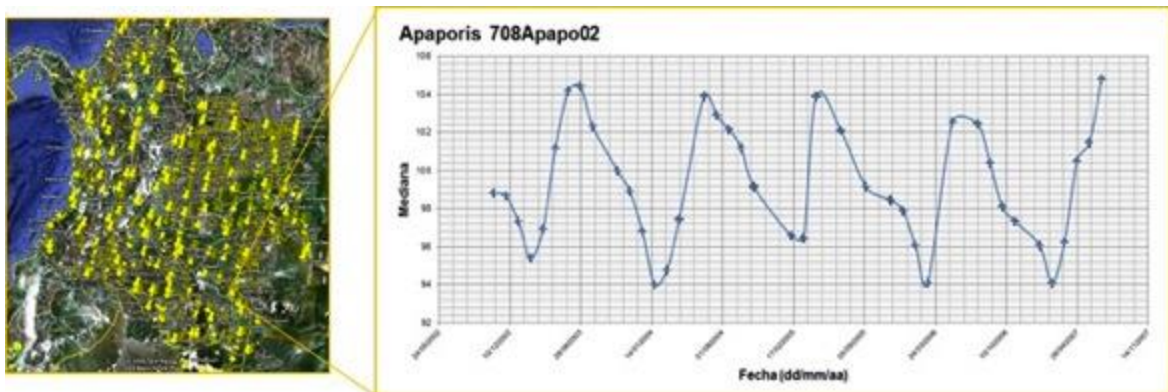
Estas representaciones temporales servirán para el análisis del comportamiento hidrológico de los sistemas a estudiar. León et al. (2006) afirman que una serie temporal obtenida a partir de una estación virtual puede permitir un análisis de varios ciclos hidrológicos en dicha sección en función a la misión que provee los datos. Igualmente, estas series deducidas a partir de medidas altimétricas pueden ser validadas con información hidrométrica de estaciones in-situ cercanas. La Figura 2-17 es un ejemplo de una estación virtual Topex-Poseidón (T/P) en el río Negro, cerca de la desembocadura en el río Solimões en Manaus - Brasil, donde se presenta la serie temporal de niveles obtenida a partir de la estación virtual y la validación con los datos de una estación in-situ cercana (Da Silva, 2010).

Figura 2-17: Estación virtual y Serie Temporal de datos Topex/Poseidón, sobre el río Negro - cuenca del Río Amazonas (Da Silva, 2010).



En el contexto colombiano, en relación con la definición de estaciones virtuales y consecuente deducción de series temporales, los estudios que se han realizado, han conducido a la creación de la base de datos ALTICO (Altimetría para Colombia) (Navarro, 2009), una herramienta que abrió la perspectiva de monitoreo hidrológico a nivel nacional, logrando visualizar algunas de las capacidades de esta tecnología para el monitoreo del recurso hídrico. En esta base de datos se encuentran reportadas 548 estaciones virtuales distribuidas a lo largo de la geografía colombiana, de las cuales 208 se encuentran ubicadas en los cauces principales del área de estudio. Dichas estaciones virtuales fueron deducidas a partir de datos altimétricos de la misión Envisat para el período de 2002 a 2011 (Figura 2-18).

Figura 2-18: Estaciones virtuales Envisat, definidas para toda la hidrografía Colombiana y ejemplo de una serie temporal obtenida. Fuente: Navarro (2009).

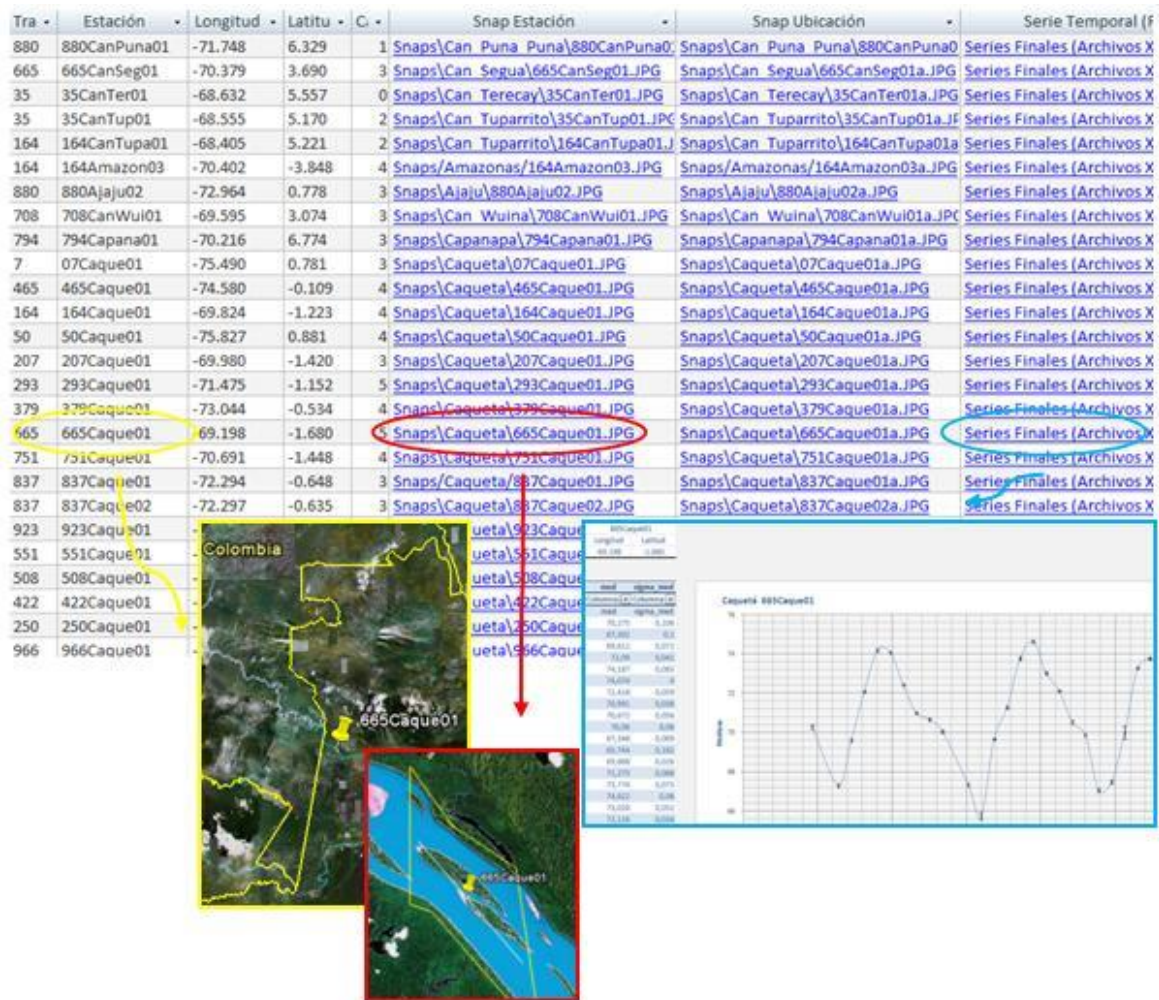


La base de datos que agrupa el conjunto de estaciones virtuales obtenidas para la hidrografía colombiana fue desarrollada completamente en la herramienta Microsoft

50 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

Access, organizada por campos que contienen el nombre de la estación virtual, el río al que la estación pertenece, posición geográfica de la estación, acceso a una figura rápida para ubicación espacial de la estación, vínculo con la serie temporal y vínculo con la visualización espacial sobre la plataforma cartográfica de Google Earth (Figura 2-19). Por último, hace posible la carga y descarga de información hidrológica, por lo que resulta sencillo extraer la información que el usuario eventualmente requiera en aplicaciones particulares en hidrología, haciendo posible alimentar y fortalecer la base de datos región a región. Como es el caso de la presente investigación que pretende complementar información sobre las cuencas del Orinoco y el Amazonas.

Figura 2-19: Componentes de la Base de Datos ALTICO a partir de datos satelitales del radar Envisat. Fuente: Navarro (2009).



2.7.3 Definición de Estaciones Virtuales Envisat Y Jason 2 para las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano

Para la realización de esta investigación se definieron las estaciones virtuales Envisat y Jason 2 de acuerdo con las trazas o barridos de satélite ubicadas en las cuencas del Orinoco y el Amazonas Colombiano. Algunas estaciones virtuales de Envisat se redefinieron gracias a las existentes en ALTICO.

Los nombres de las estaciones fueron estructurados siguiendo los criterios establecidos por el programa ORE-HYBAM (*Environmental Research Observatory - Geodynamical, hydrological and biogeochemical control of erosion/alteration and material transport in the Amazon Basin*).

Los tres primeros espacios corresponden al nombre del satélite ENV o JA2, seguido de los números de la traza y finalmente el nombre del río y el número de estación, por ejemplo: JA2_254Orino01 o ENV_035Meta01.

El total de estaciones virtuales obtenidas para las cuencas del Orinoco y el Amazonas es de 230 estaciones, de las cuales 44 pertenecen a la misión Jason 2 y 186 pertenecen a Envisat (Figura 2-20). La Tabla 2-4 presenta la información detallada del total de estaciones virtuales Envisat y Jason 2 pertenecientes a los principales cauces de las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano.

Además, se presenta un paralelo con las estaciones in-situ pertenecientes a la red hidrométrica del IDEAM, que a pesar de contar con un número significativo de estaciones (80), la mayoría no presentan datos actualizados, es por ello que la introducción de estaciones virtuales contribuye a la densificación de la red monitoreo en estas cuencas.

Figura 2-20: Cuencas del Orinoco y el Amazonas con estaciones virtuales Envisat (Puntos en Amarillo), Jason 2 (Puntos en Azul) y estaciones in-situ (Puntos Rojos). Fuente: Elaboración Propia en plataforma Google Earth (2012).

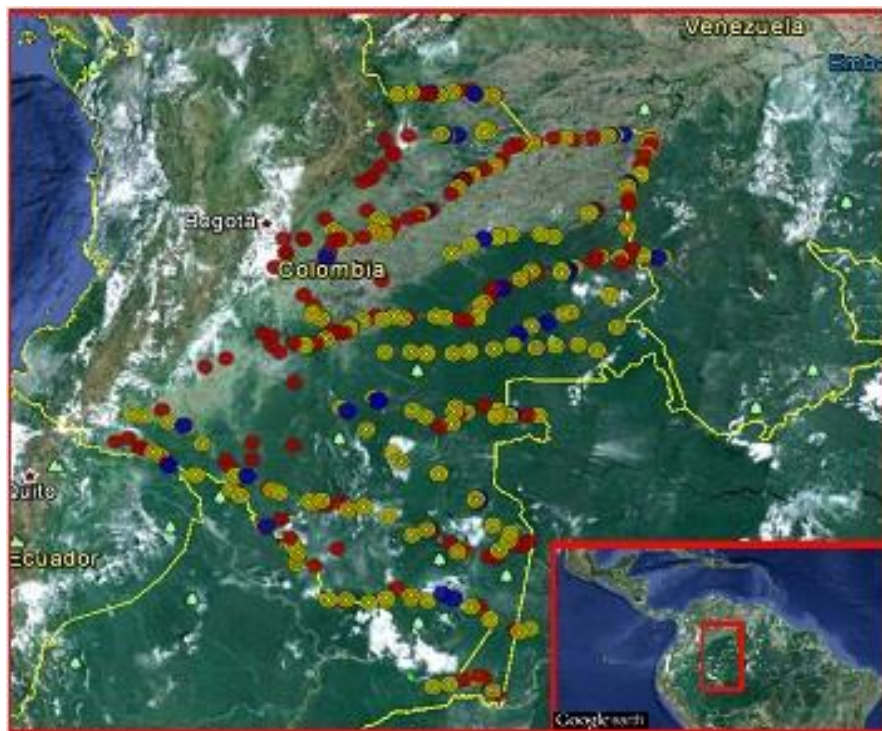


Tabla 2-4: Total de Estaciones Virtuales (Envisat y Jason 2) e in-situ (IDEAM), presentes en las cuencas de estudio.

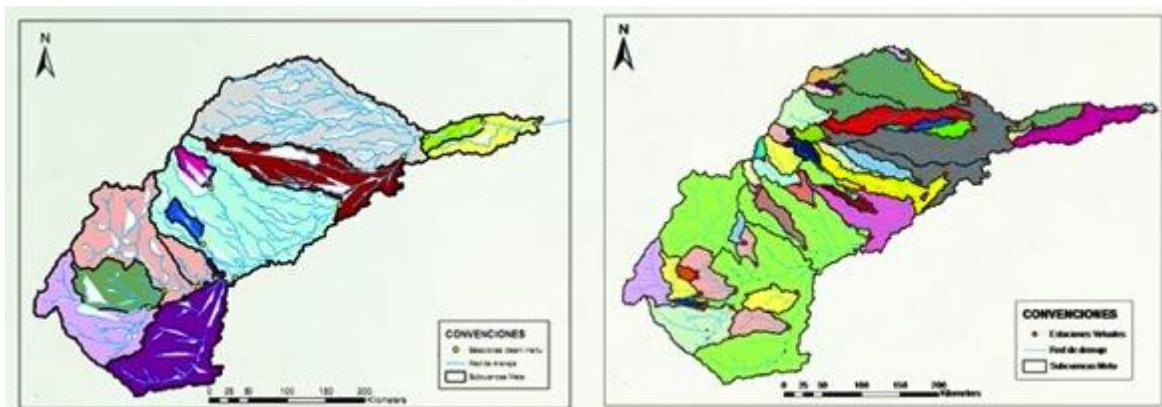
Cauces		Número de Estaciones		
		Estaciones Envisat	Estaciones Jason	Estaciones In-situ
Cuenca Orinoco	Arauca	9	2	4
	Casanare	4	2	2
	Meta	15	4	14
	Orinoco	9	1	4
	Guaviare	21	6	9
	Vichada	10	2	1
	Inírida	16	2	1
Cuenca Amazonas	Vaupés	16	4	3
	Guainía	5	1	0
	Caquetá	21	5	18
	Putumayo	32	5	20
	Apaporis	10	5	2
	Amazonas	4	1	2

La integración de estaciones virtuales sobre las redes in-situ en los principales cauces de estas cuencas, puede llegar a aumentar hasta tres veces las secciones de monitoreo y control de los niveles medios de estos cauces. Por ejemplo, en el caso del Río Inírida el IDEAM solo cuenta con una estación in-situ en la desembocadura de este cauce, con las estaciones virtuales se pueden establecer 16 puntos de control y monitoreo a lo largo del río. En el caso del Río Amazonas vemos una diferencia de 9 estaciones virtuales y 2 estaciones in-situ (Estación Nazaret y Leticia). Con la densificación de la red de monitoreo hidrológico, se aumentan aproximadamente en 3,5 veces los puntos de control respecto de las estaciones in-situ.

En la cuenca del Orinoco por ejemplo, según resultados obtenidos en el estudio de León, Herrera & Puerta (2012), para el río Meta, de doce (12) sub cuencas delimitadas a partir de estaciones in-situ se han logrado definir aproximadamente 44 más, a partir de estaciones virtuales. Es decir, que por cada sub cuenca delimitada a partir de una estación in-situ existen de 3 a 10 estaciones virtuales. Este aumento indiscutiblemente facilita el análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca en su conjunto, tanto en tiempo como en espacio. La

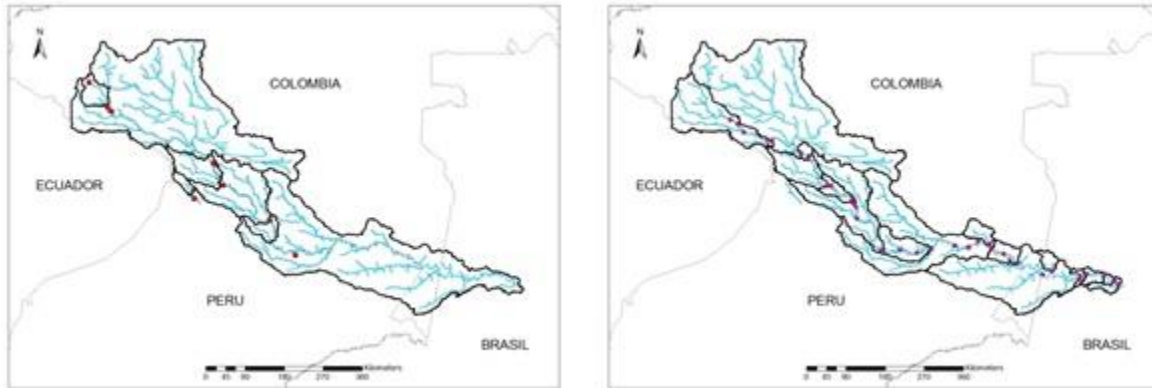
Figura 2-21 presenta como se logra aumentar el número de sub cuencas con la introducción de estaciones virtuales en el río Meta.

Figura 2-21: Densificación de la red de monitoreo hidrológico sobre el río Meta. Sub cuencas a partir de estaciones in-situ (izquierda). Sub cuencas a partir de estaciones virtuales (derecha). Fuente: León et al. (2012).



Particularmente para la cuenca de las Amazonas, se logró densificar el río Putumayo, obteniendo 16 puntos de control con estaciones virtuales, además de los 7 existentes a partir de estaciones in-situ (Figura 2-22).

Figura 2-22: Densificación de la red de monitoreo sobre la cuenca del río Putumayo en la cuenca del Amazonas. Sub cuencas a partir de estaciones in-situ (izquierda). Sub cuencas a partir de estaciones virtuales (derecha). Fuente: (Arbeláez, 2012).



Por tanto, es posible definir un mayor número de sub cuencas con áreas de incidencia más pequeñas, lo cual facilita la interpretación de su comportamiento hidrológico y, en consecuencia, favorece una comprensión más acertada e integral de la cuenca.

La Tabla 2-5 muestra la densificación de los puntos de control sobre los cauces principales de las cuencas del Orinoco y Amazonas, lo cual permite la obtención de niveles medios para cada uno de los principales ríos y por consiguiente la construcción de series temporales.

Tabla 2-5: Densificación de los puntos de control sobre las cuencas del Amazonas y el Orinoco. Fuente: Elaboración propia.

Cuencas	CORRIENTE	SUBCUENCAS GENERADAS		DENSIFICACIÓN
		Puntos de control in-situ	Puntos de control virtuales	
Orinoco	Arauca	4	14	3,5
	Meta	12	44	3,7
	Guaviare	9	32	3,5
	Vichada	1	4	4
	Inírida	1	4	4
Amazonas	Apaporis	1	8	8
	Putumayo	7	16	2,3
	Vaupés	6	14	2,3
	Caquetá	4	14	3,5

2.7.4 Extracción de medidas altimétricas y obtención de series temporales para las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano

Para la deducción de Series Temporales se utilizó un software de libre acceso denominado VALS (Virtual Altimetry Local Station). VALS es una herramienta desarrollada por el programa HYBAM del IRD, programada en JAVA, que facilita la extracción de datos altimétricos de cualquier tipo de misión satelital para la identificación de estaciones virtuales sobre cualquier parte del planeta tomando como base para su aplicación las bondades de la plataforma de Google Earth (Cochonneau, 2009).

El procesamiento de extracción de series virtuales se hace manualmente en VALS, el cual consiste en cargar inicialmente una base de datos altimétricos en la interface del programa. Estos datos altimétricos corresponden a todas las trazas de satélite conocidas que pasa por el área de estudio o de interés.

Seguido a esto, se definen las estaciones virtuales en Google Earth (punto de intersección entre la traza de un satélite y un cuerpo de agua) y se guardan como archivo .kml. Dicha estación virtual (archivo .kml) se importa en VALS, para lo cual esté programa carga los datos altimétricos de la traza seleccionada en la estación virtual. Con los datos pertenecientes de una estación virtual definida, es posible identificar y seleccionar cada uno de los puntos o medidas altimétricas tomadas en cada ciclo. Entiéndase por ciclo la vuelta que realiza el satélite por toda la tierra.

En el caso de la estación virtual, un ciclo hace referencia a cada fecha o cada día por el cual el satélite pasó por el punto de intersección con el cuerpo de agua (Estación virtual). Durante este proceso en Vals se puede descartar los datos o medidas que por su alto grado de variación no corresponden a las medidas altimétricas tomadas a su paso por esa estación.

Finalmente, posterior a esta selección se extrae una gráfica que permite analizar la variación de los niveles superficiales del agua en el tiempo denominada, serie temporal (Navarro et al., 2009). La

Figura **2-23** representa el proceso de extracción de una serie temporal para una estación virtual de la cuenca del Orinoco.

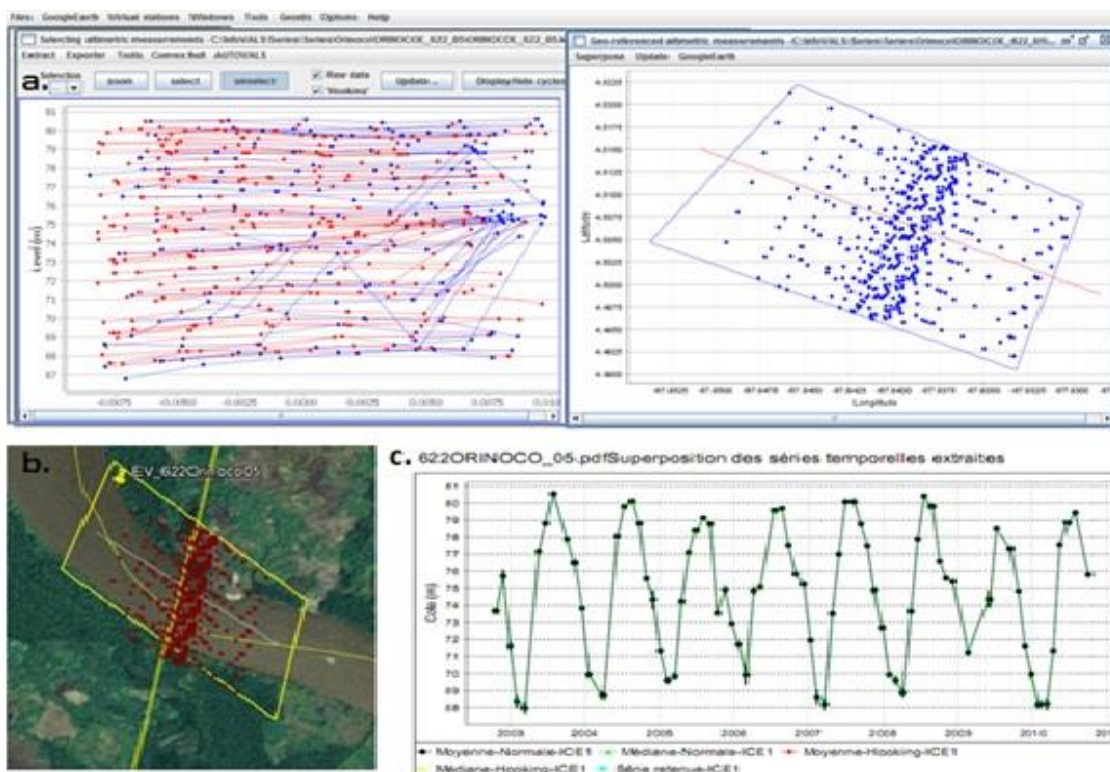
La finalidad de llevar a cabo estos procedimientos es mejorar y perfeccionar las técnicas de extracción de datos altimétricos con el fin de obtener series temporales de buena calidad, es decir, que reflejen el comportamiento de las variaciones de los niveles de agua para cualquier sección de un cauce de interés con la mayor precisión posible. Para la cuenca del Orinoco y el Amazonas Colombiano, se actualizaron las series temporales que conformaban la base de datos ALTICO entre el periodo comprendido 2002-2010.

56 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

Todas las series temporales se extrajeron nuevamente, mediante un proceso manual de selección de los datos brutos de altimetría y extracción de una serie cronológica de niveles para los cuerpos de agua. Cabe resaltar que en la actualidad el proceso de definición de series temporales en VALS se ha optimizado, mediante una herramienta desarrollada llamada AUTOVALS.

Esta nueva rutina del programa permite la actualización continua de las series temporales, lo que permite la producción de datos altimétricos on-line. Esta rutina de procesamiento de datos es realizada por las agencias espaciales encargadas de la extracción de datos altimétricos (Cochonneau, 2009).

Figura 2-23: Extracción de Serie Temporal mediante la utilización de Vals. Fuente: Elaboración propia.

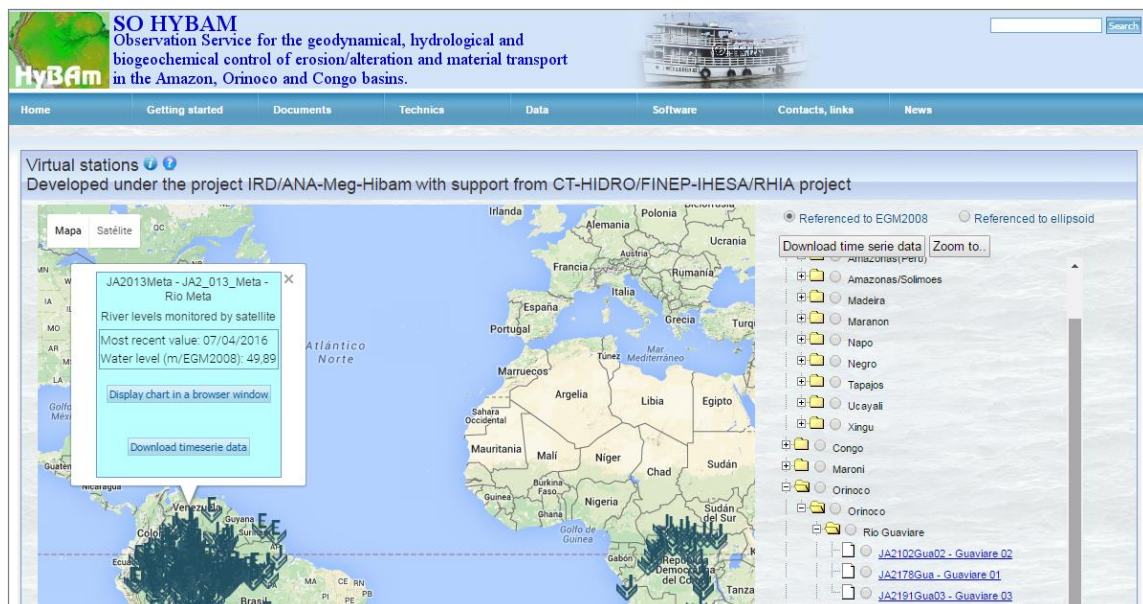


La actualización automática permite el complemento de las series temporales previamente definidas sobre las estaciones virtuales, con los datos más recientes enviados por el satélite, los cuales son adicionados al continuo de la serie original. Este procedimiento evita: i) descargar los datos manualmente del sitio web en los que están disponibles, ii) tratar el complemento de la serie sobre VALS para después exportar archivos de la manera convencional y iii) actualizar las series altimétricas en tiempo casi real. Hasta el momento este proceso es posible llevarlo a cabo para los datos altimétricos Jason 2 de tracking Ice

3. Dicho proceso hace posible optimizar las estaciones limnimétricas virtuales para complementar las redes de observación in situ.

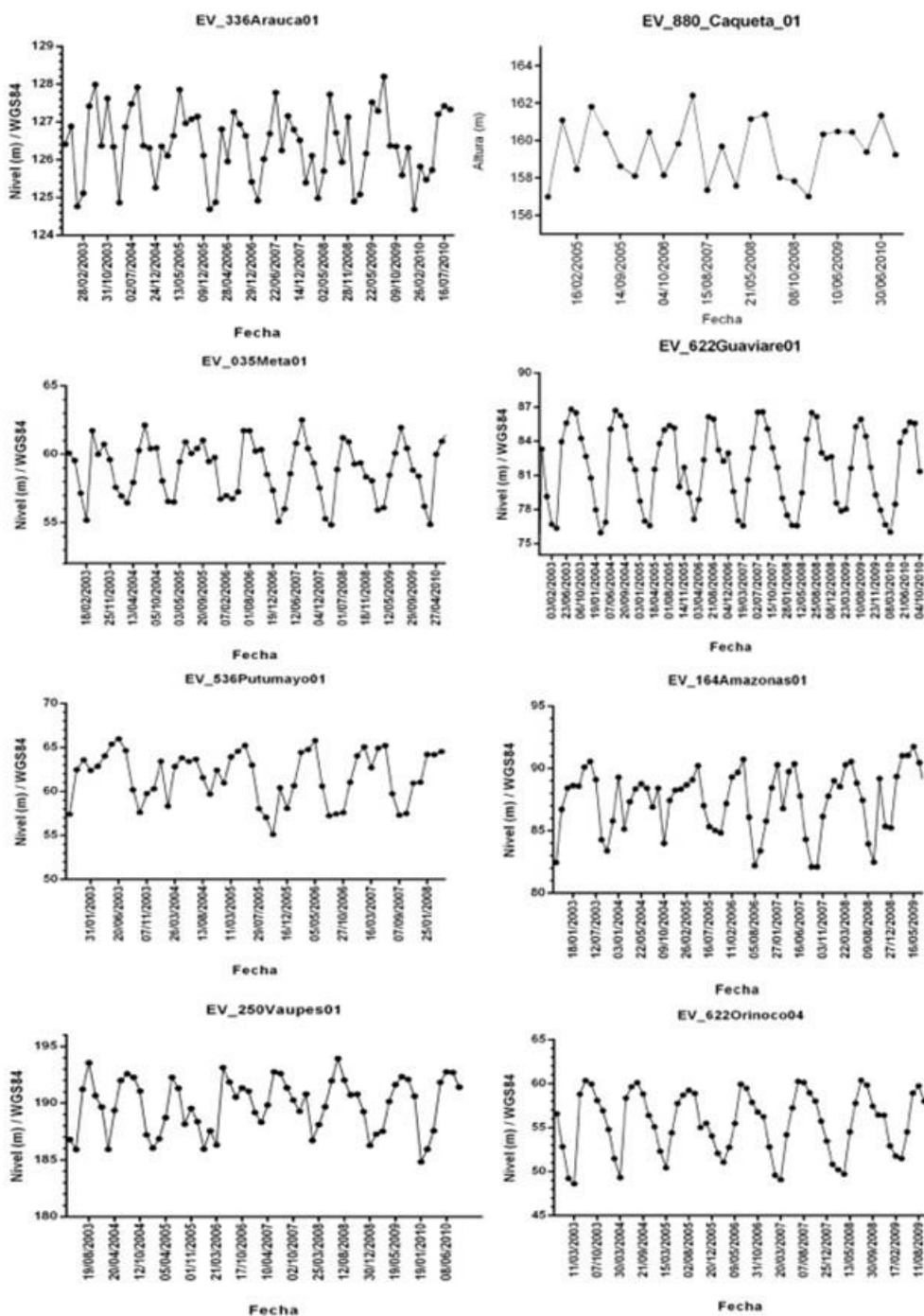
En este estudio toda la metodología se desarrolló a partir de las series temporales extraídas manualmente. Sin embargo, con el fin incorporar las estaciones virtuales de las cuencas Colombianas en el sistema de monitoreo automático de la ORE-HYBAM, se puso en marcha la actualización automática de 21 Estaciones virtuales Jason 2 ubicadas en los principales cauces de las cuencas del Orinoco y el Amazonas: seis (6) en el Meta; dos (2) en el Orinoco; tres (3) en el Guaviare; tres (3) en el Vaupés; una (1) en el Caquetá y seis (6) en el Putumayo. Por ejemplo, en la Figura 2-24 se puede observar en el sitio web de la ORE-HYBAM, la estación J2_013 Meta actualizándose, donde se señala que el último dato tomado corresponde con la fecha 07 de Abril de 2016.

Figura 2-24. Sistema de monitoreo automático de la ORE HYBAM.



En la cuenca del Orinoco y el Amazonas Colombiano, se lograron extraer 230 series temporales para el periodo comprendido entre los años 2002-2010. De la misión Envisat se obtuvieron 186 series temporales de los años 2008-2010 y de la misión Jason 2, 44 series temporales para el periodo 2008-2010. La Figura 2-25 presenta algunas series temporales obtenidas para los cauces principales.

Figura 2-25: Series Temporales Envisat para los cauces principales del Orinoco y Amazonas. Fuente: Elaboración Propia.



2.7.5 Análisis Estadístico de las Series Temporales obtenidas en las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano

Complementario a la obtención de series temporales que representan la variación de los niveles de agua, se realizó un análisis estadístico descriptivo que permitió conocer el rango de variación que se presenta a largo de una sección del río Orinoco. Por ejemplo, en la Tabla 2-6 se presenta el resumen estadístico para el conjunto de datos 2002-2010 de las estaciones virtuales Envisat e in-situ ubicadas a los largo del río, permitiendo: i) comparar los rangos de variación de las medidas de niveles de aguas, de la estación in-situ y la estación virtual y ii) analizar los rango mínimos y máximos de variación de los niveles de agua de cada una de las estaciones.

Para el caso específico del cauce principal del Orinoco, las estaciones que presentan mayor variabilidad en los niveles son las estaciones ubicadas aguas abajo de la sección Puerto Carreño y la 622Orinoco01 y, por el contrario, la menor variación la presentan las estaciones ubicadas aguas arriba de Mataven y 622Orinoco05. Un aspecto interesante a resaltar en este análisis, es que los coeficientes de curtosis de todas las estaciones fueron negativos, lo que indica que existe un amplio rango de variabilidad de los niveles de agua, con respecto a la variación promedio; esto indica que se presenta una marcada diferencia de niveles máximos en la época de lluvias y de niveles mínimos en la época de sequía. Por lo tanto, el río Orinoco presenta una dinámica de variaciones muy amplias, con relación a otros cauces en Colombia.

Analizando una sección del río Orinoco para el periodo 2002-2010, con las estaciones virtuales e in-situ, se puede ver que el rango de variación de los niveles de agua es de 6, cuya variación mínima y máxima oscila entre 0,5m y 7 metros, respectivamente. Es decir, que la variación de los niveles de agua en promedio para el río Orinoco es de 3,5 metros.

Tabla 2-6: Estadísticos Descriptivos para las Estaciones virtuales Envisat y estaciones in-situ sobre el río Orinoco. Fuente: Elaboración Propia.

	Estadísticos descriptivos											
	N	Rango	Mínimo	Máximo	Suma	Media	Desv. típ.	Varianza	Asimetría		Curtosis	
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error típico	Estadístico	Error típico
622Orin05	30	6,26	,25	6,51	100,85	3,3617	2,01663	4,067	-,035	,427	-1,371	,833
Mataven	30	6,66	,12	6,78	102,41	3,4137	1,94920	3,799	-,075	,427	-1,234	,833
PtoNarino	39	5,61	,16	5,77	116,72	2,9928	1,67702	2,812	,015	,378	-1,154	,741
493Orin01	39	4,82	,25	5,07	116,70	2,9923	1,61052	2,594	-,252	,378	-1,299	,741
Roncador	31	5,48	,72	6,20	101,74	3,2819	1,77022	3,134	,046	,421	-1,427	,821
622Orin05	31	5,72	,37	6,09	98,67	3,1829	1,95566	3,825	-,131	,421	-1,587	,821
622Orin01	68	6,92	,12	7,04	255,82	3,7621	1,94713	3,791	,001	,291	-1,049	,574
PtoCarreno	69	7,10	,04	7,14	265,64	3,8499	2,00650	4,026	-,246	,289	-1,034	,570
N válido (según lista)	30											

En conclusión este análisis descriptivo para los puntos de control ubicados en el río Orinoco permiten analizar la correlación que existe en la variación de los niveles de agua

registrados por las estaciones in-situ y la estación virtual y que posteriormente se corroborará con el proceso de validación. Además, permite conocer la dinámica de variación de niveles de agua existente a largo de la sección y la magnitud de dicha variación en proporciones mínimas y máximas.

2.7.6 Validación de medidas altimétricas con información in-situ e intercaptadores en las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano

Evaluar la calidad de las series temporales obtenidas en estaciones virtuales comparando las series altimétricas con series temporales de niveles diarios registrados in-situ se le denomina Validación. Esta comparación de las medidas altimétricas tomadas por el satélite con medidas registradas por estaciones in-situ pueden ser de niveles o caudales.

El caso ideal para este tipo de comparación sucede cuando la estación virtual y la estación hidrométrica se encuentran sobre la misma posición geográfica; allí la validación es inmediata al superponer los dos conjuntos de datos. Sin embargo, teniendo en cuenta la resolución espacial de las misiones satelitales, difícilmente una estación virtual y una estación hidrométrica coincidirán sobre un mismo punto geográfico. Este hecho limita considerablemente el proceso de validación para la gran mayoría de las series altimétricas obtenidas en estaciones virtuales. No obstante, es posible hacer una buena aproximación con estaciones separadas por cierta distancia teniendo en cuenta que sus secciones sean comparables, es decir, que la validación no se vea afectada por cambios de pendiente, cambios en la sección transversal, afluentes que convergen, zonas de inundación, efectos de remanso, entre otros.

Para llevar a cabo un proceso de validación es necesario seleccionar las estaciones in-situ que se encuentran geográficamente cerca de alguna estación virtual. Para ello, es necesario escoger las estaciones que estén separadas por una distancia no mayor a 15 kilómetros (Calmant et al., 2013) y que no presenten restricciones hidráulicas que impidan el proceso de validación. Seguido a esto, se deben normalizar las referencias altitudinales de las estaciones virtuales y las estaciones in-situ para lograr su comparación. Los datos de las estaciones virtuales están georeferenciados sobre el elipsoide WGS84 y generalmente las estaciones in-situ está referenciadas a un nivel estándar establecido por el IDEAM, casi siempre es la altura sobre el nivel del mar.

Con el fin de evaluar el nivel de precisión de las series altimétricas se aplica la metodología propuesta por León et al. (2006) que sugiere estimar la raíz media cuadrática (RMSE) entre las series virtuales y la serie in-situ más cercana. Lógicamente este proceso sólo es válido cuando cuya sección no se encuentre afectada por cambios hidráulicos bruscos (León et al., 2008). La estimación del RMSE (Root Mean Square Error) permite conocer el margen de error que existe entre las medidas altimétricas presentes y las lecturas in-situ. Para una

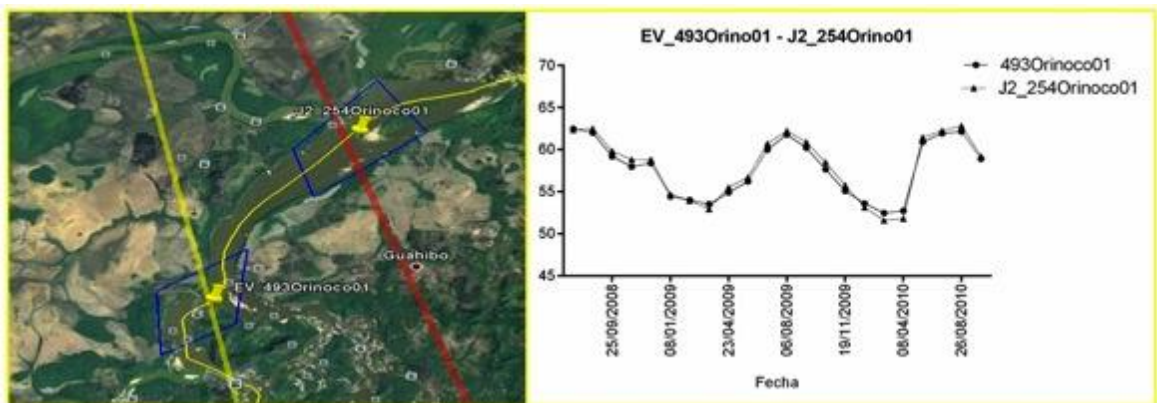
correcta validación, lo ideal es que este margen sea lo menor posible. El RMSE se expresa de la siguiente manera (Ecuación 2-3).

$$\sqrt{\frac{\sum(H \text{ insitu} - H \text{ Virtual})^2}{n}} \quad (2-3)$$

Donde H insitu es la medida normalizada de los niveles de agua de la estación in-situ que se desea validar y el H Virtual es la medida altimétrica normalizada de la estación virtual. Y n el número de medidas consideradas.

Igualmente, es posible realizar la comparación entre dos series altimétricas deducidas a partir de dos Estaciones Virtuales de diferentes misiones y que intersecten sobre una misma posición geográfica. En este caso la comparación recibe el nombre de Validación Intercaptores. Este tipo de validación consiste en comparar las series temporales de dos estaciones diferentes, o dos algoritmos de tracking diferentes, que se intersecten sobre una misma posición geográfica de un cauce dado (o separadas en una distancia no superior a 10km), con el fin de analizar si ambos satélites registran el mismo patrón de variabilidad de los niveles de agua de un cauce (Figura 2-26).

Figura 2-26: Ejemplo de Validación realizada en el río Meta con la estación in-situ Puerto Fortuna y la estación virtual EV_035Meta01. Fuente: Elaboración Propia.



Este resulta ser un método alternativo cuando no hay datos de campo para analizar la coherencia de una serie virtual y cuya finalidad es comparar las tendencias y variaciones que se presentan entre series virtuales ellas. En este estudio el proceso se lleva a cabo entre Estaciones Envisat y Jason 2 (Ice 1 o Ice 3).

Con el fin de analizar la precisión de las series temporales altimétricas obtenidas. En los cauces principales de las cuencas del Amazonas y el Orinoco se llevó a cabo un proceso de comparación de éstas con series de estaciones in-situ disponible que hacen parte de la red del IDEAM.

Debido a la baja densidad de registros disponibles in-situ, solo fue posible comparar un total de 30 series para el período 2002-2003. Sólo en dos casos se encontró una

62 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

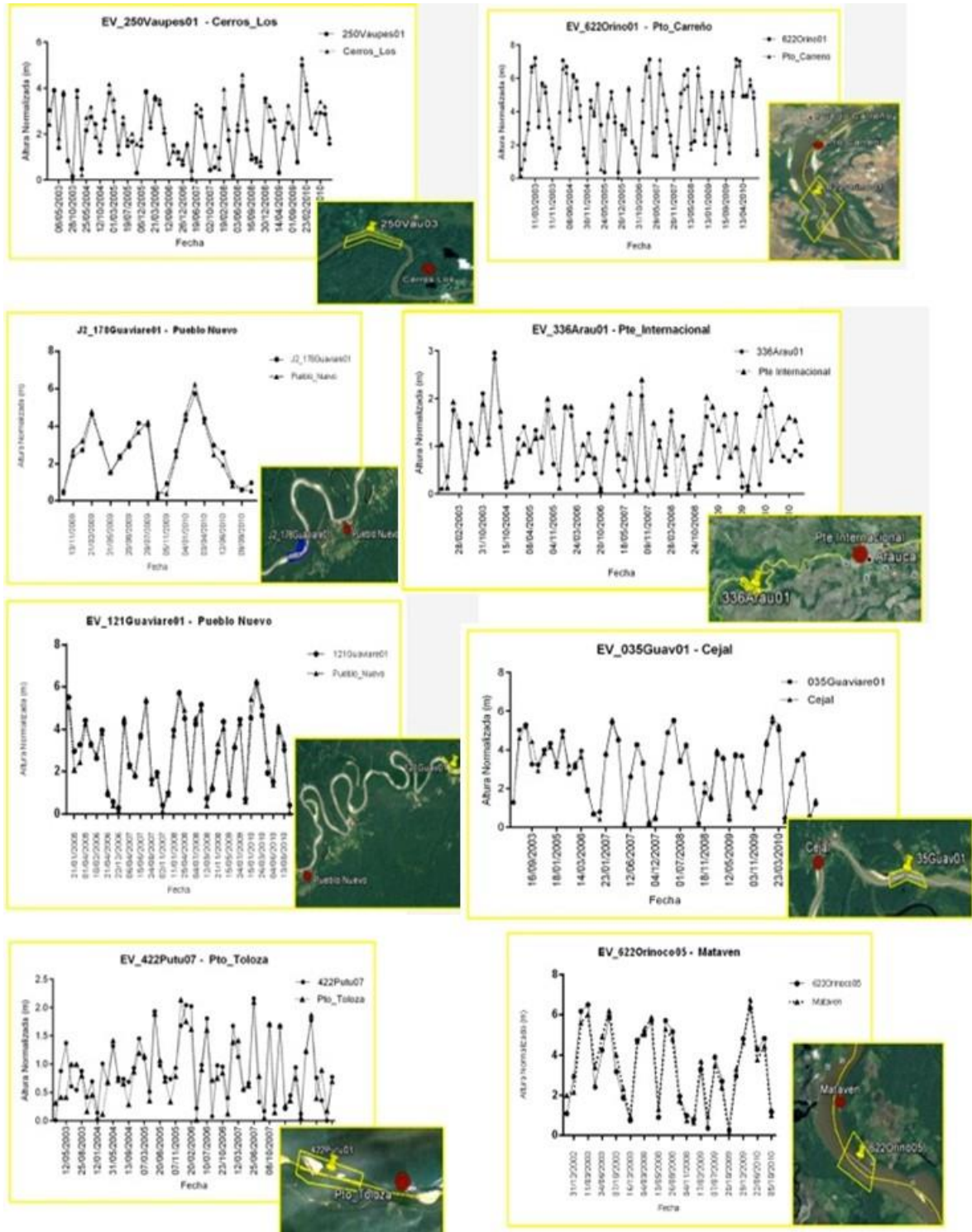
coincidencia geográfica exacta entre una estación virtual y una estación in-situ. Sin embargo, las validaciones realizadas en las dos cuencas presentaron un RMSE en promedio de 0,52 m \pm 10 cm particularmente para la cuenca del Orinoco y 0,29m para la cuenca del Amazonas. La Tabla 2-7 presenta el número de validaciones que se llevaron a cabo en cada cauce principal y el RMSE promedio obtenido por cada cauce principal. Para el caso del río Inírida y Vichada no fue posible desarrollar la validación por la falta de estaciones hidrométricas in-situ cercanas a EV.

Tabla 2-7: Número de Estaciones Virtuales validadas con estaciones in-situ del IDEAM y cálculo de RMSE correspondiente.

		Estaciones Validadas por comparación in-situ	RMSE Promedio (m)	Estaciones Validadas por comparación intercaptore	RMSE Promedio (m)
Cuenca Orinoco	Arauca	4	0,67	2	1,8
	Meta	15	0,55	4	0,67
	Orinoco	5	0,49	2	0,56
	Guaviare	8	0,36	4	0,96
Cuenca Amazonas	Vaupés	1	0,41	2	0,53
	Caquetá	4	0,25	5	0,76
	Putumayo	2	0,25	4	1,96
	Amazonas	1	0,45	1	1,20

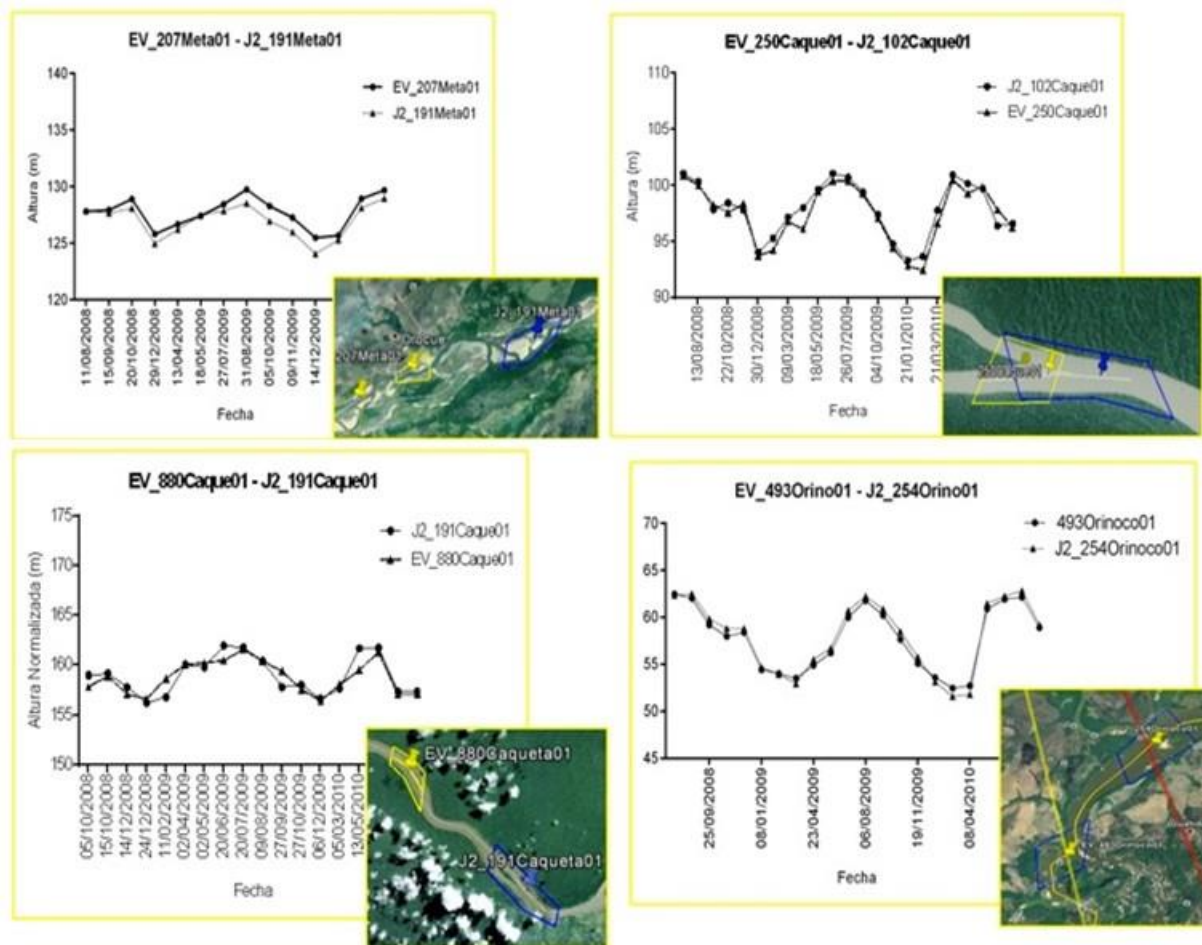
La Figura 2-27 presenta algunas validaciones de estaciones virtuales Envisat con comparación in-situ para el periodo 2002-2010 y algunas validaciones de estaciones Jason 2 para el periodo 2008-2010; en los que los RMSE fueron menores a 0,5 m. Las distancias consideradas para la comparación de niveles no superan los 15 km entre estaciones. Igualmente, se presenta la validación intercaptore para los ríos Meta, Caquetá y Orinoco, en el periodo comprendido 2008-2010 que es el tiempo en el que ambos satélites presentan mediciones. Los RMSE obtenidos en la comparación intercaptore es 0,6 m \pm 0,2. Esta diferencia, se debe a la resolución temporal que estos satélites presentan, debido a que en las medidas altimétricas no siempre coinciden en las mismas fechas (Figura 2-28).

Figura 2-27: Validaciones de estaciones virtuales Envisat y Jason 2, con registros hidrométricos in-situ en la cuenca del Orinoco. Fuente: Elaboración propia



64 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

Figura 2-28: Validación de Intercaptadores entre las misiones Envisat y Jason 2, en algunos cauces de la cuenca del Orinoco y el Amazonas. Fuente: Elaboración propia.

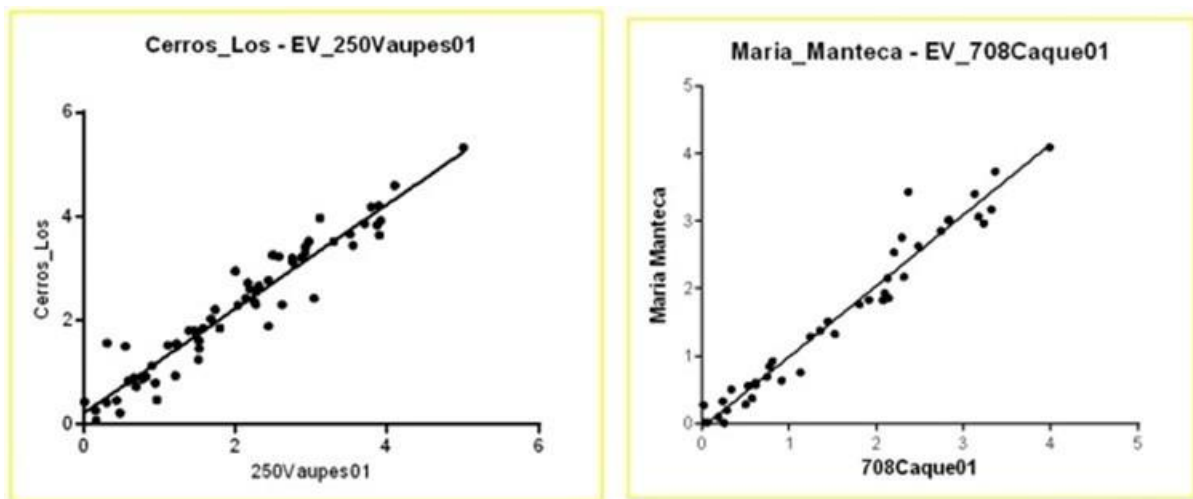


Como resultado, ambos satélites reflejan un patrón de comportamiento similar en la variabilidad de los niveles del cauce. Lo que se traduce en que los satélites Envisat y Jason-2 presentan aplicabilidad para realizar monitoreo hidrológico y complemento de registro hidrométricos in-situ. Nótese que la mayoría de validaciones realizadas en toda la cuenca del Orinoco y el Amazonas, dependen de la disponibilidad de datos hidrométricos in-situ del IDEAM. Sin embargo, dicha información altimétrica, corrobora que es posible llevar a cabo un monitoreo hidrológico mediante una tecnología que demuestra ser aplicable en las cuencas colombianas.

2.7.7 Modelo de Regresión Lineal y Prueba de Hipótesis para los datos altimétricos obtenidos en las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano

Paralelo a este proceso de validación, se llevó a cabo un modelo de regresión lineal con el fin de calcular la correlación existente entre los niveles reportados por las estaciones in-situ y los generados por las estaciones virtuales. Como resultado se obtuvo una correlación del 94%, la cual corrobora la proximidad de los niveles in-situ con las medidas altimétricas de las estaciones virtuales y permite analizar el comportamiento hidrológico de estas cuencas. Este procedimiento, posibilita el análisis de valores atípicos que puedan ayudar a evaluar y mejorar la calidad de los datos virtuales. La Figura 2-29 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta las correlaciones obtenidas.

Figura 2-29: Ejemplos de Correlación para las estaciones validadas. Fuente: Elaboración propia.



En el desarrollo de la validación intercaptadores se desarrolló una prueba de hipótesis, con el objetivo de comparar los datos tomados por las misiones satelitales Envisat y Jason 2. Esta consistió en un análisis univariado ANOVA (Analysis Of Variance) y en una prueba de Tuckey (Post Anova).

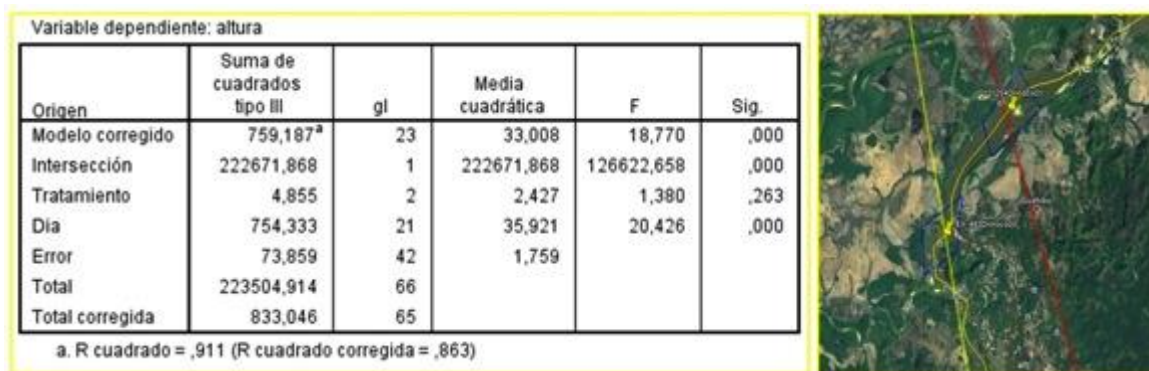
Como complemento, se propuso un análisis para comparar dos algoritmos de tratamiento de las señales de Jason 2 denominados Ice-1 y Ice-3. Las medidas altimétricas de Jason 2 provienen después de ser tratadas por algoritmos del CTOH de Francia, quienes publican los datos Jason 2- Ice 1 y Ice 3 en el marco del proyecto PISTACH (Prototype Innovant de Système de Traitement pour les Applications Côtières et Hydrologiques). Este

proyecto nació como parte del proyecto Jason 2 fundado por el CNES, quienes se han encargado del desarrollo de nuevos algoritmos para el tratamiento de las señales dedicados a la corrección de forma de onda (Retracking), correcciones de troposfera húmeda y seca entre otras (Mercier et al., 2008). Ice 1 y Ice 3 son técnicas especializadas que se han diseñado para el tratamiento de las señales, específicamente la forma de onda, dado que las señales se perturban principalmente en el medio continental. Ice 1 es un tratamiento manual realizado para corregir el centro de gravedad de la onda, sin embargo llega a un 30% de amplitud. Ice 3 es la misma corrección, solo que el área para corregir el centro de gravedad de la onda se restringe, lo cual hace de este tratamiento un proceso más robusto, que implica la actualización automática de los datos. Cabe resaltar que ambos tratamientos son realizados para cada medida altimétrica proveniente de la misma estación virtual.

Mercier et al. (2008), sugiere que ellos generan estos algoritmos y es responsabilidad del usuario determinar que retracking es el más apropiado para sus datos. Por esta razón, se realizó la comparación entre los algoritmos de tratamiento Jason 2 Ice1 y Jason 2 Ice3; con el fin de establecer si hay alguna diferencia significativa en las medidas altimétricas.

Un ejemplo de esta prueba de Hipótesis, se desarrolló en una sección del río Orinoco, donde se encuentran dos estaciones virtuales cercanas, una Envisat y la otra Jason 2. Las estaciones virtuales involucradas son: 254OrinocoJ2_01-Ice 1; 254OrinocoJ2_01-Ice 3 y EV_493Orinoco01 (Figura 2-30).

Figura 2-30: Resultado de la prueba de hipótesis para un caso de validación intercaptadores. Fuente: Elaboración propia.



Los resultados obtenidos de la prueba de hipótesis (Anova) se presentan en la Tabla 2-6 en la que no se reportan diferencias significativas entre los tratamientos Ice 1, Ice 3 de la misión Jason 2 con los datos altimétricos de la misión Envisat que estuvo activo hasta el año 2010. Esto quiere decir, que es posible continuar con la información altimétrica Jason 2, para el río Orinoco, desde el año 2008 hasta la actualidad.

De acuerdo con la Figura 2-30, se resalta que la prueba de hipótesis (Anova) para la variable 'días' reporta diferencias significativas, dado que existe una variación en la frecuencia de toma de datos altimétricos debido a la resolución temporal de las misiones Jason 2 (diez días) y Envisat (35 días). Es decir, que para una estación virtual Envisat se obtiene un conjunto de datos altimétricos una vez por mes, mientras que para una estación virtual Jason 2, se obtienen alrededor de tres mediciones por mes; teniendo mayor registro de datos y, en consecuencia un incremento en su variabilidad.

Esta prueba de hipótesis, permite consolidar estadísticamente los datos de la estación virtual Jason 2 y pueden complementar el periodo de monitoreo de Envisat. Esta prueba de hipótesis se desarrolló para todos los casos donde se realizó la validación intercaptadores, en los cauces principales de la cuenca del Orinoco y del Amazonas.

Finalmente, la prueba post-ANOVA con un 95% de intervalo de confianza, confirma la formación de un solo grupo, es decir que no existen diferencias entre las medidas altimétricas tomadas con los dos satélites ni entre los algoritmos Ice 1 y Ice 3. La tabla de comparaciones múltiples, permite ver con detalle la diferencia de medias, los límites del conjunto de datos para cada grupo altimétrico (Tabla 2-8).

Tabla 2-8: Prueba Post-ANOVA. Fuente: Elaboración propia

a. altura			b. Comparaciones múltiples						
DHS de Tukey ^{a,b}			Variable dependiente: altura DHS de Tukey						
1:Ice1;2:ENV;3:Ice3	N	Subconjunto					Intervalo de confianza 95%		
		1	(I) Ice1;2:ENV;3:Ice3	(J) Ice1;2:ENV;3:Ice3	Diferencia de medias (I-J)	Error tip.	Sig.	Límite inferior	Límite superior
3	22	57,7795		2	-.4026	,39983	,577	-1,3740	,5688
				3	,2564	,39983	,798	-.7150	1,2278
1	22	58,0358		1	,4026	,39983	,577	-.5688	1,3740
				3	,6590	,39983	,237	-.3124	1,6304
2	22	58,4384		1	-.2564	,39983	,798	-1,2278	,7150
				2	-.6590	,39983	,237	-1,6304	,3124
Sig.		,237							

Se muestran las medias de los grupos de subconjuntos homogéneos.
 Basadas en las medias observadas.
 El término de error es la media cuadrática (Error) = 1,759.
 a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 22,000
 b. Alfa = 0,05.

Basadas en las medias observadas.
 El término de error es la media cuadrática(Error) = 1,759.

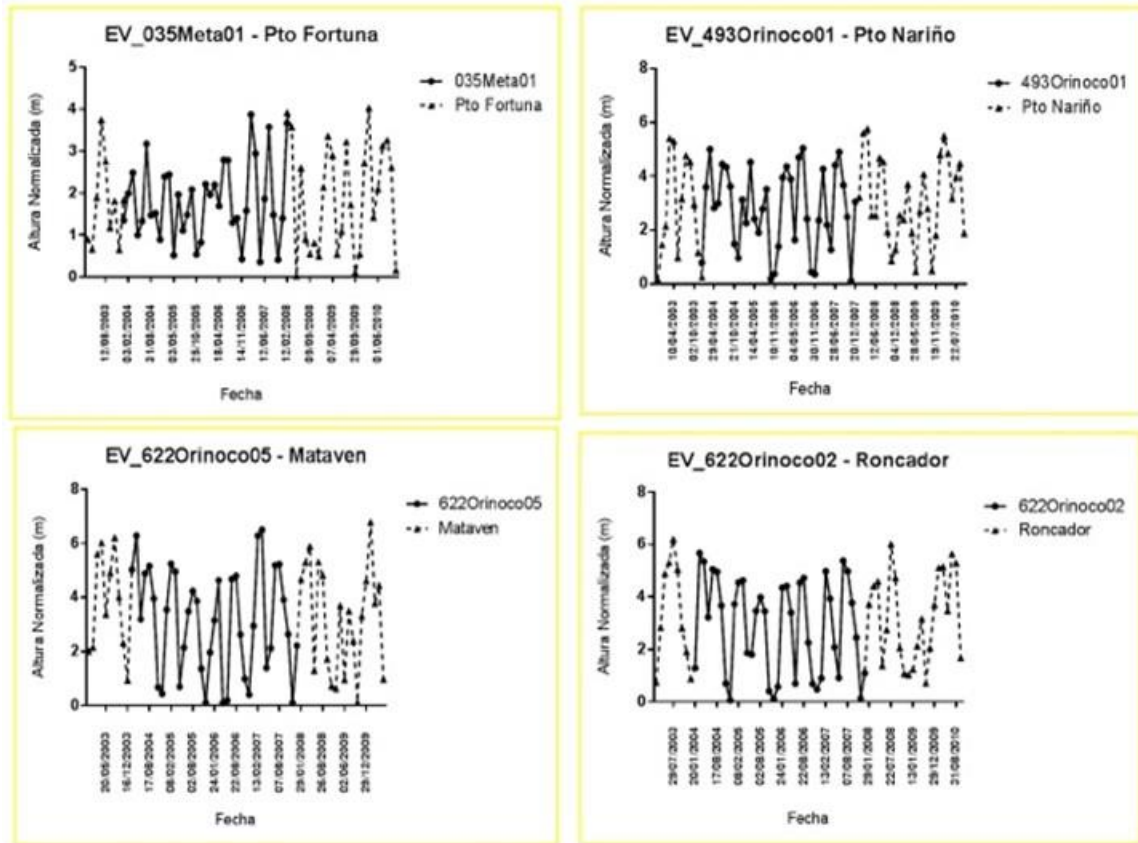
2.7.8 Complemento de Datos In-situ con información altimétrica en las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano

Con los resultados de validación anteriormente obtenidos, se presenta no solo la precisión de información altimétrica, sino también la posibilidad de complementar la información hidrométrica in-situ, que se encuentra desactualizada y, en algunos casos, incompleta, la cual es necesaria para cualquier tentativa de modelación hidrológica o de gestión del recurso hídrico.

El desarrollo de este proceso, permitió un complemento de información in-situ aprovechando la información altimétrica proporcionada por las estaciones virtuales. De acuerdo con ello, el complemento de datos faltantes, se convierte en una de las potencialidades de la aplicación de altimetría de radar por satélite en grandes, cuencas.

Este proceso, no solo fortaleció el monitoreo, el tiempo de acceso a la información, la rapidez, la actualización, sino que también, posibilitó la recuperación de información que no se tenía y que ahora es posible conocerla. Ejemplos particulares de estos casos son las estaciones de Puerto Nariño y Puerto Fortuna en el Meta; Roncador y Mataven en el Orinoco; Angelitos Los y Puerto Colombia en el Arauca; Mapiripana y Puerto Arturo en el Guaviare; Cuemani en el Caquetá y Leticia en el Amazonas. La Figura 2-31 presenta un ejemplo de las series temporales incompletas de las estaciones hidrométricas in-situ y el complemento realizado por una estación virtual cercana. En total complementaron 29 estaciones in-situ: 4 sobre el Arauca; 10 sobre el Meta; 7 en el Guaviare; 4 en el Orinoco; 3 en el Caquetá; 1 en el Amazonas, durante el periodo 2002-2012. En algunos casos este complemento se realizó con la misión Jason 2 (periodo 2008-2010). Las líneas continuas de la estación virtual proporcionaron la información faltante de la estación in-situ (líneas punteadas).

Figura 2-31. Ejemplo de complemento de datos faltantes en estaciones in-situ mediante estaciones virtuales. Elaboración propia.



2.8 Conclusiones

La Altimetría de radar por Satélite es sin duda una de las alternativas más viables para mejorar los problemas de monitoreo hidrológico en el país. Principalmente en cuencas hidrográficas extensas, con alta variabilidad climática e hidrológica y de difícil acceso. Es por esto, que la introducción de estaciones virtuales como medio para el levantamiento de información satelital permitió la obtención de datos históricos para zonas en las que incluso no se contaba con este tipo de información

Con la introducción de estaciones virtuales se logra analizar de manera integral la variabilidad hidrológica del Amazonas y del Orinoco, con base en la información altimétrica que permite delimitar áreas de captación hídrica o sub cuencas. Esta sub cuencas densifican el número de puntos de control para el monitoreo de la variación de los niveles de agua. De esta manera, se optimiza el análisis hidrológico de estas cuencas, al conocer mejor la variación que presentan estos cauces, incluso para periodos en los que no se tenía información, como en el caso del río Inírida.

70 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

Complementario a este desarrollo metodológico, se realizó un análisis estadístico Anova y Post-Anova de los datos altimétricos obtenidos, con el objetivo de precisar la toma de decisiones con base en unos criterios de confiabilidad, a partir de un procesamiento riguroso sobre las variaciones de los datos y la correlación de variables. En varios estudios realizados sobre la aplicación de radar satélite (Zhang, et al., 2010); (Da Silva, 2010); (Roux, et al., 2010), se utilizan métodos estadísticos como soporte para el análisis de los resultados obtenidos. De hecho, la aplicación estadística en dichos estudios se contrasta con los modelos matemáticos utilizados en la hidrología espacial obteniendo resultados razonables, con un soporte enmarcado en el método científico. Es por esta razón que en los procesos de validación se llevó a cabo un procesamiento estadístico que facilitó la interpretación de los resultados.

Con la puesta en marcha de estas aplicaciones estadísticas, se logró establecer que no existen diferencias significativas entre las medidas altimétricas de los satélites Envisat y Jason 2 para una sección en la que geográficamente coinciden, por lo tanto Jason 2 puede representar variaciones temporales para estaciones virtuales tal como lo realiza Envisat, teniendo continuidad en la información altimétrica de las estaciones virtuales que hayan sido creadas. Asimismo, se analizó el comportamiento y variabilidad de los principales cauces de la cuenca del Orinoco y el Amazonas, gracias a la comprensión de fenómenos hidrológicos como: niveles o caudales máximos y mínimos, las variaciones y el rango de valores en los que se distribuyen los niveles o caudales para dichas cuencas.

Adicionalmente, el proceso de validación mediante métodos como el RMSE y Regresión lineal, proporcionó los criterios para comparar estadísticamente la información altimétrica, con la información in-situ sobre los principales cauces del Orinoco y el Amazonas.

3. Caracterización Hidráulica en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 sobre los principales cauces de las cuencas del Amazonas y Orinoco colombiano

3.1 Descripción del modelo hidrodinámico optimizado Muskingum-Cunge

La estimación de caudales diarios en estaciones virtuales se basa en la aplicación de un modelo hidrodinámico optimizado, a partir de caudales diarios disponibles de estaciones in-situ. Este modelo denominado Muskingum-Cunge (M-C) es una versión mejor ajustada del modelo clásico de Muskingum, desarrollado inicialmente por (Cunge, 1969) hasta que hasta que Ponce en 1996 considera la dinámica de la onda como una variable importante, realizando una mejora en el modelo y establece que la estimación de caudales en estaciones virtuales consiste en la propagación de los caudales medios diarios conocidos para una estación in-situ aguas arriba hacia una estación aguas abajo asumiendo que la propagación dinámica de la onda se basa en las características hidráulicas de la sección considerada: entradas y salidas de la sección, pendiente de la sección, ancho del canal, velocidad de la onda y longitud de la sección (Ponce et al., 1997).

Dicho modelo permite propagar caudales en las estaciones virtuales a partir de los caudales conocidos de las estaciones in-situ. La propagación de los flujos superficiales de agua se realiza mediante la obtención de formas simplificadas de las ecuaciones de Saint Venant. Dichas ecuaciones se describen a partir de las relaciones de las ecuaciones de continuidad o de conservación de la masa (Ecuación 3-1) y de momentum conocida como conservación del movimiento (Ecuación 3-2).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L$$

Ecuación (3-1) Ecuación de continuidad

Donde Q es el caudal; A es la superficie húmeda; X es la longitud de la sección; q_L es el flujo lateral y t el tiempo; esta ecuación de conservación considera la velocidad media del flujo como una variable independiente del caudal. La ecuación de conservación del movimiento se compone de tres partes: La aceleración local y convectiva (primer y

segundo término de la ecuación, la fuerza de presión, la gravedad y la fuerza de fricción (últimos tres términos), considerando la fuerza de fricción en un modelo de onda cinemática, la presión en un modelo de onda difusiva y la aceleración local y convectiva en un modelo de onda dinámica.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$$

Ecuación (3-2) Ecuación de Momentum

Donde Q es el caudal; A es la superficie húmeda; X es la longitud de la sección; q_L es el flujo lateral; y es la profundidad del cauce; g es la aceleración de la gravedad; S_o es la pendiente del fondo y S_f es la pendiente de fricción.

La ecuación de propagación de onda, cinemática es obtenida combinando la Ecuación 3-3 con la Ecuación 3-4 donde v hace referencia a la difusividad física y q hace relación a la unidad de caudal según el ancho.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = cq_L + v \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}$$

Ecuación 3-3

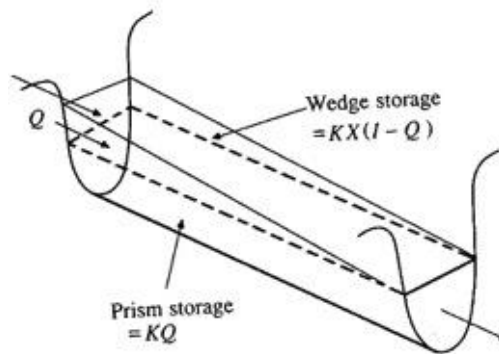
$$v = \frac{q}{2S_o}$$

Ecuación 3-4

El modelo toma la sección seleccionada como un segmento específico de un canal, con entradas, salidas, aportes laterales, una pendiente, un ancho de sección y una longitud. Las ecuaciones de Saint-Venant son normalmente utilizadas para describir un flujo unidimensional, es decir, que la profundidad de flujo varía gradualmente en dirección longitudinal del canal, asumiendo una pendiente suave y un fondo fijo para la sección considerada; lo cual no considera los efectos del fondo móvil de un cauce natural (Figura 3-1). Es por ello, que para la solución de las ecuaciones de Saint Venant a partir del modelo de Muskingum Cunge, considera los parámetros de celeridad (X) y difusividad (K) de la onda como constantes. Los coeficientes K y X son valores que hacen referencia al almacenamiento y la atenuación de la onda, siendo estimados a partir de las características físicas de la sección (Ecuación 3-5 y 3-6), al igual que la difusividad física en la Ecuación 3-7 donde F, es el número de Froude (Cunge, 1969). Teniendo en cuenta el término de difusividad en la Ecuación 3-7, el coeficiente de X se convierte en la Ecuación 3-8. Cabe resaltar, que el coeficiente X rige las entradas y salidas que afectan el almacenamiento en

la sección, es decir el caudal y K es un coeficiente de almacenamiento que está relacionado con el tiempo de propagación de la onda a lo largo de la sección.

Figura 3-1. Sección considerada para la aplicación de un Modelo M-C de acuerdo con las Ecuaciones de Saint Venant.



$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad \text{Ecuación 3-5}$$

$$X = \frac{1}{2} - \frac{v}{c \cdot \Delta x} \quad \text{Ecuación 3-6}$$

$$v' = \frac{q}{2S_o} (1 - (\beta - 1)^2 F^2) \quad \text{Ecuación 3-7}$$

$$X = \frac{1}{2} (1 - ((\beta - 1)^2 F^2 (q / S_o \cdot C \cdot \Delta X))) \quad \text{Ecuación 3-8}$$

La celeridad (C) es obtenida a partir de la velocidad de propagación de una onda cinemática (Ecuación 3-9). C puede ser definido como la velocidad de una onda de propagación en aumento, sin embargo, no es el equivalente a la velocidad media. La celeridad depende de la configuración del canal, de la pendiente y de la rugosidad. (Craig et al, 2002). La relación puede ser descrita por una ley como se presenta en la ecuación 3-10 y combinando las dos ecuaciones se obtiene la Ecuación 3-11 y 3-12.

$$C = dQ / dA \quad \text{Ecuación 3-9}$$

$$Q = a * A^\beta \quad \text{Ecuación 3-10}$$

$$C = \beta Q / A \quad \text{Ecuación 3-11}$$

$$c = \beta V \quad \text{Ecuación 3-12}$$

El coeficiente β , relaciona la velocidad media (V) con la celeridad, por lo tanto se puede obtener información de la fricción y las características de la sección. Su valor afecta

notablemente el cálculo del tiempo para la estimación de caudal en cada estación virtual. Un alto valor de β , puede afectar el cronometraje máximo en cualquier alcance. Es por ello, que se ha calculado varios valores de β . De acuerdo con varias referencias citadas por León (2005), estos valores han cambiado con base en las características de la sección. Según Ponce (1986), el valor de β es de 1,67 con una superficie que considera el coeficiente de fricción de Manning y 1,5 con el coeficiente de fricción de Chezy. Por el contrario, Craig et al. (2002), considera las secciones triangulares, rectangular y parabólica, dando un valor para β de 1,33 ; 1,67 y 1,44 respectivamente.

El método de Muskingum calcula el volumen almacenado en un canal de un río, y estima la tasa de inundación de este, si el caudal se propaga, aumenta, o excede su flujo. La longitud de cada sección es determinada según cada caso de estudio.

Este método es ampliamente utilizado en modelaciones hidrológicas (Singh, 1992); (Gill, 1978); (Chow et al., 1988); (Kshirsagar et al., 1995); (Ponce et al., 1996); (Birkhead & James, 1989); se basa en una relación de caudales almacenados en una sección dependiente del tiempo y la distancia recorrida. El método estima el volumen almacenado en una sección de un río, propagando el caudal en secciones transversales constantes, asumiendo un movimiento de flujo ligero y continuado. Para la aplicación del modelo, es necesario conocer los flujos de entrada y de salida a partir de los registros de información in-situ disponibles, si existen mediciones hidráulicas in-situ o hidrogramas establecidos para la sección considerada, los coeficientes X y K podrían ser determinados por el método de calibración propuesto por Chow et al. (1988).

Sin embargo, para calcular el caudal se desarrolla una simulación hidrodinámica; los estudios realizados anteriormente facilitaron el perfeccionamiento del modelo, llevando a que para el año 1996 el método de Muskingum-Cunge (M-C) haya sido optimizado debido a cambios en el direccionamiento del modelo de onda cinemática; ajustando el modelo mediante parámetros físicos e hidráulicos que anteriormente eran requeridos. Es decir, el M-C evita el paso de calibración de características hidráulicas requerido en el método de Muskingum tradicional. Además ha sido desarrollado en un código en Java mediante un programa denominado ProGUM por Cauhopé & Bonnet, (2004) en el cual desarrollaron los algoritmos basados en el enfoque dinámico de las ecuaciones de Saint Venant, para continuar estimando caudales en estaciones virtuales.

Aunque el modelo de Muskingum optimizado para estimación de caudales ya ha sido puesto en práctica en varios estudios hidrológicos en otros países (Johnson & Miller, 1997); (Merkel, 1999); (Boroughs & Zagana, 2002). Más aplicaciones sobre el modelo de Muskingum se encuentran documentadas y explicadas en publicaciones hidrológicas como (Gill, 1978); (Ponce, 1996), (León, 2005). Este auge de investigaciones del modelo lo convirtió en una alternativa atractiva y de fácil aplicación para los hidrólogos, lo que permitió que se incorporara cada vez más a la estimación de caudales en estaciones virtuales mediante la distribución de flujo en una sección seleccionada de un cauce.

Llevando a que investigadores como León et al. (2005) realizará una revisión completa del modelo de M-C y presentará de forma detallada la aplicación del modelo desarrollado en PROGUM para la cuenca del Rio negro en Brasil con estaciones virtuales Topéx/ Poseidón y Envisat (León et al., 2006) y por primera vez en Colombia en el cauce principal del rio Caquetá.

3.2 Aplicación del método de Muskingum-Cunge en estaciones virtuales

El método de Muskingum-Cunge Optimizado (M-C) es un modelo hidrodinámico que permite propagar series de caudales medios diarios conocidos en secciones establecidas de acuerdo a la estaciones virtuales que hayan sido definidas. Para llevar a cabo la aplicación del método de M-C en estaciones virtuales, es necesario establecer las secciones que se encuentren en medio de estaciones in-situ cuyas características hidráulicas sean conocidas, ya que para efectos de validación es necesario contar con una estaciones in-situ de caudales medios diarios conocidos aguas abajo con el fin de comparar los caudales estimados durante la propagación y los caudales medidos in-situ.

El modelo hidrológico M-C permite la caracterización de estaciones virtuales, es decir proporciona parámetros hidráulicos de las estaciones virtuales que se encuentren ubicadas en medio de cada sección. Cada una de las secciones se define por las estaciones in-situ presentes y la disponibilidad información hidrométrica in-situ que exista aguas arriba y aguas abajo de un cauce. Las estaciones in-situ deben presentar información hidrológica completa de un año mínimo tanto de niveles como de caudales.

Dicho modelo presenta como balance general para la sección considerada, la Ecuación 3-13.

$$O_{t+1} = C_0 \cdot I_{t+1} + C_1 \cdot I_t + C_2 \cdot O_t + C_3 Q_L \quad (3-13)$$

Donde O_{t+1} es la descarga de salida en el tiempo t y Q_L es la caudal de entrada lateral en toda la sección ($Q_L = q_l \cdot X$ siendo q_l el caudal unitario y x es la longitud de la sección) y O_t es la descarga de entrada en determinado t .

A partir de allí, el modelo se rige por la siguiente Ecuación 3-14:

$$Q_L = Q_{in} + Q_{tr} - Q_o \quad (3-14)$$

Q_L es la entrada de Caudales laterales en la sección principal; Q_{in} es el Caudal de entrada aguas arriba; Q_o representa el flujo de salida aguas abajo. Q_{in} y Q_o se pueden derivar de las estaciones hidrométricas disponibles en ambos extremos.

El modelo se puede expresar como la Ecuación 3-15:

(3-15)

$$Q_{ot} = C_0 [Q_{in} + Q_{tr}]_t + C_1 [Q_{in} + Q_{tr}]_{t-1} + C_2 [Q]_{t-1} + C_3 [q_L \cdot \Delta A]$$

Sin someterse a un estudio especial de QL es difícil establecer la cantidad de flujo almacenado en las llanuras de inundación y la cantidad que se pierde por la filtración o evaporación. Sin embargo, Frappart et al. (2011) presenta un método para determinar las variaciones de volumen de agua en los ríos y las llanuras de inundación por el uso combinado de imágenes radar y datos altimétricos mediciones de niveles de agua, determinando patrones de inundación y caracterizando temporadas de variación interanual.

Metodológicamente se describe paso a paso el proceso para llevar a cabo el modelo, de acuerdo a las secciones consideradas. El primer paso en la aplicación del modelo consiste en la estimación de K y X valores que se derivan de las características físicas de los ríos con el fin de obtener los coeficientes C_i o también conocidos como C_1 , C_2 , C_3 y C_4 , obtenidos de las Ecuaciones 3-16; 3-17, 3-18 y 3-19; las cuales son calculadas a partir de los coeficientes K y X estimados a partir del modelo M-C y considerados como constantes a partir de la suposición de linealidad de los parámetros de celeridad y difusividad.

$$C_0 = \frac{(-KX+0.5\Delta t)}{(K-KX+0.5\Delta t)} \quad (3-16)$$

$$C_1 = \frac{(KX+0.5\Delta t)}{(K-KX+0.5\Delta t)} \quad (3-17)$$

$$C_2 = \frac{(K-KX-0.5\Delta t)}{(K-KX+0.5\Delta t)} \quad (3-18)$$

$$C_3 = \frac{(\Delta t)}{(K-KX+0.5\Delta t)} \quad (3-19)$$

El modelo requiere un hidrograma de entrada que puede ser definido con datos de registros históricos de la sección, evitando que X sea significativamente menor que la distancia de propagación de la onda.

No es necesario conocer parámetros específicos de la sección, como pendiente o ancho, porque generalmente no están disponibles. X y K pueden ser calculados utilizando registros históricos de corriente de flujo. León et al. (2005) estima dichos parámetros hidráulicos a partir de la altimetría de radar por satélite y registros in-situ.

El segundo paso es la estimación de los aportes laterales (Q_L) en cada sección considerada entre dos estaciones in-situ, las cuales realizan un aporte mínimo, pero considerable tanto en periodos de crecida como de sequía.

Cabe destacar que León (2005), afirma que los caudales laterales realizan un mínimo aporte en periodos de crecida, debido a que las llanuras de inundación inciden en que el flujo principal se mueva hacia los costados, mientras que los aportes laterales aumentan en el cauce principal en la época de sequía, cuando el caudal disminuye y estos regresan al principal.

Cabe desatacar que el modelo se basa en la información hidrológica principalmente registrada y no tiene en cuenta situaciones que ocasionalmente se presenten eventos hidrológicos extremos relacionados con lluvias locales en subcuencas o microcuencas, que alteren o varíen el flujo comúnmente registrado.

Para tener en cuenta este tipo de sucesos en el modelo sería necesario un procesamiento detallado del periodo de retorno (frecuencia /periodicidad) y el caudal registrado, situación que supera los alcances de esta investigación y que posiblemente para cuencas colombianas no se cuenta con registros detallados de este tipo.

El tercer paso, es la estimación de caudales en las estaciones virtuales. Una vez estimados los aportes laterales entre las dos estaciones in-situ y asumiendo un flujo y distribución uniforme a lo largo de la sección, ProGUM calcula el caudal de salida para cualquier momento t determinado.

Es decir, para cualquier punto en el que se encuentre una estación virtual en la sección transversal, teniendo en cuenta la distancia o longitud de la parte considerada. Se subraya, que los coeficientes calculados y los aportes laterales estimados se mantienen constantes para toda la sección y solo el caudal de salida (Q_o) estimado en la primera estación virtual, será el caudal de entrada (Q_{in}) en el cálculo del siguiente tramo o EV.

El último paso consiste en la estimación del error. Este es un indicador de fiabilidad, para ello se ha utilizado tres formulaciones que han permitido inferir las ecuaciones para el cálculo de error en el modelado.

En las Ecuaciones siguientes, E1 significa el error medio absoluto en función del caudal de salida medido, E2 significa el error medio absoluto basado en la diferencia entre el caudal máximo y mínimo medido y E3 es el error medio absoluto basado en el cálculo del RMSE (Error medio cuadrático), es decir la diferencia entre el caudal medido promedio y el caudal promedio de salida.

Así, la estimación del error entre el caudal estimado y el caudal medido (E1) se hace aplicando la relación de la Ecuación 3-20. Esta relación considera el error medio absoluto basado en el caudal medido de la estación in-situ aguas abajo.

$$E_1 = \frac{|C_{cal} - C_{medido}|}{C_{medido}} \quad (3-20)$$

Donde C_{cal} corresponde al caudal estimado mediante el modelo de M-C, y C_{medido} corresponde al caudal medido diario conocido en la estación in-situ. La explicación paso a paso del modelo puede consultarse en la publicación desarrollada por León et al, 2005. La estimación del error en función de la diferencia del caudal máximo y mínimo (E_2) se presenta en la Ecuación 3-21, donde C_{min} es el caudal mínimo y C_{max} es el caudal máximo. También se presenta la estimación del error medio absoluto basado en el error cuadrático (RMSE) (E_3) en la Ecuación 3-22. La magnitud relativa del error depende del tiempo y de la variación del flujo.

$$E_2 = \frac{|C_{cal} - C_{medido}|}{C_{min} - C_{max}} \quad (3-21)$$

$$E_3 = \frac{|C_{cal} - C_{medido}|}{\sqrt{\frac{\sum (\Delta C)^2}{n}}} \quad (3-22)$$

También se considera un indicador que especifica la magnitud del error en relación con el tiempo de variación de caudal, es decir que relaciona el error medio en la estimación del caudal de salida y la variación promedio del caudal en un conjunto de tiempo diferente (de 1 a 20 días). Ecuación 3-23.

$$E_j = \frac{|\sum J |C_{cal} - C_{medido}|}{n \sum \left| Q_{t \frac{J\Delta t}{2}} - Q_{1 + \frac{J\Delta t}{2}} \right|} \quad (3-23)$$

Donde t es el intervalo de tiempo (1 día, depende de la frecuencia de mediciones) y j el periodo (número de días) seleccionado. Q_t es el caudal calculado en el tiempo t y n representa el número total de días del periodo considerado. Pueden ser 20 años de variación de datos. Si el indicador está cerca de 1, el error es del mismo orden de magnitud que la variación de flujo de agua diario, y en consecuencia la fiabilidad de los datos es baja.

Finalmente, para llevar a cabo la aplicación del modelo, las Ecuaciones expresadas anteriormente se aplicaron con la ayuda de la herramienta Microsoft Excel, donde también se estimaron los coeficientes del modelo entre dos estaciones in-situ, los aportes laterales entre dos estaciones in situ, los aportes laterales para cada sección

considerada y los coeficientes del modelo entre las estaciones virtuales, obteniendo datos de caudales para cada una de ellas.

3.3 Estimación de caudales medio diarios en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 para los principales cauces de la cuenca del Orinoco y el Amazonas

El proceso de estimación de caudales se llevó a cabo, utilizando la metodología descrita en el punto anterior, sobre las secciones donde fue posible contar con datos de caudales in-situ aguas arriba y aguas abajo. Del conjunto de Estaciones Virtuales (EV) definidas para la cuenca del Orinoco y el Amazonas se establecieron diez (10) secciones hidráulicas, de acuerdo con la información in-situ disponible por las estaciones hidrométricas del IDEAM. Una (1) sección para el cauce principal del Orinoco, dos (2) secciones para el Arauca, cinco (5) para el Meta, cinco (5) para el Guaviare, una (1) para el Vaupés, una (1) para el Caquetá y una (1) para el Putumayo. La Tabla 3-1 presenta la cantidad estaciones virtuales Envisat Y Jason 2 que se caracterizaron hidráulicamente a partir de la aplicación del modelo, en cada una de las secciones seleccionadas de los cauces principales.

Algunas de las secciones hidráulicas seleccionadas para llevar a cabo el modelo se presentan en la Figura 3-2. Se caracterizaron en estas secciones específicas alrededor de siete (7) EV en el Río Guaviare, cinco (5) EV en el Meta, tres (3) EV en el Arauca, cuatro (4) EV en el Orinoco, cinco (5) EV en el Putumayo, tres (3) EV en el Vaupés y cinco (5) en el Caquetá.

Tabla 3-1: Número de estaciones virtuales para caracterización hidráulica. Fuente: Elaboración propia.

Cauce Principal	Número Estaciones Virtuales Envisat	Número Estaciones Virtuales Jason 2
Arauca	2	1
Meta	12	2
Guaviare	19	6
Vaupés	3	0
Caquetá	7	2
Putumayo	9	2
Orinoco	4	1

Los resultados obtenidos con la aplicación del modelo, se presentan en la Tabla 3-2 para estaciones virtuales Envisat. La Tabla 3-3 muestra las estaciones virtuales Jason 2 que presentan: una (1) EV para Arauca y Meta, tres (3) EV para Guaviare y dos (2) EV para Caquetá y Putumayo.

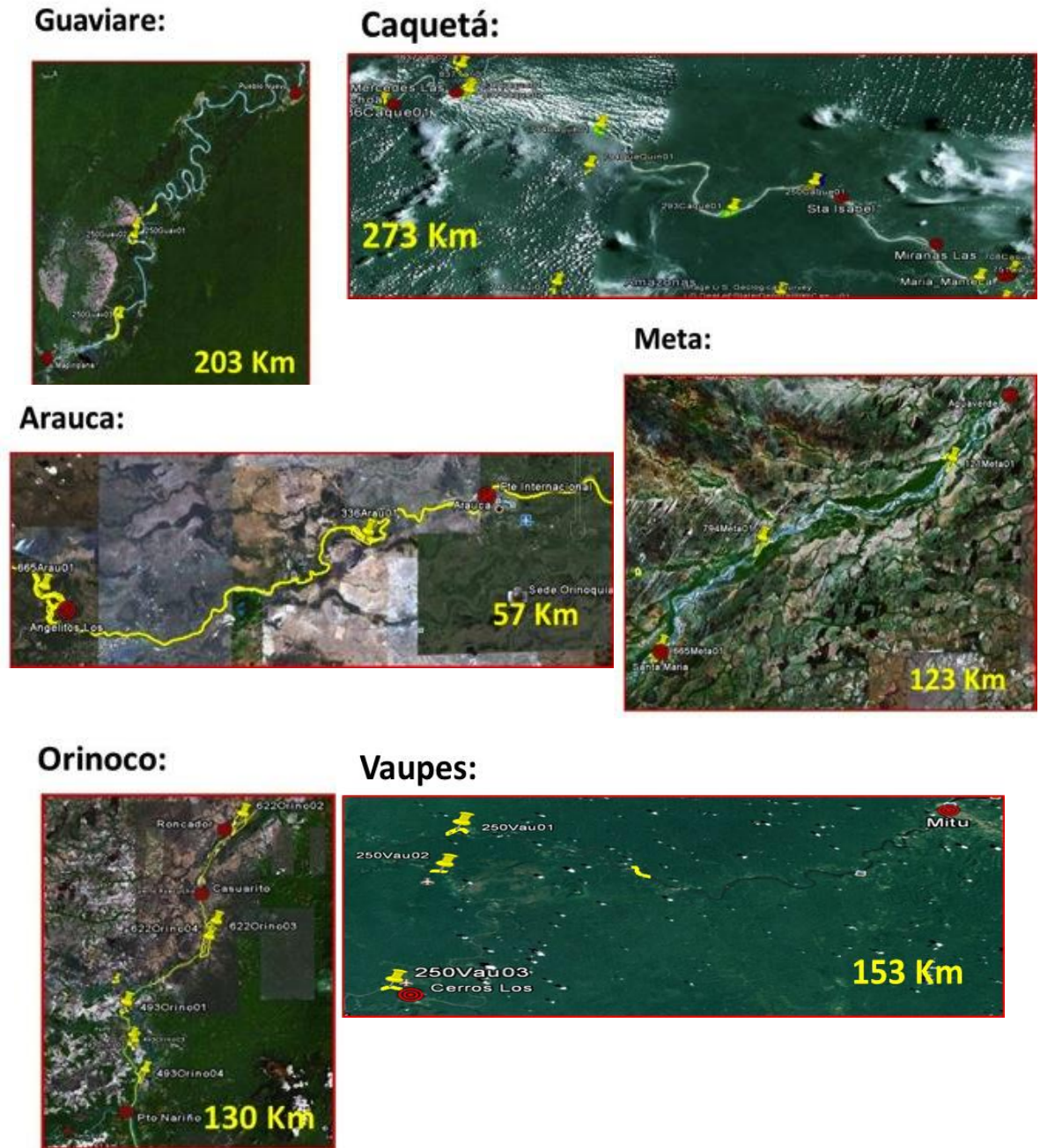
La aplicación del modelo de Muskingum-Cunge, arrojó como resultado la estimación de caudales medios diarios en estaciones virtuales Envisat Y Jason 2, sobre las secciones que cada una representan, lo cual permitió la deducción de series temporales de caudales medios diarios en secciones de los cauces principales, donde antes no había información disponible o no se conocía la información de caudales (León et al., 2010 b).

El error mínimo estimado para cada sección es inferior al 2% para las estaciones virtuales Envisat y menor al 1% para las estaciones virtuales Jason 2. A partir de estos datos es posible conocer la variación de los caudales en cada sección, reconociendo caudales máximos y mínimos de cada cauce.

En este caso, el río que mayor varía de caudal es el Orinoco, seguido del Putumayo y el Caquetá, en los cuales su caudal máximo y mínimo presenta una diferencia superior a los 20.000 m³/s.

Los ríos que menor variación presentan en su caudal con respecto a los otros cauces de estas cuencas, son el Arauca y Vaupés, los cuales varían aproximadamente en 1000 m³/s. El río Meta y Guaviare varían su caudal mínimo y máximo en un rango de 8000 a 10.000 m³/s.

Figura 3-2: Secciones Hidráulicas para caracterización de estaciones virtuales. Estaciones in-situ (en rojo), Estaciones Virtuales (en Amarillo) y distancia de cada sección en Kilómetros. Fuente: Elaboración propia.



82 Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Jason 2 mediante aplicación de altimetría de radar en las cuencas de la Amazonía y Orinoquia Colombianas

Tabla 3-2: Estimación de caudales medios diarios para estaciones virtuales Envisat. Fuente: Elaboración propia.

	Estación	Caudal Medido (m ³ /s)	Caudal Estimado (m ³ /s)	Caudal Medio Máximo (m ³ /s)	Caudal Medio Mínimo (m ³ /s)	Error Estimado
Arauca (2002-2005)	Cajaros_Los	501		1.887	74	
	EV_665Arauca03		491	1505	96	
	EV_665Arauca02		491	1531	96	
	Angelitos_Los	491		1.531	96	0,001
Arauca (2002-2005)	Angelitos_Los	518		1.520	96	
	EV_336Arau01		520	1.508	24	
	Puente Internacional	608		1.771	8	0,200
Meta (2002-2003)	Puerto Texas	2.292		5.186	230	
	EV_336Meta01		2.636	6.388	137	
	EV_207Meta01		2.835	7.169	204	
	EV_665Meta01		3.057	8.029	195	
	Sta_Maria	3.131		7.974	197	0,207
Meta (2002-2006)	Sta_Maria	3.347		7.974	197	
	EV_794Meta01		3.770	8.607	136	
	EV_121Meta01		3.982	9.174	205	
	Aguaverde	4.194		10.151	217	0,012
Guaviare (2002-2003)	Mapiripana	3.202		15.776	361	
	EV_250Guav03		3.168	15.776	396	
	EV_250Guav02		3.168	15.776	369	
	EV_250Guav01		3.167	15.782	310	
	EV_665Guav01		2.676	7.888	486	
	Pueblo Nuevo	2.719		6396	558	0,080
Guaviare (2003-2010)	Pueblo_Nuevo	2.958		7.328	189	
	EV_121Guaviare01		2.958	7.430	192	
	EV_708Guaviare01		3.159	7.408	233	
	EV_164Guaviare01		3.559	7.522	331	
	Cejal	3.958		7.750	427	0,008
Vaupés (2002-2009)	Cerros_Los	1.011		2.380	44	
	EV_250Vaupes02		1.170	2.902	78	
	EV_250Vaupes01		1.328	3.071	104	
	EV_207Vaupes01		1.328	3.071	104	
	Mitu_Automatica	1.328		3.071	104	0,002
Caquetá (2003-2011)	Mercedes_Las	4.913		12.071	114	
	EV_837Caqueta01		4.913	12.074	115	
	EV_837Caqueta02		4.913	12.074	115	
	EV_250Caqueta01		6.870	15.044	189	
	EV_751Caqueta01		8.828	18.944	1.892	
	EV_708Caqueta01		8.828	18.944	1.892	
	Maria_Manteca	8.828		18.944	1.892	0,001
Putumayo (2007-2010)	Bellavista	1.829		3.659	411	
	EV_465Putumato01		1.827	3.651	216	
	EV_422Putumayo02		2.287	4.542	208	
	EV_923Putumayo01		2.517	5.290	304	
	EV_923Putumayo02		2.616	5.326	816	
	EV_880Putumayo01		2.517	5.290	304	
	San Agustín	2.517		5.290	304	0,001
Orinoco (2003)	Puerto Nariño	14.571		34.002	3.94	
	EV_493Orinoco04		14.567	33.990	3.905	
	EV_493Orinoco01		15.125	34.201	3.274	
	EV_622Orinoco04		15.813	36.589	3.402	
	EV_622Orinoco03		15.811	36.557	3.402	
	Roncador	15.781		36.352	3.403	0,018

Tabla 3-3: Estimación de caudales medios diarios para estaciones virtuales Jason 2. Fuente: Elaboración propia.

	Estación	Caudal Medido (m ³ /s)	Caudal Estimado (m ³ /s)	Caudal Máximo (m ³ /s)	Caudal Mínimo (m ³ /s)	Error Estimado
Arauca (2002-2005)	Cajaros_Los	501		1.887	74	
	J2_178Arau01		501	1.858	64	
	Angelitos_Los	491		1.531	96	0,001
Meta (2002-2006)	Sta_Maria	3.347		7.974	197	
	J2_178Meta01		3558	8.234	81	
	Aguaverde	4.194		10.151	217	0,012
Guaviare (2003-2010)	Pueblo_Nuevo	2.958		7.328	189	
	J2_013Guaviare01		3.559	7.524	332	
	J2_013Guaviare02		3.559	7.524	332	
	J2_013Guaviare03		3.559	7.525	333	
Caquetá (2003-2011)	Cejal	3.958		7.750	427	0,008
	Mercedes_Las	4.913		12.071	114	
	J2_013Caque01		8.828	18.944	1892	
	J2_102Caque01		6.870	15.044	194	
Putumayo (2007-2010)	Maria_Manteca	8.828		18.944	1.892	0,001
	Bellavista	1.829		3.659	411	
	J2_026Putu01		2.402	4.827	256	
	J2_191Putu01		2.517	5.290	304	
	San Agustín	2.517		5.290	304	0,001

A partir de los caudales medios diarios estimados, fue posible deducir series temporales de caudales para los periodos comprendidos entre los años: 2002-2005 en el río Arauca; 2002-2006 en el río Meta; 2003-2010 en el río Guaviare; 2003-2011 en el río Caquetá y por último, 2007-2010 en el río Putumayo.

Es importante resaltar, que la información producida anteriormente, no estaba disponible para dichas secciones, lo cual favoreció el análisis del comportamiento histórico de los volúmenes de agua de estos cauces.

A continuación, en la Figura 3-3, se presentan algunas series de caudales obtenidas de las estaciones virtuales Envisat y Jason 2, para secciones de los principales ríos de la cuenca del Amazonas y Orinoco. Como resultado de este proceso, se generaron registros históricos de caudales con variaciones típicas del régimen tropical, caracterizado por un comportamiento unimodal, en el que se presentan caudales máximos en los meses de Julio, Agosto y Septiembre, asociados con la época de lluvias de la región de la Orinoquía.

Los caudales mínimos, se presentan en época de pocas lluvias, entre los meses de enero y marzo. Es importante mencionar que en la época de lluvias o seca, los caudales tienden a aumentar hasta 3 o 4 veces respecto al caudal promedio y en la época de sequía disminuyen considerablemente.

Las series de caudales diarios obtenidas sobre los cauces principales de las cuencas de Amazonas y Orinoquia, mediante la aplicación de un modelo hidrológico en diferentes

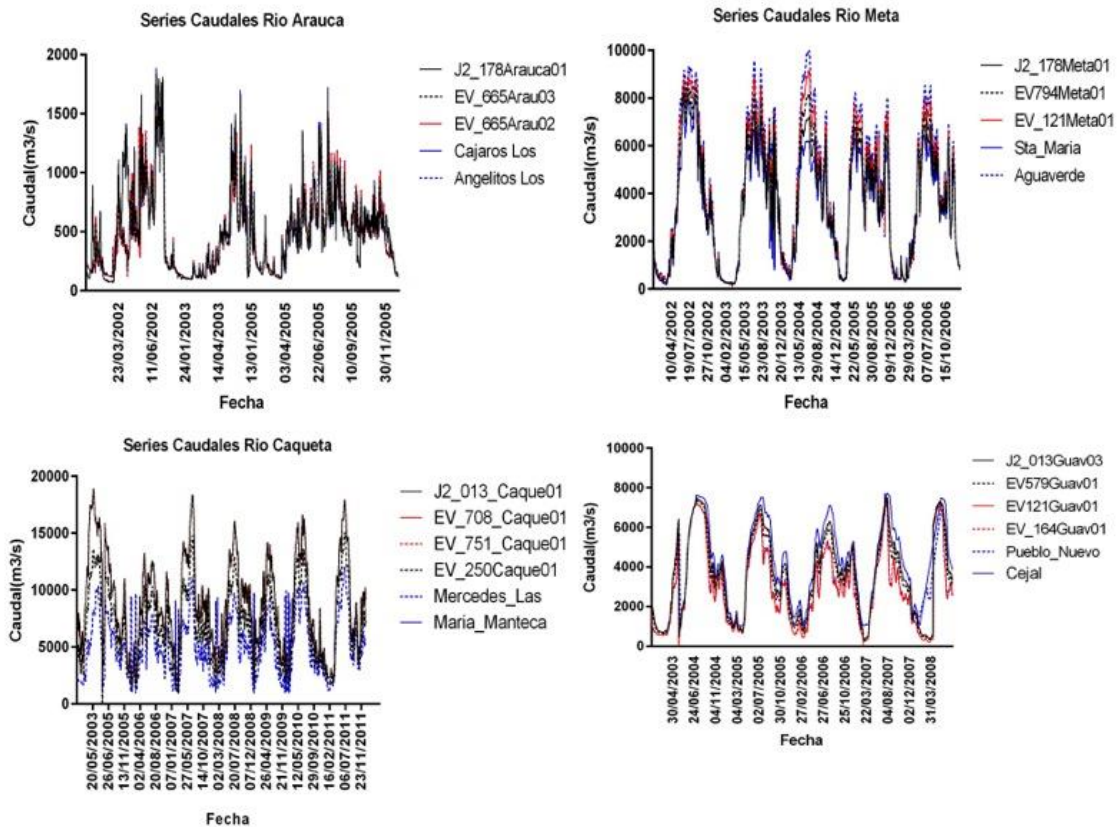
estaciones virtuales, se convierte en una información que complementa las series de caudales diarios para las estaciones in-situ ubicadas en dichas zonas. Además, es posible establecer caudales en secciones de 200 km, donde antes no se conocía esta información por falta de información hidrométrica in-situ.

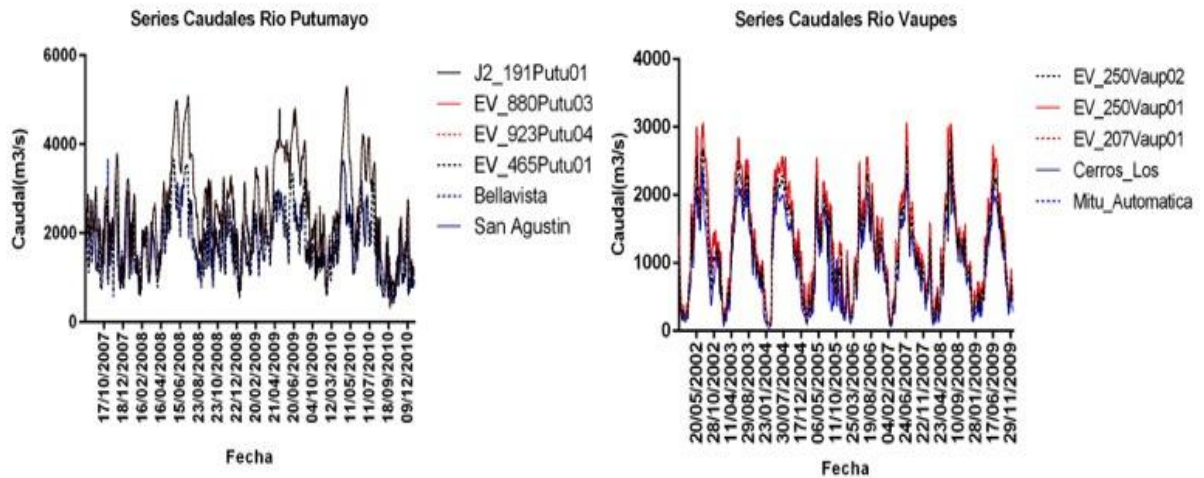
Una vez estimados los caudales diarios, se realizó la caracterización hidráulica de las estaciones virtuales, mediante la deducción de curvas de gasto (relación altura-caudal de una sección transversal), procedimiento del cual se deriva la estimación de parámetros hidráulicos propios de cada sección.

Existen varias etapas requeridas para obtener datos de caudal: la primera se refiere a la medición del caudal a través de aforos, la segunda al cálculo de caudales a partir de análisis y modelos hidrológicos (como se realizó anteriormente) y la tercera, al cálculo de caudales a partir de datos de nivel, lo que requiere el establecimiento de una relación calibrada altura-caudal.

Sin embargo, para obtener dicha calibración es necesario contar no solo con caudales diarios, sino también con niveles diarios y, para ello, debe plantearse un proceso de interpolación.

Figura 3-3: Series temporales de caudales para los principales cauces de las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano. Fuente: Elaboración propia.





3.4 Interpolación de series temporales para las estaciones virtuales Envisat y Jason 2 de las cuencas del Amazonas y Orinoco Colombiano

Hasta el momento, las series de estaciones virtuales que se han venido trabajando están condicionadas a la toma de datos altimétricos dentro de un periodo dado: 35 días como mínimo para Envisat y diez (10) días para Jason 2. Este hecho limita el registro preciso del nivel del agua en los eventos de corta duración, con periodos de máximos y mínimos (Calmant & Seyler, 2006). Sin embargo, el monitoreo hidrológico de las secciones transversales de un río, trae consigo la necesidad de conocer valores diarios de los niveles del agua sobre dichas secciones, tal y como se lleva a cabo con las estaciones in-situ. Para conocer dichos valores sobre estaciones virtuales, resulta indispensable desarrollar un proceso de interpolación temporal.

El método de interpolación de series temporales se lleva a cabo mediante una metodología desarrollada por Roux, Cauhopé, Bonnet, Calmant, Vauchel & Seyler (2008), en la cual se pretende estimar los datos diarios altimétricos de las estaciones virtuales, mediante el uso de los niveles diarios de las estaciones in-situ adyacentes, como estaciones de referencia. Este proceso es normalmente llevado a cabo a partir de las estaciones in-situ presentes aguas arriba y aguas abajo de la estación virtual que se quiera interpolar y, está sujeto a la disponibilidad de datos diarios en dichas estaciones. Mediante esta herramienta se realizan los procesos estadísticos y matemáticos necesarios para deducir una serie temporal con niveles diarios.

Para ejecutar el proceso de interpolación, se trabaja con el paquete estadístico denominado R (The R Project for Statistical Computing). R es un conjunto integrado de

servicios de software para la manipulación de datos, cálculos y representación gráfica, que integra herramientas para el análisis de datos⁵ (Roux et al., 2008).

El método de interpolación desarrollado en R, se basa en un modelo lineal, el cual tiene como procedimiento de estimación de parámetros una técnica de Optimización Multiobjetivo (OPT), en el que se pretende estimar los niveles de agua diarios de una estación virtual, requiriendo mínimas expresiones matemáticas y algoritmos basados en métodos clásicos como: el mínimo cuadrado ponderado.

El procedimiento asume que la serie temporal altimétrica proporcionada por el satélite contiene la mayor parte de información necesaria para una interpolación fiable de los datos altimétricos. En ese contexto, no es necesario definir las expresiones matemáticas de algunos datos y/o propiedades del modelo, como la covarianza espacio-temporal de los residuos de interpolación (Tarantola y Valette, 1982) y se adopta un punto de vista empírico (Roux et al., 2008).

El método se basa en la hipótesis de que el modelo parte del espectro de la serie de tiempo in-situ disponible y construye una serie de tiempo interpolado para la estación virtual. Es decir, que la aplicación del método se realiza complementando lagunas de series de tiempo altimétrica, cuya interpolación es derivada de la evaluación cuantitativa y absoluta de los datos hidrométricos in-situ. Por tanto, la sensibilidad del método depende de la calidad de los registros in-situ y de la ubicación a lo largo del río de las estaciones virtuales. La descripción detallada del método se encuentra en la publicación desarrollada por Roux et al. (2008).

El paso inicial para llevar a cabo un proceso de interpolación es necesario seleccionar las estaciones virtuales Envisat y Jason 2 que se encuentren en medio de dos estaciones in-situ de la red hidrométrica del IDEAM que cuenten con información disponible. Debido a que este proceso depende de la información in-situ que se tenga disponible aguas arriba y aguas debajo de la estación virtual. Así mismo, es necesario tener en cuenta la distancia agua arriba y aguas abajo que separa cada una de las estaciones, permitiendo derivar niveles medios diarios para el periodo que se disponga con la información in-situ.

La Tabla 3-4 presenta las estaciones virtuales e in-situ seleccionadas para el proceso de interpolación en cada uno de los cauces principales de las cuencas del Amazonas y el Orinoco que cuentan con información disponible, especificando el periodo de información disponible.

⁵ Introducción a R, disponible en: <http://cran.r-project.org/doc/contrib/R-intro-1.1.0-espanol.1.pdf>

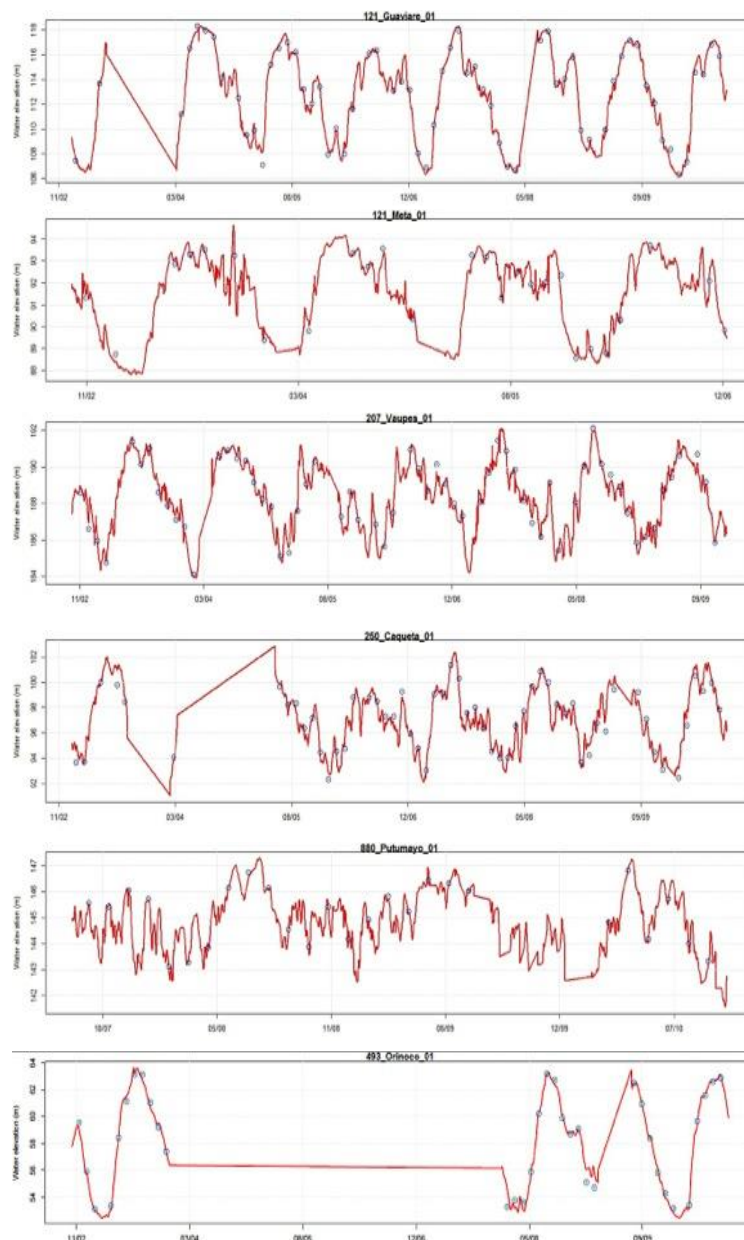
Tabla 3-4: Estaciones virtuales seleccionadas a interpolar y estaciones in-situ utilizadas en el proceso de interpolación. Fuente: Elaboración propia.

Nombre Cauce	Nombre de la Estación virtual	Periodo disponibilidad de datos
ORINOCO	Puerto Nariño	2002-2003; 2008-2010
	EV_493Orinoco04	2002-2010
	EV_493Orinoco01	2002-2010
	EV_622Orinoco04	2002-2010
	EV_622Orinoco03	2002-2010
	Roncador	2002-2003; 2008-2010
ARAUCA	Cajaros_Los	2002-2005
	J2_178Arauca01	2008-2012
	EV_665Arauca03	2002-2010
	EV_665Arauca02	2002-2010
	Angelitos_Los	2002-2005
META	Puerto Texas	2002-2003
	EV_336Meta01	2002-2010
	EV_207Meta01	2002-2010
	EV_665Meta01	2002-2010
	Sta_Maria	2002-2010
	Santa María	2002-2006
	J2_178Meta01	2008-2012
	EV_794Meta01	2002-2010
	EV_121Meta01	2002-2010
	Aguaverde	2002-2003
	GUAVIARE	Mapiripana
EV_250Guav03		2002-2010
EV_250Guav02		2002-2010
EV_250Guav01		2002-2010
EV_665Guav01		2002-2010
Pueblo Nuevo		2003-2010
EV_121Guaviare01		2002-2010
EV_708Guaviare01		2002-2010
EV_579Guaviare01		2002-2010
EV_579Guaviare02		2002-2010
J2_013Guaviare03		2008-2012
J2_013Guaviare02		2008-2012
J2_013Guaviare01		2008-2012
EV_164Guaviare01		2002-2010
Cejal		2002-2010

CAQUETA	Mercedes_Las	2002-2003
	EV_837Caqueta01	2002-2010
	EV_837Caqueta02	2002-2010
	EV_250Caqueta01	2002-2010
	EV_751Caqueta01	2002-2010
	EV_708Caqueta01	2002-2010
	Maria_Manteca	2002-2008
VAUPES	Cerros_Los	2002-2009
	EV_250Vaupes02	2002-2010
	EV_250Vaupes01	2002-2010
	EV_207Vaupes01	2002-2010
	Mitu_Automatica	2002-2010
PUTUMAYO	Bellavista	2007-2010
	EV_465Putumato01	2002-2010
	EV_422Putumayo02	2002-2010
	EV_923Putumayo01	2002-2010
	EV_923Putumayo02	2002-2010
	EV_880Putumayo01	2002-2010
	San Agustín	2007-2010

Figura 3-4 presenta ejemplos de estaciones virtuales interpoladas por cada cauce principal. Los puntos azules son las medidas altimétricas tomadas por el satélite cada 35 días y la línea roja continua es la interpolación realizada en el programa R. Con base en las series diarias de niveles de agua, obtenidas mediante el proceso de interpolación de las medidas altimétricas y en los caudales medios diarios, obtenidos a través de un modelo hidrodinámico, será posible entonces llevar a cabo la caracterización hidráulica de estaciones virtuales, la cual consiste en derivar curvas de gasto para cada una de las estaciones virtuales sobre las cuales haya sido posible aplicar el modelo de M-C y para el periodo de tiempo en el que se presente disponibilidad de series de caudales in-situ, en el mejor de los casos 2002 a 2010.

Figura 3-4. Ejemplo de Interpolación realizada en las estaciones virtuales con el programa R. Fuente: Elaboración propia.



3.5 Curvas de Calibración o Curvas de Gasto obtenidas para Estaciones virtuales

La estimación de curvas de gasto en estaciones hidrométricas que representan las secciones transversales de un río, es una de las tareas fundamentales de la hidrometría. Las medidas de “altura del agua” y “caudales” son complementarias y dependientes por ello, se expresan en una relación calibrada altura /caudal, que recibe el nombre de Curva de Gasto o Curva de Calibración.

La curva de gasto es la expresión gráfica de la relación existente entre los niveles de agua y los caudales de la corriente. Expresada de forma general como una ley potencial, la curvas de gasto ha sido utilizada para deducir caudales medios diarios a partir de registros de niveles diarios del agua tomados sobre las escalas limnimétricas de cada estación in-situ. Los pares de datos altura-caudal son obtenidos mediante una práctica que se conoce como aforo (OMM, 1994). La precisión de la estimación de los caudales diarios es función de la calidad de esta relación obtenida para la sección, que a su vez depende, en consecuencia, del número de aforos realizados (León et al., 2011).

Estas medidas de caudal repartidas en el tiempo, son utilizadas en relación con la altura de las escalas limnimétricas al momento del aforo para construir una relación altura/caudal que corresponde específicamente a la sección de la medida. Esta relación conocida como curva de gasto es utilizada para restituir los caudales diarios a partir de alturas diarias. La altura del agua es fuertemente dependiente de la forma de la sección para un caudal dado, pero es realmente la información de caudales diarios la que es utilizada para la mayor parte de las investigaciones y de aplicaciones hidrológicas.

Las curvas de gasto se caracteriza por una relación uno a uno entre caudal y nivel; la homogeneidad de esta relación se puede determinar por la dispersión entre la magnitud del caudal aforado y el valor del caudal medio obtenido a través de la curva de gasto. Desde el punto de vista de la dispersión, estas magnitudes no deben superar el error sistemático del aforo. De acuerdo con investigaciones realizadas por autores, el error sistemático de los aforos realizados en la red de observaciones del IDEAM, en promedio no supera el 10%. Por tanto, para considerar que una curva de gasto representa una relación estable, es necesario que la dispersión entre los caudales aforados y los obtenidos a través de la curva de gasto no supere ese 10% (IDEAM, 2007).

La dispersión que se presenta entre los caudales aforados y los caudales definidos por la relación $h_t=f(Q)$ puede ser ocasionada por factores como error sistemático en la metodología de aforo, factores hidráulicos o factores morfológicos. El primero tiene un carácter aleatorio y por tanto su influencia es balanceada, ya que se presenta alternadamente con signos positivos y negativos.

Por el contrario, la influencia de factores hidráulicos y morfológicos puede ocasionar una alta dispersión en la curva $h_t=f(Q)$, esto se debe a que las condiciones hidráulicas y

morfológicas no son coherentes con el régimen de flujo uniforme, deterioran la mono valencia de la relación altura- caudal y produce la aparición del fenómeno de histéresis en la curva, lo que ocasiona que para un mismo nivel se obtengan caudales muy diferentes.

Esta relación se puede determinar una vez se hayan obtenido aforos suficientes que representen toda la gama de variación de los niveles de la corriente de agua. Por tal razón, es una herramienta hidrológica que permiten la deducción de los caudales medios diarios del río, a partir de la lectura del nivel de agua sobre dicha sección. En este caso, a partir de las medidas altimétricas se logra deducir el caudal estimado en una estación virtual, poniendo en evidencia la relación que existe entre una cota del nivel del agua y el caudal correspondiente a dicha cota para una sección dada de un río. Es decir que las curvas de calibración en estaciones virtuales son obtenidas gracias a la aplicación del modelo hidrodinámico M-C anteriormente explicado y con series de niveles de agua provenientes de medidas altimétricas.

En efecto, la relación matemática altura/caudal o curva de calibración de una estación hidrométrica, es expresada de forma general como una ley potencial, para una estación virtual puede ser representada por la Ecuación 3-24:

$$Q_t = a(H - z)_t^b \quad (3-24)$$

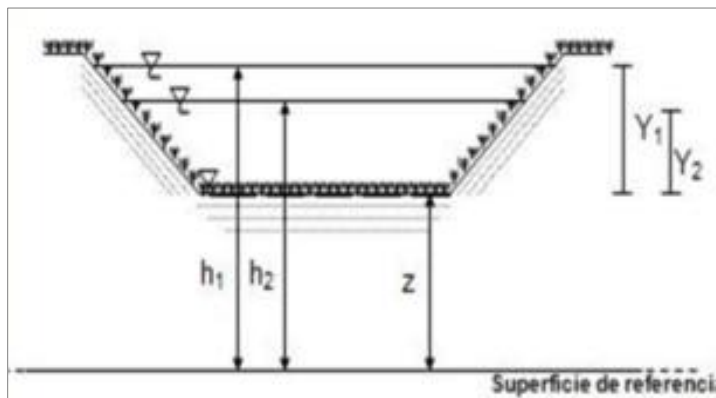
Donde, Q_t es el caudal a un momento t . $(H-z)$ corresponde a la profundidad del flujo cero del cauce, en el tiempo t para la sección de control. H : es la altura de la superficie libre del agua medida por el satélite y z corresponde a la altitud del flujo tomado sobre la misma referencia (Rantz et al., 1982). Los coeficientes a y b son específicos para cada sección transversal y están relacionados con las características físicas del cauce, (Rantz et al. 1982). Por ejemplo a , es un factor de escala que contiene información sobre el ancho de la sección, pendiente del fondo local, coeficiente de rugosidad de Manning y radio hidráulico. Por su parte b , incluye la geometría de la sección, la forma del cauce de los ríos, la presencia de bancos de arena, la forma de la ribera del río (León et al., 2006). Un valor de b menor a dos ($b < 2$) indica un control de canal y, mayor a dos ($b > 2$) señala un control de sección (Rantz et al., 1982).

Rantz et al. (1982) señala que la relación entre el nivel y el caudal se rige por una combinación de elementos físicos de la sección transversal que reciben el nombre de controles. Estos controles son los que gobiernan la relación entre el nivel y el caudal y se pueden clasificar en dos grupos: control de sección y control de canal. La explicación detallada de estos controles y la influencia de estos se pueden encontrar en la publicación de Rantz o en las publicaciones de León et al. (2005).

La altura del nivel de agua medida desde el espacio es tomada respecto a un elipsoide de referencia, generalmente el WGS84 y no desde el fondo del cauce. Esto significa que H , es el nivel del agua obtenido por altimetría de radar en el momento t ; y z

deberá ser por consecuencia la altura que existe entre el fondo del cauce y el elipsoide de referencia (Figura 3-5).

Figura 3-5. Expresión de la relación en función de la altura altimétrica. Fuente: León et al. (2006).



Partiendo de la base de que Q y H pueden ser valores conocidos en cada momento t , el problema consiste en encontrar entonces el valor de z que represente la altura entre el flujo cero y el elipsoide de referencia, único para cada t . De esta manera resultará posible encontrar la relación entre Q y $(H-z)$ que permita deducir los coeficientes a y b presentados. Además, estas relaciones permiten estimar la profundidad media del agua, equivalente a la profundidad media del río.

Para estimar la profundidad es necesario tener en cuenta que los coeficientes a y b son específicos de la sección; debido a que proporcionan parámetros hidráulicos específicos que no pueden ser aplicados a otras secciones. Estos son utilizados para el cálculo de la profundidad de flujo, dado que es un índice que corresponde a un cambio en el ancho y la velocidad una sección en particular; por lo tanto, la profundidad siempre se debe calcular con los coeficientes específicos de las características de la sección que se esté midiendo.

Rantz et al. (1982), se basaba en aproximaciones logarítmicas para determinar la profundidad de flujo, tomando Q y H como valores de medición conocidos y llegando al valor de z , mediante la representación de una curva logarítmica que permitía estimarla profundidad del flujo cero en el tiempo t con los correspondientes coeficientes a y b . Sin embargo, con caudales superiores a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ no se puede estimar el valor de z , porque esta metodología convierte la relación altura-caudal en una relación logarítmica lineal (León, 2005).

Para determinar la profundidad del flujo cero (H-z) se aplicó la metodología propuesta por León et al. (2006). Este método consiste en la minimización del error de la raíz media cuadrática (RMSE) entre el caudal estimado por el método de M-C (Q_{mes}) y un caudal estimado a partir de la relación potencial (Q_{cal}) (Ecuación 3-25).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_{medido} - Q_{calculado})^2}{n}} \quad (3-25)$$

Donde Q calculado corresponde al caudal estimado mediante el modelo de M-C y Q medido corresponde al caudal medido diario conocido en la estación in-situ. Siendo n el número de mediciones consideradas. Para un valor dado de z, los coeficientes a y b son estimados mediante una regresión lineal de la forma (Ln(Q), Ln(H-z)). Explorando un rango de posibilidades posibles de z se llega a construir una función del tipo RMSE (z) = f(z). Todo el posible rango de valores que pueda tener z fue explorado con incrementos de 0.01 m. El valor de z que mejor representa la altitud del flujo cero efectivo puede ser expresada como indica la Ecuación 3-26.

$$\frac{\partial f(z)}{\partial z} = 0 \quad (3-26)$$

Para modelar la relación altura / caudal mediante una relación matemática simple, la ecuación de manning se puede expresar como una ley de potencia, con base en la ecuación de continuidad. De hecho esta ecuación puede ser modificada para calcular el caudal de una sección (Ecuación 3-27).

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3-27)$$

Cuando Q es la descarga, n el coeficiente de rugosidad, A el área de la sección transversal, R el radio hidráulico y S la pendiente de fricción.

En un canal natural de forma irregular, como los son las corrientes naturales, es posible suponer una fricción variable; no obstante, el coeficiente de rugosidad y la pendiente de fricción son considerados como constantes (Chow et al., 1988). León (2005) afirma que aproximando A = DW, donde D es la profundidad media y W es el ancho de la sección transversal, expresando S^{1/2} como una constante, se obtiene la Ecuación 3-28. Si el radio hidráulico se considera igual a D y W se considera una constante, la ecuación se convierte en la 3-29:

$$Q \approx aDWR^{\frac{2}{3}} \quad (3-28)$$

$$Q \approx aD^{1.67} \approx a(H - Z)^{1.67} \quad (3-29)$$

En el que (Hz) representa la profundidad del agua del cauce, H el nivel de la superficie del agua, y Z la base de la sección de forma irregular.

Rantz et al. (1982), demuestra que a menos que la corriente sea excepcionalmente amplia, R (radio hidráulico) es significativamente menor que D (Profundidad media). Esto reduce el exponente en la ecuación, aunque puede ser compensado por un aumento de S (Pendiente) o W (Ancho de la sección). Los cambios en la rugosidad pueden afectar el valor del exponente. Estos factores finalmente expresan el cálculo del caudal como la ecuación 3-24 planteada inicialmente.

Las curvas de calibración son aproximadamente parabólicas; sin embargo, puede presentar algunas irregularidades si la sección transversal es irregular. Esto es cuando las características geométricas de estas son inestables al cambio de las condiciones climáticas de la zona. Si la curva obtenida cuenta con una línea definida, los niveles indicaran una precisión en los caudales estimados. Sin embargo, esto durará, mientras las condiciones geométricas de la sección se mantengan uniformes. Para ello, es importante recordar que los caudales utilizados para realizar la curva de calibración fueron estimados a partir del modelo M-C optimizado, asumiendo una propagación de la onda en condiciones uniformes.

La continuidad de la curva a través de los años se basa fundamentalmente en la estabilidad de las características hidráulicas del cauce, como la profundidad, la sección mojada, la velocidad y el caudal se mantiene constantes en el tiempo (permanencia) y el espacio (uniformidad).

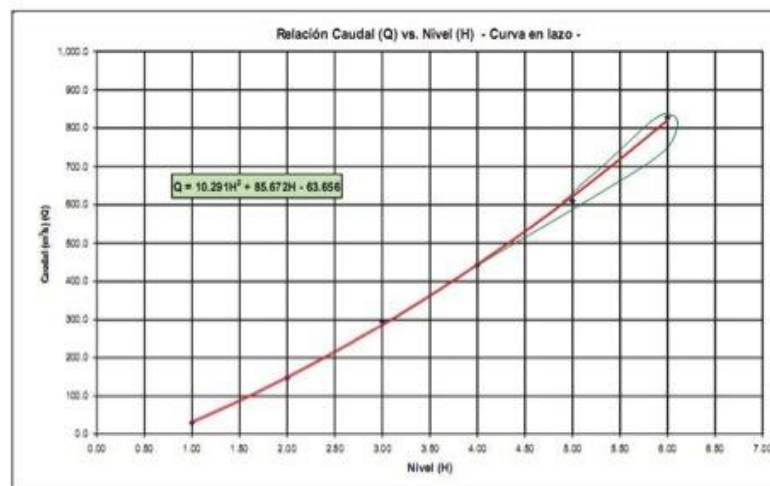
En la construcción de la curva de gasto de algunas estaciones, la sucesión de datos conjugados altura-caudal, resultan de una serie de valores medidos en campo o estimados representando las diversas fases de crecida o disminución de niveles y por ende de caudales; obteniendo una curva en lazo. En la Figura 3-6 se observa que cuando el nivel de agua va en ascenso los caudales deducidos en la curva son ligeramente superiores a los obtenidos en la curva de régimen permanente, efecto contrario cuando los niveles del río se encuentran en descenso. Rantz et al. (1982) afirma que en un lugar, bajo condiciones de inundación (onda uniformemente progresiva) se puede presentar este tipo de curvas. Incluso, en estaciones que puedan estar influenciadas por efecto de remanso. León et al. (2005) afirma que estos efectos son comúnmente causados por cambios en las secciones transversales aguas debajo de la estación (estaciones situadas aguas arriba de la confluencia a una región plana).

Los cauces de las corrientes de agua, por naturaleza están sometidos a cambios continuos de sus características hidráulicas, salvo en contadas excepciones se mantienen constantes, por eso juega un papel muy importante el sitio donde se encuentra ubicada la estación hidrológica, el cual debe seleccionarse de acuerdo con criterios que garanticen la estabilidad de la sección y la mayor cercanía del flujo de la corriente al régimen uniforme.

Al variar las condiciones hidráulicas de las secciones de aforos la curva se modifica permanente en el tiempo. Por tanto, el proceso de construcción para cauces inestables, deben tomar consideración los cambios de sitios en las secciones y los periodos considerados como representativos en cada curva (IDEAM, 2007).

Aunque no se ha evidenciado que se hayan presentado curvas de calibración en estaciones in-situ de esta manera, se afirma que es probable que ocurra en estaciones virtuales de sistemas fluviales como las cuencas del Orinoco y el Amazonas que presentan sabanas inundables.

Figura 3-6: Ejemplo de una relación existente entre los valores de niveles y caudales en forma de lazo. Fuente: Elaboración propia.



3.6 Estimación de Curvas de Gasto para los principales cauces de las cuencas del Amazonas y el Orinoco Colombiano

En los últimos años se ha avanzado en la caracterización hidráulica de las estaciones virtuales, dado que esta información es fundamental para cualquier tentativa de modelación hidrológica. Esta caracterización consiste en la deducción de curvas de gasto para las secciones de uno o varios cauces que se hayan establecido. Tal caracterización es llevada a cabo para estaciones virtuales de la misma manera en que son caracterizadas las estaciones in-situ obteniendo parámetros de carácter hidráulico (pendiente del fondo del cauce, profundidad del flujo cero, perfil longitudinal, coeficiente de Manning, entre otros), que hasta el momento, sólo podían ser deducidos a partir de mediciones directas en campo (León et al, 2008).

Un ejemplo, es la cuenca del río Negro (715.000 km²) sobre la cual se desarrolló una metodología para la caracterización hidráulica de diferentes secciones transversales y la estimación de la pendiente media del fondo en sus principales afluentes, mediante la utilización conjunta de datos altimétricos de las misiones Topex/Poseidón, Envisat y registros in-situ (León et al., 2006 a).

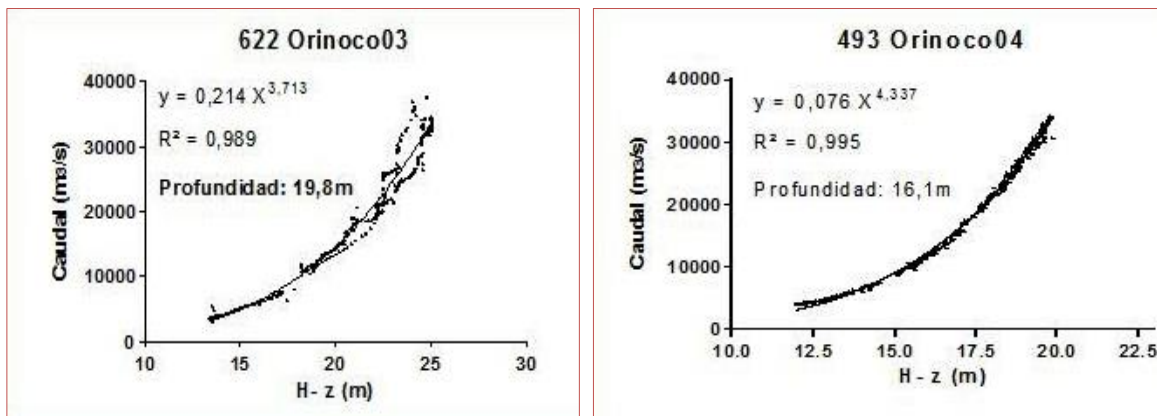
Dicha metodología permite poner en relación series temporales de niveles del agua registrados por el satélite y caudales medidos o estimados en las estaciones virtuales, lo que en otras palabras significa una estimación de curvas de gasto en esas estaciones virtuales, permitiendo la caracterización hidráulica de dichas estaciones, bajo el mismo esquema utilizado para la caracterización de las estaciones hidrométricas de las redes nacionales, como las del IDEAM.

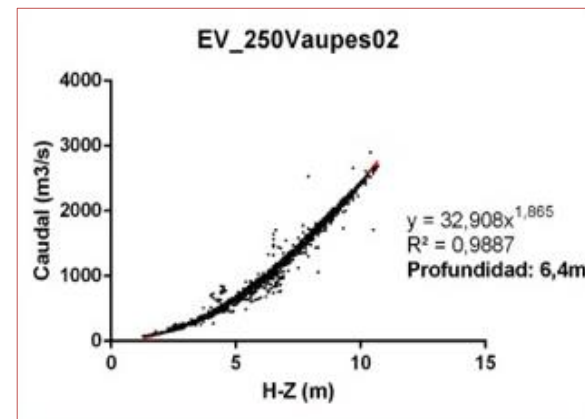
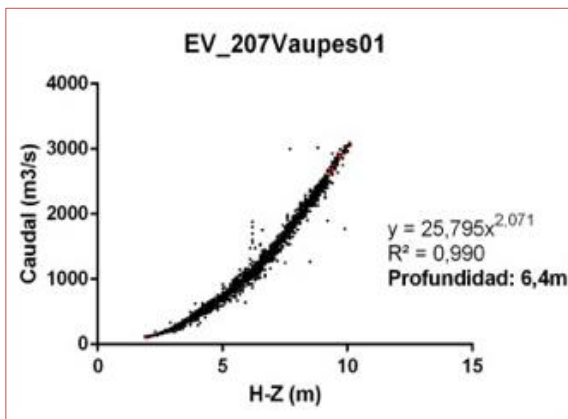
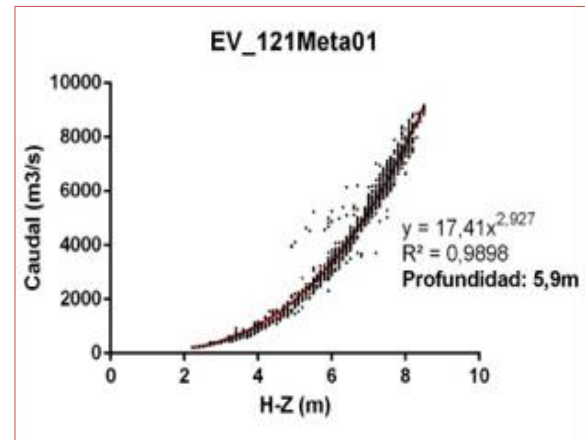
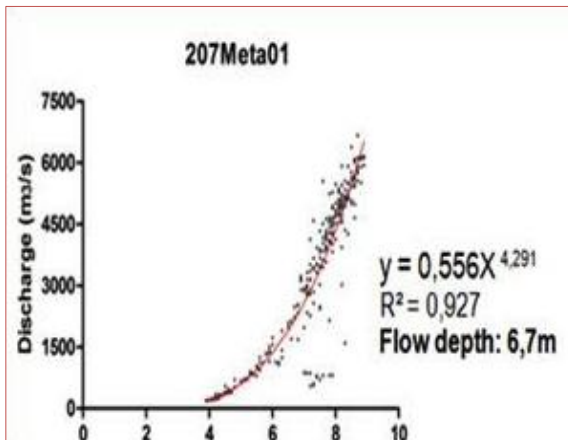
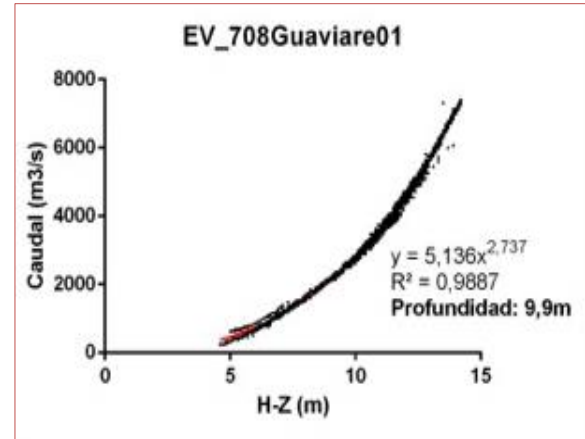
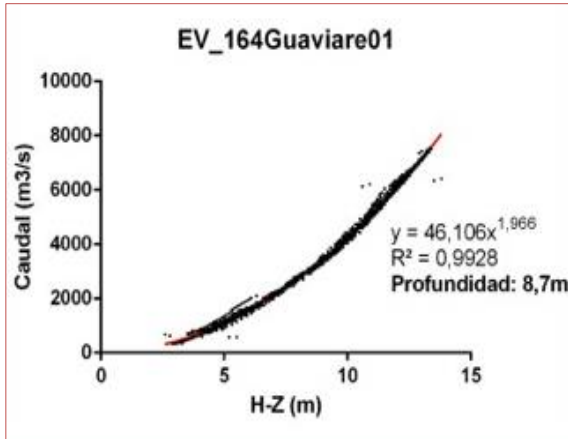
Para el caso específico de las cuencas del Amazonas y Orinoco, se lograron deducir 46 curvas de gasto, con profundidades de flujo en cada una de las estaciones virtuales definidas para sus principales cauces, obteniendo características geométricas e hidráulicas de las estaciones virtuales.

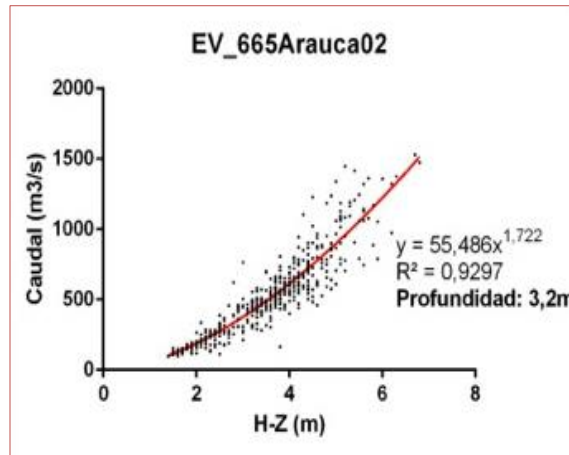
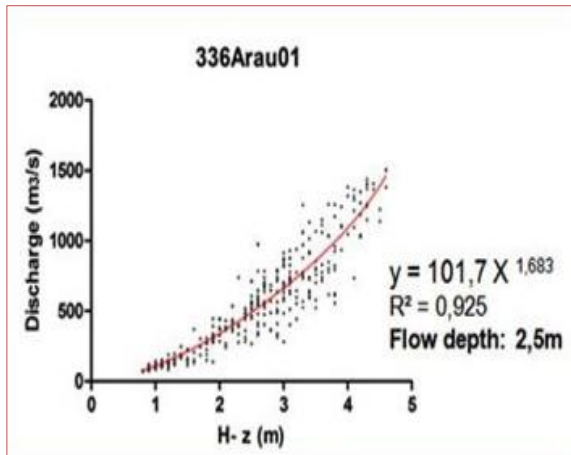
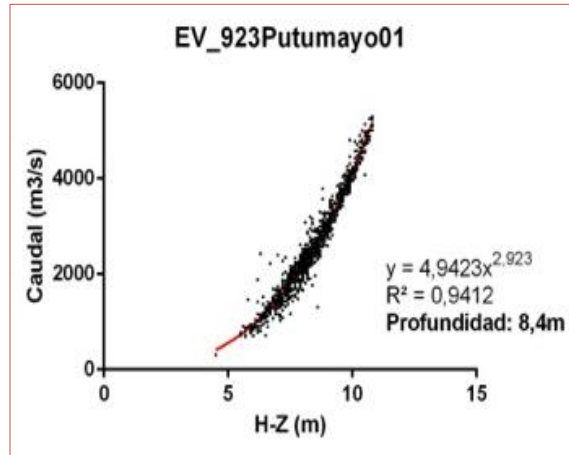
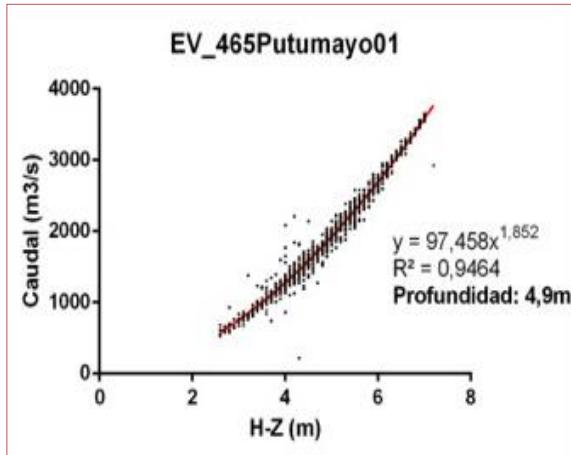
A continuación en la Figura 3-7 se presentan algunas curvas de gasto deducidas para 46 estaciones virtuales Envisat, en siete (7) cauces principales; cuatro (4) de la cuenca del Orinoco y tres (3) de la cuenca del Amazonas. En este caso se presenta dos curvas por cada cauce caracterizado (Orinoco, Meta, Arauca, Guaviare, Vaupés, Putumayo, Caquetá).

Al mismo tiempo se presentan las Ecuaciones que rigen dichas secciones. El número de curvas de gasto deducidas, depende del número de estaciones virtuales en las que haya sido posible estimar caudales.

Figura 3-7: Curvas de Gasto deducidas para los principales cauces de la Cuenca del Orinoco y el Amazonas. Fuente: Elaboración propia.







Con los resultados obtenidos en estas curvas de gasto, se duplica la información que se tiene de estos cauces, incluso proporciona información de secciones que se encuentran en puntos de difícil acceso y que no cuentan con información para ese periodo de tiempo.

Estimar un fondo equivalente del cauce con una precisión inferior al 20%, es bastante aceptable si se tiene en cuenta que los fondos equivalentes de los grandes cauces naturales medidos en campo, con complejas formas de sección transversal, presentan un RMSE cercanos a ± 7 m (León et al., 2006 a).

Los parámetros de la curva de calibración se estimaron a partir de la correlación entre las mediciones altimétricas de los niveles de agua y los caudales estimados a partir de la aplicación del modelo de Muskingum Cunge, optimizado para las estaciones virtuales en

las que fue posible obtener niveles diarios. Así mismo, es posible conocer algunas características de la sección, siendo posible estimar la profundidad del lecho del río, con base en las mediciones proporcionadas por la altimetría de radar.

A continuación en la Tabla 3-5 se relacionan las principales características hidráulicas (a, b, z, R² y la profundidad media) obtenidas en las curvas de calibración y estimadas para las estaciones virtuales de los principales cauces de la cuenca del Orinoco y el Amazonas.

En todas las estaciones, ninguna curva de calibración presenta coeficientes de correlación por debajo de 0,9, lo que establece un nivel de confiabilidad de la relación calibrada de las medidas altimétricas y los caudales estimados con el modelo de Muskingum Cunge. En caso de presentarse coeficientes de correlación menores a 0,9 se sugiere deducir nuevamente los caudales para la EV y depurar las medidas altimétricas, con el fin de obtener una mejor serie temporal para obtener una mejor relación entre estas variables.

Tabla 3-5: Características hidráulicas de las estaciones virtuales. Fuente: Elaboración propia.

Estaciones	a	b	z	R ²	N	P (m)
EV_665Arauca02	55,486	1,722	105,07	0,92	558	3,2
EV_665Arauca03	94,97	1,575	70,1	0,97	561	2,6
EV_336Arauca01	101,7	1,683	143,5	0,92	348	2,5
EV_121Meta01	17,411	2,927	335,3	0,98	1383	5,9
EV_794Meta01	600,04	2,30	343,8	0,98	1360	2,0
EV_207Meta01	0,556	4,291	698,8	0,92	332	6,7
EV_336Meta01	1,045	1,134	925,18	0,86	344	2,0
EV_121Guaviare01	17,411	2,927	0,9	0,93	2335	8,7
EV_164Guaviare01	46,106	1,966	107,5	0,99	2336	8,7
EV_708Guaviare01	5,13	2,73	103,57	0,98	2355	9,9
EV_250Guaviare01	4,51	2,054	593,8	0,87	147	14,8
EV_250Guaviare02	126,3	9,763	402,7	0,89	148	7,1
EV_250Guaviare03	11,35	2,379	413,3	0,80	151	7,1
EV_665Guaviare01	5,865	1,983	593,1	0,87	147	13,8
EV_207Vaupes01	25,79	2,071	81,28	0,99	2373	6,4
EV_250Caqueta01	46,106	1,966	3513	0,98	3784	9,1
EV_250Vaupes01	5,00	1,717	382,8	0,87	2336	4,1
EV_250Vaupes02	32,908	1,865	72	0,98	2264	6,4
EV_465Putumayo01	97,458	1,852	115,7	0,94	954	4,9
EV_708Caqueta01	638,16	1,479	371,6	0,99	2104	5,9
EV_751Caqueta01	525,06	1,482	752,3	0,96	2106	6,8
EV_837Caqueta01	327,52	1,525	354,05	0,90	2109	5,6
EV_837Caqueta02	595,23	1,318	296,5	0,91	2033	4,7
EV_880Putumayo01	4,08	3,084	250,130	0,91	957	8,0
EV_923Putumayo01	4,94	2,923	214,55	0,94	962	8,4
EV_923Putumayo02	0,037	4,297	206,84	0,94	956	13,4
EV_493Orinoco01	61,29	2,298	846,93	0,99	327	10,6
EV_493Orinoco04	0,076	4,337	870,38	0,99	336	16,1
EV_622Orinoco03	0,214	3,713	1947,3	0,98	355	19,8
EV_622Orinoco04	0,236	3,649	1781,3	0,99	352	20,3

Nota:

a y b : son los coeficientes deducidos de la curva de gasto

R²: es el coeficiente de correlación de la curva de gasto

Z: es la estimación del flujo cero a partir del elipsoide de referencia WGS84

N: número de datos utilizados para la curva de gasto

P: Profundidad de flujo promedio estimada para la sección transversal de la EV

Las estaciones que presentan el coeficiente b menor a 2, indica que las relaciones altura-caudal, son en su mayoría una sección de canal controlada en la estación virtual, lo que establece una buena correspondencia en la relación calibrada del área estudiada (control de canal). En las estaciones que se obtiene un valor de b mayor a 2, se establece que se tiene un control de sección. León et al. (2005), afirma que en estos casos es probable que se dichas estaciones se encuentren en zonas de confluencia, donde es posible que se presenten variaciones topográficas o físicas del cauce, como la pendiente, meandros bancos de arena. Los ríos que principalmente presentaron estos casos fueron Guaviare y Meta.

Con relación a los valores del coeficiente a , están fuertemente asociados con tres características: pendiente (s), coeficiente de rugosidad de Manning (n) y el ancho de la sección trasversal (W). Las variaciones de estos coeficientes dependen de la sección trasversal de cada una de las estaciones virtuales. Los valores altos fueron encontrados para estaciones ubicadas en los ríos Meta y Caquetá (Tabla 3-5).

Conocer dichas variables es muy valioso para la hidrología, gracias a esto es posible comprender la hidrodinámica de los principales ríos de la cuenca del Orinoco y el Amazonas. La propuesta metodológica desarrollada en estas dos grandes cuencas del país, proporciona información relevante para desarrollar futuras modelaciones, lo cual será un gran aporte desde la altimetría, ya que modelaciones como estas siempre se han visto afectadas por falta de datos in-situ.

3.7 Conclusiones

Esta investigación no solo densificó la información de las estaciones in-situ mediante estaciones virtuales, sino que también abrió paso a la caracterización hidráulica de dichas estaciones, obteniendo 54 relaciones calibradas altura-caudal a partir de medidas altimétricas y con mediciones in-situ. El método de M-C permitió propagar caudales a lo largo de varios cauces principales, especialmente en las estaciones virtuales, permitiendo obtener series de caudales desde el año 2002 hasta el año 2010 en algunos casos.

(En todas las secciones hidráulicas establecidas sobre las que se estimaron caudales, se encontró un promedio de error no superior al 1%, resultado con el cual se concluye que las predicciones del modelo de Muskingum optimizado aplicado para las cuencas del Orinoco y el Amazonas son óptimas, simulando con precisión la propagación dinámica de la onda. Esto, gracias a los estudios realizados por León (2005), quien desarrolló la mejor descripción posible de la teoría de onda de difusión propuesta por Ponce (1986) y explicó la obtención de los coeficientes C_i para aplicar en el modelo M-C, a partir de las mediciones in-situ y los datos altimétricos. Estos avances favorecieron la estimación de los

coeficientes con buena precisión y de forma independiente a las características de los cauces.

La metodología aplicada de Muskingum optimizado, propone una distribución uniforme en todas las secciones transversales, situación que en algunos casos no fue exactamente aplicada, dado que ríos como el Guaviare, se caracterizan por una amplia sinuosidad, por lo que las secciones transversales presentaban en algunos casos, meandros. Esta situación hace que el supuesto de distribución uniforme no sea válido. Sin embargo, este tipo de modelos se esperan optimizar aún más, con el lanzamiento de futuras misiones de mayor resolución, las cuales permitirán obtener los aportes laterales desde altimetría de radar, sin necesidad de recurrir a la entrada de datos in-situ. Estas contribuciones investigativas optimizarán cada vez más la labor de las redes hidrométricas, principalmente en cuencas que se encuentran poco instrumentadas.

En algunas secciones, el caudal de los aportes tributarios pueden cambiar de manera considerable, lo que amplía la variación de caudales entre la sección aguas arriba y aguas abajo, llevando a estimaciones de caudales que pueden ser subestimadas o sobrestimadas. No obstante, el modelo presentó óptimos resultados en función del cálculo del error, lo cual significa que esta metodología se adapta muy bien a secciones no superiores a 300 kilómetros, aunque presenten algunas variaciones.

Gracias a la aplicación de este modelo de propagación y a la altimetría de radar, es posible establecer parámetros físicos de la sección, como la pendiente del cauce entre dos estaciones in-situ, mediante la obtención de curvas de calibración (relación entre medida altimétrica y caudales).

La obtención de las curvas de calibración es en particular interesante, debido a que es posible determinar o estimar el caudal aproximado de un cauce principal, con base en medidas altimétricas tomadas cada 10 o 35 días, pudiendo derivar información en un tiempo más corto que las redes hidrométricas in-situ. Inclusive, se podrían llegar a relevar las estaciones in-situ en caso de falla o proporcionar datos en lugares con escasos o nula información hidrológica.

La curva de gasto proporciona información de una profundidad estimada del cauce y medidas sobre las características de la sección como: el coeficiente de manning. Cabe resaltar, que a partir de allí es posible integrar las medidas de las estaciones virtuales a lo largo del río y estimar la pendiente del cauce. Por tanto, estos resultados realzan varios de los múltiples beneficios de la hidrología espacial, en grandes cauces del medio continental.

Los valores de altura-caudal, son pares de datos equipados por una curva de calibración que establece un RMSE mínimo, lo que permite tener confiabilidad en la calibración y correspondencia de los datos. Sin embargo, sería ideal llevar a cabo en futuros trabajos

una validación de las profundidades estimadas con la curva de calibración y los resultados de las profundidades medidas mediante trabajos de campo, con el objetivo de validar esta información y la de otros parámetros hidráulicos, como el coeficiente de manning, ancho de sección y pendiente.

Las cuencas del Orinoco y el Amazonas colombiano son muy extensas, presentan una red hidrográfica muy densa y dinámica), donde numerosos cauces necesitan ser monitoreados, lo cual se convierte en una labor colosal para los administradores de la red hidrométrica nacional, principalmente si se considera que se trata de regiones poco pobladas, de difícil acceso por las condiciones selváticas e inundables. Lo anterior hace necesario la búsqueda de alternativas como la altimetría de radar para (articularlas con las múltiples ventajas de la información hidrométrica in-situ.

En efecto, a través de la información obtenida por altimetría de radar, fue posible conocer datos como la ubicación del cauce, la distancia de la sección establecida, el ancho, los niveles e, inclusive, se lograron obtener caudales y pendientes, en algunas de las estaciones definidas. Mediante esta caracterización hidráulica fue posible obtener parámetros físicos que son importantes para llevar a cabo modelaciones hidrológicas, que son difíciles de soportar con trabajo de campo. El nivel de confiabilidad del método, permitió comprobar que la altimetría de radar por satélite puede ser considerada como una alternativa para llevar a cabo un riguroso monitoreo hidrológico del país.

El método de minimización del RMSE, facilitó la estimación de la pendiente para varios cauces principales, teniendo en cuenta la medida de la superficie libre con altimetría de radar y la profundidad del agua estimada con la curva de calibración. Aunque se puede afirmar que los resultados preliminares del estudio presentan una confiabilidad del 95%, sería ideal desarrollar un trabajo de campo para validar la metodología, conociendo la profundidad real de los cauces y calculando el margen de error de ambas medidas.

Este trabajo pone de manifiesto una aplicación muy prometedora de la ARS sobre los cauces al interior de las grandes cuencas, donde la geometría y los caudales son irregulares, muy variables y dinámicos. La estimación de la relación altura-caudal en las estaciones virtuales, presenta una buena precisión ($R = >0,9$), lo cual abre un nuevo campo para la hidrología espacial, con una aplicación que puede complementar y eventualmente sustituir una estación hidrométrica in-situ.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

La puesta en marcha de esta investigación hizo posible el desarrollo del proyecto “Consolidación de un sistema de monitoreo hidrológico sobre la cuenca del Orinoco mediante la aplicación de altimetría de radar por satélite y registros hidrométricos in-situ - HIDRORINOCO II”, durante el periodo de ejecución 2012-2013. En este sentido, la metodología y resultados (empleados) descritos corresponden en gran parte al trabajo realizado en la cuenca hidrográfica del Orinoco y del Amazonas Colombiano mediante la aplicación de la Altimetría de Radar por satélite (ARS).

Esta investigación posibilitó el avance de la aplicación de la ARS en dos grandes cuencas colombianas, contribuyendo en la búsqueda de alternativas para la densificación de redes de monitoreo hidrológico a través de la implementación de estaciones virtuales. Con ello, se favoreció el complemento de datos faltantes en estaciones in-situ.

Asimismo, se definió y se puso en marcha una red de monitoreo hidrológico virtual, a partir de datos Envisat y Jason 2, sobre los principales cauces de las cuencas del Orinoco y el Amazonas Colombiano: Arauca, Guaviare, Vichada, Casanare, Inírida, Meta, Orinoco, Vaupés, Caquetá, Putumayo y Amazonas. Esta investigación, se apoyó sobre los desarrollos metodológicos hechos por varios autores como Frappart et al, (2006); Calmant & Seyler (2006); Roux et al. (2008); Seyler et al. (2009) ; Silva et al. (2011); Roux et al. (2010); Geiterana et al. (2010), León et al. (2006); León et al. (2009) y León et al. (2011). Conceptualmente, se basó en la definición de estaciones virtuales, extracción de series temporales, estimación de caudales medios diarios; complemento de datos faltantes en estaciones in-situ y caracterización hidráulica de estaciones virtuales.

Con la realización de este proyecto de investigación, se espera llevar a cabo dos publicaciones, con el fin de dar a conocer el aporte de la altimetría de radar al monitoreo hidrológico en el suroriente de Colombia, así como proporcionar un análisis hidrológico en grandes cuencas, que sirva de línea base para la gestión del recurso hídrico en Colombia, principalmente en esta región que ha sido por muchos excluida de la gestión ambiental y comunitaria.

En relación con las misiones altimétricas, estas han mejorado cada vez más para el medio continental, a pesar de que inicialmente fueron concebidas para el medio oceánico, demostrando precisiones importantes en medición de niveles y en la estimación de caudales.

El estudio de la morfología de un río y el desarrollo de modelos hidrodinámicos, requieren una referencia común en las mediciones in situ de las diferentes estaciones, criterio que generalmente es desconocido para las personas que hacen uso de estos datos. Esta información, ahora es posible conocerla gracias a las curvas de calibración estimadas por altimetría de radar.

Este estudio muestra como gracias a la definición de estaciones virtuales sobre los diferentes cauces que integran las cuencas del Orinoco y Amazonas, es posible densificar el número de puntos de control para el monitoreo de la variación de los niveles de agua, consolidando una red de monitoreo hidrológico de mayor cobertura para esta región.

A nivel metodológico, se consolidó un procedimiento para la extracción de datos altimétricos, definición de estaciones virtuales, extracción de series temporales, validación de datos altimétricos e in-situ, complemento de datos faltantes, interpolación de series temporales, estimación de caudales y deducción de curvas de gasto, como un conjunto de información que puede ser aplicable a otras grandes cuencas.

Una limitante del proceso de validación y caracterización hidráulica de estaciones virtuales, es la deficiente disponibilidad de información hidrométrica in-situ, la cual ha limitado el proceso de caracterizar y validar más estaciones. Sin embargo, con los resultados obtenidos, esto no es un impedimento para monitorear el comportamiento de hidrológico de la zona de estudio.

Gracias a este trabajo, se optimiza la red hidrométrica para las cuencas del Orinoco y Amazonas Colombiano, aportando una mayor cobertura espacial altimétrica, disponibilidad de información actualizada y complemento de datos faltantes in-situ, lo cual facilita el conocimiento de las variaciones de algunos cauces, en tanto se trata de una información que hasta el momento no se tenía.

Por último, no cabe duda que la consolidación de esta información, al ser tratada en una base de datos, podría constituir un aporte importante para la consolidación de una línea base, con lo cual se contribuiría no solo a la comunidad científica que realiza modelos hidrológicos, sino que también, pondría a disposición de las comunidades una información hídrica que, en efecto, sirva como una herramienta de ordenamiento y planificación estratégica para la gestión integrada del recurso hídrico en el país.

4.2 Recomendaciones

Es importante que en la medida de lo posible, los resultados obtenidos para curvas de gasto, sean validados con trabajo de campo, mediante la realización de aforos con sonda ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), como complemento a los registros tomados in situ y a los datos obtenidos a través de la definición de estaciones virtuales. El ADCP posibilitaría la generación de perfiles transversales de cada estación virtual, así como la validación de las profundidades estimadas con las curvas de gasto.

Este trabajo contribuirá al fortalecimiento de una base de datos, en tanto se gestione de manera integral la información hidrométrica obtenida para caudales y curvas de gasto, estimada sobre los principales cauces de las cuencas objeto de estudio.

En función de los resultados obtenidos, es necesario plantear ajustes metodológicos, recurriendo a la información producida por misiones satelitales más actualizadas y puestas a prueba en investigaciones de este tipo sobre otras cuencas del país. En todo caso, debe considerarse la escasa disponibilidad de información in-situ del IDEAM y la poca resolución para ríos con anchos menores a 100 metros.

Se recomienda llevar a cabo un proceso de nivelación de estaciones, lo cual permitirá obtener pendientes de los cauces con estaciones in-situ. Este proceso, consiste en llevar los ceros relativos de las reglas que conforman las estaciones in-situ, a ceros absolutos referenciados sobre el mismo sistema de las estaciones virtuales del geoide continental. Es importante recordar que el geoide es una línea equipotencial al plano terrestre tangente a la gravedad. A partir de los niveles obtenidos por altimetría de radar y de los datos in-situ, se procede a aplicar un modelo que proporciona una altitud de la superficie libre del río estudiado con el geoide como nivel de referencia.

Diferentes estudios presentados por Cauhope (2004) y Calmant (2012), proponen métodos de nivelación de estaciones virtuales a partir de datos altimétricos. En consecuencia, se recomienda posteriormente aplicar estos tratamientos metodológicos para las cuencas del Amazonas y el Orinoco.

Se recomienda mejorar la adquisición de datos in-situ, debido a que el proceso de compra, acceso y disponibilidad de información es complejo, lo que hace difícil y costosa la tarea. Por tanto, es indispensable mejorar los canales de comunicación interinstitucional con el IDEAM y con las demás entidades públicas e investigativas que tengan relación o actúen el área de influencia.

Es clave llevar a cabo validaciones in-situ de los resultados logrados, preferiblemente con la ayuda de mediciones de caudal con sonda ADCP, en tanto se facilita la comparación de los perfiles obtenidos con la sonda y los valores logrados a partir de la aplicación del

modelo. Con la implementación de una herramienta de este tipo en trabajo de campo, se podrían conocer y validar los coeficientes a y b , obtenidos con la metodología propuesta en esta investigación, ya que estos parámetros hacen referencia a la geometría de la sección.

5. Bibliografía

- Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data (AVISO). (2009). *User Handbook. Merged TOPEX/Poseidon Products (GDR-Ms)* (3a ed.) AVI-NT-02-101-CN. Toulouse. Recuperado el 15 de 02 de 2013. Disponiblen en : <http://www.aviso.oceanobs.com/en/missions.html>
- Barry, D. A., & Bajracharya, K. (1995). On the Muskingum-Cunge flood routing method. *Environment international*, 21(5), 485-490.
- Berry, P.A.M., Freeman, J.A., Smith, R.G.& Benveniste, J. (2007). Near Real Time Global Lake and River Monitoring using the Envisat RA-2. *Envisat Symposium 2007. ESA Pub. SP-636 2007*.
- BBC. (13 de Mayo de 2008). *Amazon Special*. Recuperado el 26 de 02 de 2013, de BBC Mundo: http://www.bbc.co.uk/spanish/specials/1330_amazon/page4.shtml Disponible en:
- Benveniste, J.,) Berry, P.A., Freeman, J.A., Smith, R. (2007). Envisat measuring global rivers and lakes level in near real time. *Geophysical Research Abstracts* (9).
- Benveniste, J., Berry, P., Milagro-Perez, M.P. & Serpe, D. (2008).River and Lake Level data from Radar Altimetry in Support of the Tiger Initiative. *European Space Agency*, 3, 1.
- Birkett, C. M. (1995). The contribution of TOPEX/POSEIDON to the global monitoring of climatically sensitive lakes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C12), 25179-25204.
- Birkett, C., Murtugudde, R., & Allan, T. (1998). Indian Ocean climate event brings floods to East Africa's lakes and the Sudd Marsh. *Geophysical Research Letters*, 26(8), 1031-1034.
- Birkett, C. M., Mertes, L. A. K., Dunne, T., Costa, M. H., & Jasinski, M. J. (2002). Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20).
- Birkhead, A. L., & James, C. S. (1998). Synthesis of rating curves from local stage and remote discharge monitoring using nonlinear Muskingum routing. *Journal of Hydrology*, 205(1), 52-65.

- Bolado Penagos, M. (2011). *Validación de datos altimétricos en la Bahía de Algeciras y Estrecho de Gibraltar* (p.43). Tesis de Maestría, Universidad de Cádiz.
- Bonnet, M. P., Barroux, G., Martinez, J. M., Seyler, F., Moreira-Turcq, P., Cochonneau, G., ... & Roux, E. (2008). Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuaí). *Journal of Hydrology*, 349(1), 18-30.
- Boroughs, C., & Zagona, E. (2002, July). Daily flow routing with the Muskingum-Cunge method in the Pecos River RiverWare model. In *Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, NV*.
- Brooks, R. L. (1982). Lake elevation from satellite radar altimetry from a validation area in Canada. *Reporte, Geosci. Res.* pp. 44-53.
- Calmant, S., & Seyler, F. (2006). Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(14), 1113-1122.
- Calmant, S., Seyler, F., & Cretaux, J. F. (2008). Monitoring continental surface waters by satellite altimetry. *Surveys in geophysics*, 29(4-5), 247-269.
- Calmant, S., da Silva, J. S., Moreira, D. M., Seyler, F., Shum, C. K., Crétaux, J. F., & Gabalda, G. (2013). Detection of Envisat RA2/ICE-1 retracked radar altimetry bias over the Amazon basin rivers using GPS. *Advances in Space Research*, 51(8), 1551-1564.
- Cauhope, M. (2004). *Hauteur d'eau d'une plaine d'inondation amazonienne par altimétrie spatiale*. Tesis de Maestría, Université Paul Sabatier. Toulouse.
- Cazenave, A., Bonnefond, P., Dominh, K., & Schaeffer, P. (1997). Caspian sea level from Topex-Poseidon altimetry: Level now falling. *Geophysical Research Letters*, 24(8), 881-884.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill. New York.
- Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère (CTOH). (1997-2013). Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales. Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Observatoire Midi-Pyrénées (OMP), Pôle Océan-Altitude-Climat (COP). Recuperado el 12 de 02 de 2013. Disponible en: <http://ctoh.legos.obs-mip.fr/altimetry>
- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). (2010). De l'altitude à la hauteur. Disponible en: <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/452-de-laltitude-a-la-hauteur.php>
- Cochonneau, G. & Calmant, S. *VALS Logiciel de définition de stations altimétriques virtuelles*. Comunicación del autor. 2009 & 2011.

- Contraloría General de la República. (CGR). (2007). *Informe del Estado actual de los recursos Naturales. Informe sobre el Estado de los recursos Naturales y del ambiente 2007 – 2008*. Bogotá: Autor. ISSN 1794-5356
- Correa, H. D., Ruiz, S. L., & Arévalo, L. M. (2006). Plan de acción en biodiversidad de la cuenca del Orinoco-Colombia/2005-2015-Propuesta Técnica. Bogotá DC Corporinoquia, Cormacarena, IAvH, Unitrópico, Fundación Omacha, Fundación Horizonte Verde, Universidad Javeriana, Unillanos, WWF-Colombia, GTZ-Colombia, Bogotá, Colombia.
- Craig, B., Boroughs, P. & Zagona, E. (2002). *Daily flow routing with the Muskingum-Cunge method in the Pecos River Riverware model*. Tetra Tech, Inc. Breckenridge, CO. Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems. University of Colorado.
- Crétaux, J. F., & Birkett, C. (2006). Lake studies from satellite radar altimetry. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(14), 1098-1112.
- Cunge, J. A. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205-230.
- Da Silva J.S. (2010). *Application de l'altimetrie spatiale a l'etude des processus hydrologiques dans les zones humides du bassin amazonien*. (p. 279) Tesis de doctorado, Université Paul Sabatier. Toulouse & UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Da Silva, J. S., Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O. C., Cochonneau, G., & Mansur, W. J. (2010). Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), 2160-2181.
- De Oliveira Campos, I., Mercier, F., Maheu, C., Cochonneau, G., Kosuth, P., Blitzkow, D., & Cazenave, A. (2001). Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon basin. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 333(10), 633-643.
- European Space Agency. (ESA). (2007). *River & Lake*, (Online). Recuperado el 13 de 02 de Producto Handbook ENVISAT. MWR Products User Guide 2.2. Disponible en : <http://www.esa.int/> o <http://earth.esa.int/riverandlake>
- Espinoza Villar, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., ... & Vauchel, P. (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29(11), 1574-1594.

- Espinoza Villar J.C., Ronchail J., Lavado Casimiro W.S., Carranza Valle J.L., Cochonneau G., De Oliveira E., Pombosa Loza R., Vauchel P., Guyot J.L. (2010). Variabilidad espacio-temporal de las lluvias en la cuenca amazonica y su relacion con la variabilidad hidrológica regional. Un enfoque particular sobre la región andina. *Revista Peruana Geo-Atmosferica*, 2: 99-130.
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Junquas, C., Vauchel, P., Lavado, W., ... & Pombosa, R. (2011). Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, 38(13).
- Frappart, F., Seyler, F., Martinez, J. M., Leon, J. G., & Cazenave, A. (2005). Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. *Remote Sensing of Environment*, 99(4), 387-399.
- Frappart F. (2006). *Développement d'outils méthodologiques pour l'utilisation de la télédétection spatiale sur les grands bassins fluviaux* (p.337). Tesis de Doctorado. Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Frappart, F., Papa, F., Güntner, A., Werth, S., Da Silva, J. S., Tomasella, J., ... & Bonnet, M. P. (2011). Satellite-based estimates of groundwater storage variations in large drainage basins with extensive floodplains. *Remote Sensing of Environment*, 115(6), 1588-1594.
- García, M., Sánchez, F., Marín, R., Guzmán, H., Verdugo, N., Domínguez, E., y otros. (2001). El medio ambiente en Colombia. El Agua. Capítulo 4. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.
- Getirana, A. C. V., Bonnet, M. P., Rotunno Filho, O. C., Collischonn, W., Guyot, J. L., Seyler, F., & Mansur, W. J. (2010). Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. *Hydrological processes*, 24(22), 3219-3236.
- González, J. C. A., Nuñez-Avellaneda, M., Córdoba, E. A., López, L. F. R., & Páez, C. L. S. (2006). Ecosistemas acuáticos de la Amazonia Colombiana: Avances y perspectivas. *Revista Colombia Amazónica*, 1-18.
- Google Earth, (2012). Extremo Norte de América del Sur. Cuencas Amazonas y Orinoco, Colombia. Digital Globe.
- Guyot, J. L., Bazan, H., Fraizy, P., Ordonez, J. J., Armijos, E., & Laraque, A. (2007). Suspended sediment yields in the Amazon basin of Peru: a first estimation. *IAHS PUBLICATION*, 314, 3-10. Scientific Assembly. HS2005 - Water quality and sediment behaviour of the future: Predictions for the 21st Century (Webb B.W. et De Boer D., Eds.), Perugia (Italia).

- Guyot, J. L., & Walling, D. E. (2009). Flow and sediment dynamics of large rivers. *Hydrological Processes*, 23(22), 3127-3130.
- Hall, A. C., Schumann, G. J. P., Bamber, J. L., & Bates, P. D. (2011). Tracking water level changes of the Amazon Basin with space-borne remote sensing and integration with large scale hydrodynamic modelling: A review. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(7), 223-231.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (IPCC). (2007). *Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. Ginebra. 104 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM). (2004). Guía Técnico Científica para la Ordenación y Manejo de Cuencas en Colombia. Decreto 1729 de 2002. Bogota. 100 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2007). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua*. Bogotá. ISBN 978-958-8067-23-0. 162 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (IDEAM). (2012). *Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM*. (en línea). Bogotá. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>.
- Johnson, D. and Miller, A. (1997). A spatially distributed hydrologic model utilizing raster data structures. *Computers and Geosciences*. 23 (3): 267-272.
- Kouraev, A. V., Semovski, S. V., Shimaraev, M. N., Mognard, N. M., Légresy, B., & Remy, F. (2007). Observations of Lake Baikal ice from satellite altimetry and radiometry. *Remote Sensing of Environment*, 108(3), 240-253.
- Kouraev, A. V., Kostianoy, A. G., & Lebedev, S. A. (2009). Ice cover and sea level of the Aral Sea from satellite altimetry and radiometry (1992–2006). *Journal of Marine systems*, 76(3), 272-286.
- Kshirsagar, M.M., Rajagopalan, B., & Lal, U. (1995). Optimal parameter estimation for Muskingum routing with ungauged lateral inflow. *Journal of Hydrology*, 169(1), 25-35.
- Labat, D., Ronchail, J., & Guyot, J. L. (2005). Recent advances in wavelet analyses: Part 2—Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability. *Journal of Hydrology*, 314(1), 289-311.
- Laraque, A., Moquet, J. S., Alkattan, R., Steiger, J., Mora, A., Adèle, G., ... & Rodriguez, M. (2013). Seasonal variability of total dissolved fluxes and origin of major dissolved elements within a large tropical river: the Orinoco, Venezuela. *Journal of South American Earth Sciences*, 44, 4-17.

- León Hernandez J.G. (2005). *Regionalisation du debit dans le bassin du Rio Negro (Amazonie Bresilienne) par utilisation conjointe de l'altimetrie spatiale et de la mesure in-situ.* (p.206) Tesis Doctoral. Université Paul Sabatier. Toulouse
- León, J. G. (2006). *Utilisation conjointe de l'altimétrie spatiale et de la mesure in-situ pour la régionalisation du débit dans le Bassin Versant du Rio Negro.* Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- León Hernandez J.G., Calmant S., Seyler F., Bonnet M.P., Cauhopé M., Frappart F., Filizola N.P. (2006 a) Rating curves and estimation of average water depth at the Upper Negro River based on satellite altimeter data and modelled discharges. *Journal of Hydrology*, 328(3-4): 481-496.
- León Hernandez J.G., Seyler F., Calmant S., Bonnet M.P., Cauhope M. (2006b). Hydrological parameter estimation for ungauged basin based on satellite altimeter data and discharge modeling. A simulation for the Caqueta River (Amazonian Basin, Colombia). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3:3023-3059.
- León Hernández J.G., Rubiano, J; Domínguez Duque Nivia G. (2009). Avances más recientes sobre la aplicación de la altimetría radar por satélite en hidrología. Caso Particular de la Cuenca Amazónica Colombiana y Brasileira. *Revista Ingeniería e Investigación*, 28(3): 126-131.
- León Hernández J.G., Rubiano Mejía J., Vargas V. (2009). Series temporales de niveles de agua en estaciones virtuales de la Cuenca Amazónica a partir de altimetría radar por satélite. *Revista Ingeniería e Investigación*, 29(1): 109-114.
- León, J.G., Syler, F., Puerta, A.L. (2011). Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales ENVISAT sobre el cauce principal del rio orinoco. *Revista de Ingeniería e investigación*. vol. 31 no. 3, (91-99).
- Maheu, C., Cazenave, A., & Mechoso, C. R. (2003). Water level fluctuations in the Plata basin (South America) from Topex/Poseidon satellite altimetry. *Geophysical Research Letters*, 30(3), 1143– 1146.
- Merkel, W. (1999). Muskingum-Cunge Flood routing procedure in NRCS Hydrologic Models. USDA NRCS, *National Water and Climate Center*, Beltsville.
- Moreira D.M. (2011). *Rede de referencia altimetrica para avaliacao da altimetria por satelites e para estudos hidrológicos na regio amazonica.* Tesis de doctorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Mercier, F. (2002). *Altimétrie spatiale sur les eaux continentales : apport des missions Topex/Poseidon et ERS1&2 à l'étude des lacs, mers intérieures et bassins fluviaux.*(p.190). Tesis doctoral. Université Paul Sabatier. Toulouse.

- Mercier, F., Picot, N., Lambin, J., Lombard, A., Dibarboure, G., Dufau, C., ... & Ablain, M. (2008, December). Improved Jason-2 altimetry products for coastal zones and continental waters (PISTACH Project). In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 1, p. 0662).
- Mojica, J. I., Galvis, G., Arbeláez, F., Santos, M., Vejarano, S., Prieto-Piraquive, E., ... & Duque, S. R. (2005). Peces de la cuenca del río Amazonas en Colombia: Región de Leticia. *Biota Colombiana*, 6(2), 191-210.
- Morris, C.S. Gill, S.K.(1994a). *Variation of great lakes waters from Geosat altimetry. Water Resour. Res.* Vol. 30. pp. 1009-1017.
- Morris C.S., Gill, S.K. (1994b). Evaluation of the Topex/Poseidon altimeter system over the great Lakes. *J. Geophys. Res.* 99. pp. 24527-24539.
- National Aeronautics and Space Administration. (NASA). (2004). *GRACE. Gravity Recovery and Climate Experiment*. Recuperado el 20 de 02 de 2013, de The University of Texas. Disponible en: http://www.csr.utexas.edu/grace/gravity/gravity_definition.html
- Navarro, C.E., León, J.G., Seyler, F., Calmant, S. (2009). *Creación de una base de datos para registros hidrométricos de EV sobre grandes cauces y lagos de Colombia a partir de medidas de altimetría radar ENVISAT*. Tesis de Pregrado. Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira.
- Organización Meteorológica Mundial. (OMM). (2011). *Informe: Del conocimiento climático a la acción. Marco Mundial para los servicios climáticos - Potenciar la capacidad de los más vulnerables*. Ginebra.
- Ponchaut, F., & Cazenave, A. (1998). Continental lake level variations from Topex/Poseidon (1993–1996). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 326(1), 13-20.
- Ponce, V. M., Lohani, A. K., & Scheyhing, C. (1996). Analytical verification of Muskingum-Cunge routing. *Journal of hydrology*, 174(3), 235-241.
- Pimentel, E., & Hamza, V. (2012). Indications of regional scale groundwater flows in the Amazon Basins: Inferences from results of geothermal studies. *Journal of South American Earth Sciences* 37 (2012) 214e227, 214-227.
- Rantz, S. E. (1982). *Measurement and computation of streamflow: Volume 1, Measurement of stage and discharge* (No. 2175). USGPO.
- Ressources Naturelles Canada. (RNcan). (29 de 01 de 2008). *Notions fondamentales de télédétection. Centro Canadiense de Percepción Remota*. . Recuperado el 07 de 03

- de 2012 Disponible en: <http://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/limite-geographique/teledetection/fondements/1593>
- Roemer, S., Legresy, B., Horwath, M., & Dietrich, R. (2007). Refined analysis of radar altimetry data applied to the region of the subglacial Lake Ostok/Antarctica. *Remote sensing of environment*, 106(3), 269-284.
- Romero, F. (2006). La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, 24, 13-41.
- Roux, E., Cauhpe, M., Bonnet, M. P., Calmant, S., Vauchel, P., & Seyler, F. (2008). Daily water stage estimated from satellite altimetric data for large river basin monitoring/Estimation de hauteurs d'eau journalières a partir de données d'altimétrie radar pour la surveillance des grands bassins fluviaux. *Hydrological sciences journal*, 53(1), 81-99.
- Roux, E., Santos da Silva, J., Cesar Vieira Getirana, A., Bonnet, M. P., Calmant, S., Martinez, J. M., & Seyler, F. (2010). Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry—a comparative study. *Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques*, 55(1), 104-120.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú . (SENAMHI). (2007). Escenarios de cambio climático en la Cuenca de los ríos Mantaro y Urabamba para el año 2010; Proyecto regional Andino de adaptación- PRAA. Autores Rosas G., Avalos G., Díaz A., Oria, C. Acuna D., Metzger L. y Miguel R. Eds.
- Seyler F. (2007). CASH : Contribution de l'Altimétrie Spatiale pour l'Hydrologie. Le réseau Terre et Espace : synthèse des projets finances. Madon N., Ed., *I-Space-Prospace*: 23-27.
- Seyler F., Calmant S., Da Silva J.S., Filizola N.P., Cochonneau G., Bonnet M.P., Costi A.C.Z. (2008). Inundation risk in large tropical basins and potential survey from radar altimetry: example in the Amazon basin. *Marine Geodesy*, 32(3): 303-319.
- Seyler, F., Calmant, S., Silva, J. D., Leon, J. G., Frappart, F., Bonnet, M. P., ... & Oliveira, E. D. (2009). New perspectives in monitoring water resources in large tropical transboundary basins based on satellite imagery and radar altimetry. In *Improving integrated surface and groundwater resources management in a vulnerable and changing world. Proceedings Symposium JS. 3 at the Joint Convention of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) and the International Association of Hydrogeologists (IAH) held in Hyderabad, India, 6-12 September 2009*. (pp. 282-288). IAHS Press.
- Seyler, F., Calmant, S., da Silva, J. S., Moreira, D. M., Mercier, F., & Shum, C. K. (2013). From TOPEX/Poseidon to Jason-2/OSTM in the Amazon basin. *Advances in Space Research*, 51(8), 1542-1550.

- Sevilla , R. (1997). Uso de la Biodiversidad y derechos de la propiedad genética. *Biodiversidad Desarrollo de la Amazonia en una economía de mercado. Universidad Nacional Agraria La Molina* .
- Schmidt, R., Schwintzer, P., Flechtner, F., Reigber, C., Gunther, a., Doll, P., y otros. (2006). GRACE observations of changes in continentalwater storage. *global and Planetary Change*, 50-112.
- Singh, V. P. (1992). *Elementary hydrology*. Pearson College Division.
- Silva León, G. (2005). La cuenca del río Orinoco: visión hidrográfica y balance hídrico. *Revista Geografica Venezolana*, 46(1), 75-108
- Sistema de Información Ambiental de Colombia SIAC. (2002). *Perfil del Estado de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente en Colombia 2001*. Bogotá, Colombia: Sistema de Información ambiental de Colombia. Tomo III.
- Swenson, S., & Wahr, J. (2009). Monitoring the water balance of Lake Victoria, East Africa, from space. *Journal of Hydrology*, 370(1), 163-176.
- Vargas Franco, Viviana. (Ed). (2007, julio). *Estadística descriptiva para ingeniería ambiental con SPSS*(21a. ed., p.312). Facultad de Ingeniería y Administración. Palmira: Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. ISBN: 978-958-33-9319-3.
- Viers, J., Barroux, G., Pinelli, M., Seyler, P., Oliva, P., Dupré, B., & Boaventura, G. R. (2005). The influence of the Amazonian floodplain ecosystems on the trace element dynamics of the Amazon River mainstem (Brazil). *Science of the total environment*, 339(1), 219-232.
- Zhang, M., Lee, H., Shum, C. K., Alsdorf, D., Schwartz, F., Tseng, K. H., ... & Calmant, S. (2010). Application of retracked satellite altimetry for inland hydrologic studies. *International Journal of Remote Sensing*, 31(14), 3913-3929.