

Geología y geomorfología de ríos tropicales de Colombia

Conocer los ríos
previene desastres

Germán Vargas Cuervo

IGAC
INSTITUTO GEOGRÁFICO
AGUSTÍN CODAZZI



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



NOTA IMPORTANTE

Con la compra de este libro,
usted apoya a todas las personas involucradas en su
desarrollo y elaboración y, en conjunto, a todo el equipo del
Centro Editorial de la Facultad de Ciencias Humanas de la
Universidad Nacional de Colombia.

Recordamos que no está permitida la reproducción total o
parcial de cualquier parte de la obra, ni su transmisión de
ninguna forma o medio, ya sea electrónico,
mecánico, fotocopia u otro medio.



GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DE RÍOS TROPICALES DE COLOMBIA
CONOCER LOS RÍOS PREVIENE DESASTRES

© Colección imagoMUNDI

© 2025, Universidad Nacional de Colombia
Sede Bogotá, Facultad de Ciencias Humanas
Primera edición

© 2025, Instituto Geográfico Agustín Codazzi
Dirección de Investigación y Prospectiva

© Germán Vargas Cuervo

ISBN impreso: 978-958-505-850-7
ISBN digital: 978-958-505-851-4

COMITÉ EDITORIAL

FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS

Nohra León Rodríguez

Decana

Maria Consuelo De Vengoechea Rodríguez

Vicedecana Académica

José Daniel Pabón Caicedo

Vicedecano de Investigación y Extensión

Véronique Claudine Flori Bellanger

Representante de las Revistas Académicas

Laura de la Rosa Solano

Directora del CES

María Inés Barreto Romero

Representante de las Unidades Académicas Básicas

editorial_fch@unal.edu.co

www.humanas.unal.edu.co

Prohibida la reproducción total o parcial por
cualquier medio, sin la autorización escrita
del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso en Bogotá por XPress Estudio Gráfico y Digital
2025

PREPARACIÓN EDITORIAL

CENTRO EDITORIAL

FACULTAD DE CIENCIAS HUMANAS

Jineth Ardila Ariza

Dirección del Centro Editorial

Catalina Arias Fernández

Coordinación editorial

Michael Cárdenas Ramírez

Coordinación gráfica

Íkaro Valderrama

Corrección de estilo

Ana Virginia Caviedes

Lectura en armada

Alejandro Sepúlveda Gauer

Diseño y diagramación

Diseño de la colección (2024)

Imagen de cubierta

Pacífico Colombiano. Imagen Landsat ETM 2001.

Procesada por Germán Vargas Cuervo

Fotografías de las portadillas

Germán Vargas Cuervo

Notificación de licencias de derechos de autor

Se utilizaron y modificaron con filtros de ruido, blur y
valores tonales las imágenes de los siguientes autores:

De [wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org/): • Bernard Gagnon • Jorge Arrieta •

Catalogación en la publicación Universidad Nacional de Colombia

Vargas Cuervo, Germán, 1957-

Geología y geomorfología de ríos tropicales de Colombia : conocer los ríos previene desastres / Germán Vargas Cuervo. -- Primera edición. -- Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Humanas : Centro Editorial Facultad de Ciencias Humanas : Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Dirección de Investigación y Prospectiva, 2025, ©2025.

316 páginas : ilustraciones (principalmente a color), diagramas, fotografías, mapas. -- (Colección imagoMUNDI)

Incluye referencias bibliográficas e índice de materias

ISBN 978-958-505-850-7 (impreso). -- ISBN 978-958-505-851-4 (digital).

ISBN 978-958-505-852-1 (impresión bajo demanda)

1. Ríos -- Geomorfología -- Colombia 2. Geomorfología climática -- Investigación Colombia 3. Dinámica fluvial 4. Sistemas fluviales 5. Cuencas hidrográficas -- Factores climáticos -- Regiones tropicales 6. Cauces de los ríos -- Aspectos ambientales -- Colombia 7. Caudal ecológico 8. Geoformas 9. Morfología dinámica 10. Morfometría 11. Hidrogeología 12. Ecosistemas fluviales -- Sensores remotos -- Colombia 13. Ríos -- Teledetección -- Regiones tropicales 14. Sedimentos fluviales -- Mapas de teledetección 15. Sedimentos (Geología) 16. Geología -- Mapas 17. Magdalena (Río, Colombia) -- Cauce 18. Cauca (Río, Colombia) -- Cauce 19. Sinú (Río, Colombia) -- Cauce I. Título II. Serie
CDD-23 551.48309861 / 2025

Geología y geomorfología de ríos tropicales de Colombia

Conocer los ríos
previene desastres



Dirección de
INVESTIGACIÓN
y Prospectiva

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI

CONSEJO DIRECTIVO

Gustavo Francisco Petro Urrego

Presidente de la República de Colombia

Francia Elena Márquez Mina

Vicepresidenta de la República de Colombia

Piedad Urdinola Contreras

*Departamento Administrativo
Nacional de Estadística – DANE*

Jhonattan Duque Murcia

*Departamento Nacional
de Planeación – DNP*

General (R) Pedro Arnulfo Sánchez

Ministro de Defensa Nacional

Lena Yanina Estrada Añokazi

Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Martha Carvajalino

Ministra de Agricultura y Desarrollo Rural

Gustavo Adolfo Marulanda Morales

Director General IGAC

Martha Lucía Parra García

Secretaria General IGAC

COMITÉ DIRECTIVO

Gustavo Adolfo Marulanda Morales

Director General

Diego Fernando Carrero Barón

Subdirector General (E.)

Johan Andrés Avendaño Arias

Director de Investigación y Prospectiva

Óscar Romero Guevara

Jefe Oficina Observatorio Inmobiliario Catastral

Anderson Puentes Carvajal

Director Técnico Gestión de Información Geográfica

Carlos Andrés Franco Prieto

Subdirector de Cartografía y Geodesia

Ricardo Fabián Siachoque Bernal

Subdirector de Agrología

Manuel Guillermo Beltrán Quecan

Subdirector de Geografía

Melisa Lis Gutiérrez

Jefe Oficina Laboratorio Nacional de Suelos

Luisa Cristina Burbano Guzmán

Directora de Gestión Catastral

John Guibsson García Guerrero

Subdirector de Proyectos

Alexis Javier Carbono Mendoza

Subdirector de Avalúos

Andrés Felipe González Vesga

Director de Regulación y Habilitación

Fernando Pérez Moreno

*Director de Tecnologías de la
Información y Comunicaciones*

Diana Alexandra Ruiz Bedoya

Subdirectora de Información

Fernando Pérez Moreno

Subdirector de Sistemas de Información (E.)

Cristian José Petro Petro

Subdirector de Infraestructura Tecnológica

Martha Lucía Parra García

Secretaria General

Gloria Marlén Bravo Guaqueta

Subdirectora de Talento Humano

Laura Moreno Moreno

Subdirectora Administrativa y Financiera

Fabián Eduardo Camelo Sánchez

Jefe Oficina Asesora de Planeación

Camila Gutiérrez Barragán

Jefe Oficina Asesora Jurídica

Alejandra Montenegro Pinzón

Jefe Oficina Asesora de Comunicaciones

Edgar Ortiz Botero

Jefe Oficina de Control Interno

Natalia Rojas González

Jefe Oficina Control Interno y Disciplinario

María Alejandra Ferreira Hernández

Jefe Oficina de Relación con el Ciudadano

Víctor Maldonado Nova

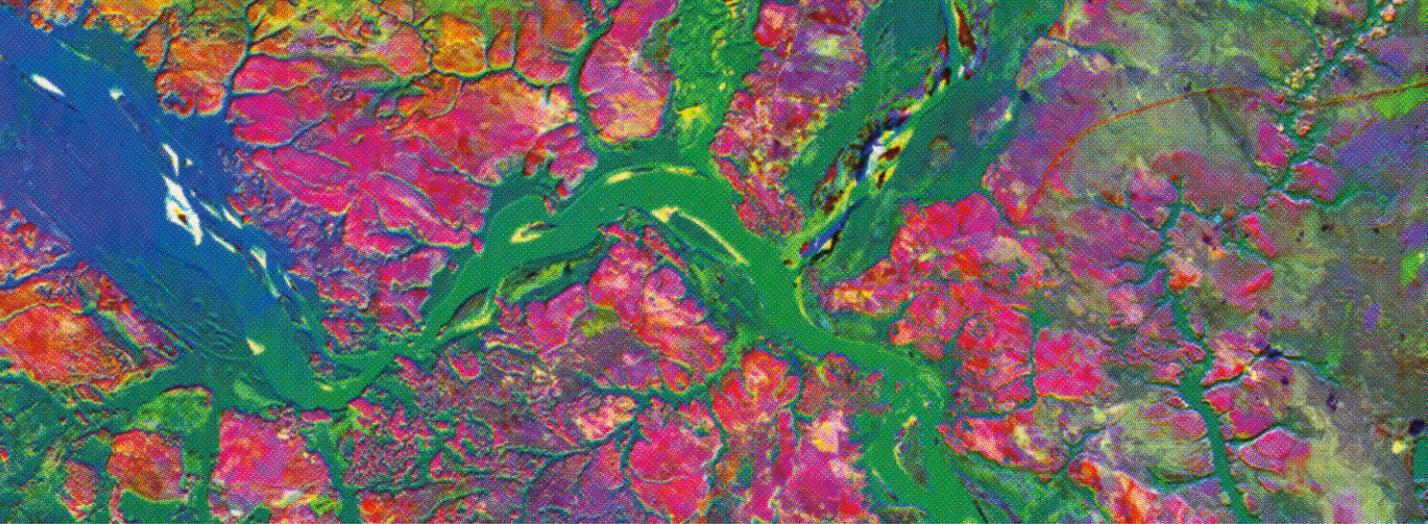
Jefe Oficina Comercial

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. Para la reproducción parcial o total de la presente obra se requiere la previa autorización de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA y el INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). El texto, la cartografía y gráficos contenidos en la presente obra están sujetos a derechos de propiedad intelectual ("Ley 23 de 1982, modificada por la Ley 44 de 1993, Ley 1915 de 2018, y la Ley 2294 de 2023, y aquellas normas que modifiquen, adicionen o deroguen las disposiciones vigentes relacionadas en la materia").

Geología y geomorfología de ríos tropicales de Colombia

Conocer los ríos
previene desastres

Germán Vargas Cuervo



Contenido

+ Presentación	12
+ Agradecimientos y reconocimientos	17
<hr/>	
Parte 1	20
Principales sistemas satelitales ópticos	23
El sistema Landsat	23
Programa Copernicus-Sentinel	28
El programa Spot	29
Imágenes de alta resolución	29
Fotografías digitales de dron	42
Fotografías aéreas	43
Principales sistemas satelitales Radar	47
Jers-1	47
Alos Palsar	47
Radarsat	49
Sentinel-1	49
Terrasar-x	51
Capella	52
Imágenes de dominio público	53
Modelos digitales de terreno	54
Procesamiento digital de imágenes	57
Aplicaciones de sensores remotos en sistemas fluviales	63
El agua en el espectro	63
Concentración de sedimentos en cuerpos de agua	68
Dinámica multitemporal	70



Parte 2	72
Las rocas	75
Rocas ígneas	75
Rocas metamórficas	81
Rocas sedimentarias	82
Depósitos inconsolidados	86
Estructuras geológicas	91
Geología de cauces fluviales	95
Mapas geológicos	98
Resistencia de los materiales litológicos a la erosión fluvial	101
Mapas de resistencia de los materiales litológicos a la erosión fluvial	105



Parte 3	106
Tipología de ríos	109
Morfometría de ríos	113
Morfología de ríos	117
Cauce activo	117
Islas fluviales	128
Barras de arena y playas	129
Diques aluviales	131
Lecho mayor	131
Llanuras de inundación	136
Terrazas aluviales	137
Terrazas fluvioacústres	138
Planicies aluviales	139
Paleocauces	140
Abanicos aluviales	141
Estuarios o esteros	142
Deltas fluviales	143
Mapas geomorfológicos de cauces fluviales	145



Morfodinámica de cauces fluviales	149
Dinámica multitemporal de orillas	149
Dinámica lateral	150
Dinámica de meandros	150
Índice de sinuosidad	151
Dinámica de ríos trenzados y anastomosados	154
Dinámica de islas y barras de arena	156
Dinámica de brazos fluviales	158
Dinámica en llanuras de inundación	159
Dinámica fluvial en deltas	160
Dinámica fluvial asociada a los ciclos hidroclimáticos anuales	160
Dinámica fluvial asociada a fenómenos de variabilidad climática extrema	164
Influencia del fenómeno de variabilidad climática El Niño	164
Influencia del fenómeno de variabilidad climática La Niña	165
Dinámica de aguas de un cauce fluvial	166
Procesos morfodinámicos internos	167
Procesos morfodinámicos externos	168
Desbordes o desbordamientos	168
Rompederos	169
Torrencialidad	170
Procesos de erosión fluvial	173
Mapas morfodinámicos	174



Parte 4	180
Caracterización geológica y geomorfológica de ríos colombianos	181
Río Magdalena	185
Zonas morfodinámicas del río Magdalena	186
Zona morfodinámica San Agustín (K1614+100 - K 1437+590)	186
Zona morfodinámica Embalses (K 1437+590 - K1357+310)	191
Zona morfodinámica Neiva (K1357+310 - K1102+220)	195
Zona morfodinámica Girardot (K1102+220 - K1045+450)	196
Zona morfodinámica Honda (K1045+450 - K909+700)	197
Zona morfodinámica Puerto Berrío (K909+700 - K661-590)	201
Zona morfodinámica Gamarra (K661-590 - K430+660)	201
Zona morfodinámica Depresión Momposina (K430+660 - K252+995)	204
Zona morfodinámica Zambrano (K252+995 - K180+690)	208
Zona morfodinámica Plato-Pedraza (K180+690 - K116+290)	211
Zona morfodinámica Calamar-Dique (K116+290 - K86+050)	213
Zona morfodinámica Delta del Magdalena (K86+050 - K000)	215
Río Cauca	221
Zona morfodinámica Popayán (K1258+200 - K1176+800)	223
Zona morfodinámica Suárez (K1176+800 - K1097+700)	225
Zona morfodinámica Jamundí (K1097+700 - K1000+800)	225
Zona morfodinámica Cali (K1000+800 - K977+600)	228
Zona morfodinámica Riofrío (K977+600 - K773+800)	229
Zona morfodinámica Ansermanuevo (K773+800 - K673+700)	232
Zona morfodinámica Marmato (K673+700 - K501+800)	235
Zona morfodinámica Santafé de Antioquia (K501+800 - K358+200)	238
Zona morfodinámica Ituango (K358+200 - K258+400)	241



Zona morfodinámica Cáceres (K258+400 – K191+800)	245
Zona morfodinámica Caucasia (K191+800 – K139+500)	247
Zona morfodinámica Nechí (K139+500 – K99+200)	249
Zona morfodinámica Guaranda (K99+200 – K57+500)	253
Zona morfodinámica Achí (K57+500 – K3+900)	255
Zona morfodinámica Pinillos (K3+900 – K0+000)	255
Río Sinú	259
Zona morfodinámica Paramillo (K 430+100 – K371+050)	263
Zona morfodinámica Bocas del Manso (K371+050 – K324+300)	264
Zona morfodinámica Urrá (K324+300 – K288+000)	266
Zona morfodinámica Tierralta (K288+000 – K227+800)	267
Zona morfodinámica Guasimal (K227+800 – K180+400)	270
Zona morfodinámica Santa Isabel (K180+400 – K121+500)	272
Zona morfodinámica Montería (K121+500 – K98+270)	276
Zona morfodinámica San Pelayo (K98+270 – K62+600)	279
Zona morfodinámica Lorica (K62+600 – K20+100)	280
Zona morfodinámica delta del río Sinú, San Bernardo del Viento (K20+100 – K0+000)	284
+ Epílogo	291
Referencias	295
Sitios web de interés	300
Índice de figuras	301
Índice de tablas	311
Índice de materias	312

Presentación

EL INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC), EN SU CONDICIÓN de autoridad nacional geográfica de Colombia a lo largo de sus noventa años de existencia a 2025, ha propendido por construir y liderar una cultura de la planeación, levantamiento, alistamiento, producción, análisis, visualización, investigación y difusión de información geográfica en sus distintas escalas y temas. Bajo el liderazgo de sus direcciones ha generado publicaciones que se han convertido en referentes de la geografía nacional, como las distintas ediciones del Atlas de Colombia, estudios de suelos, estudios sobre las características geográficas de la tierra (propiedad y concentración), textos de geografía para la escuela, geografías departamentales, estudios poblacionales, entre otros.

Así, en la conmemoración de sus noventa años de trabajo, el IGAC, a través de la Dirección de Investigación y Prospectiva, se enorgullece en presentar, en alianza con el Departamento de Geografía de la Facultad de Ciencias Humanas de la Universidad Nacional de Colombia, el libro *Geología y geomorfología de ríos tropicales de Colombia: conocer los ríos previene desastres*, escrito por el profesor Germán Vargas Cuervo.

Este es un libro de geografía física de Colombia, un subcampo que será siempre de gran relevancia en los procesos educativos, de investigación y, por supuesto, de políticas públicas. Por tal razón, una obra de altísima calidad como la presente se constituye en un referente para un mayor conocimiento geológico y geomorfológico de los ríos del país. Colombia es un territorio diverso construido en función de las diferentes arterias fluviales que marcaron nuestros procesos de poblamiento, adaptación, prácticas culturales, formas de vivir y uso de recursos. No es posible identificarnos como colombianos sin remitirnos al río Magdalena, única «autopista» hacia el interior del país por más de cuatrocientos años; o al río Atrato, por donde circulan las vastas riquezas extraídas del Chocó y por donde entraron los ancestros de quienes hoy lo habitan; o al río Cauca y su largo discurrir, que ofrece desde las riquezas agroindustriales del Valle del Cauca, hasta las más recientes contribuciones energéticas que garantizan nuestro bienestar.

Esta obra enriquece el conocimiento y entendimiento de los procesos geológicos y geomorfológicos asociados a estos y otros ríos de Colombia; adicionalmente, aporta información clave y de referencia para el análisis y gestión del riesgo de desastres, el uso y ocupación del suelo, la construcción de grandes obras de infraestructura y muchos otros factores que contribuyen a la adecuada planeación del territorio.

Este libro, además, se involucra con un área en la que el IGAC fue pionero: el análisis y procesamiento de imágenes satelitales. Precisamente, con sus principios e historia inicia el primer capítulo que explica, de una manera muy didáctica, los diferentes tipos de imágenes que se han usado para la generación de conocimiento e información de los sistemas fluviales colombianos. Un acervo que, como bien lo señala el profesor Vargas, es voluminoso, pues el país cuenta con más de cincuenta años de registros satelitales y ochenta años de registros aerofotográficos, siendo el IGAC el principal productor y administrador en su papel de autoridad geográfica y catastral del país. Desde la década de 1940, el IGAC ha producido, analizado y divulgado información aerofotográfica, y desde la década de 1980 información satelital, la cual ha sido un soporte fundamental en los procesos de gestión y ordenamiento del territorio.

Para terminar, es importante subrayar que la obra recoge la amplia experiencia del profesor Vargas en su rol de docente, investigador y consultor de varias décadas. Al IGAC le enorgullece ser parte de esta gran síntesis, que seguramente impactará la imaginación de muchos investigadores para desarrollar nuevos estudios en el área. ✨

JOHAN AVENDAÑO ARIAS

*Director de Investigación y Prospectiva
Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)*

PAÍSES TROPICALES COMO COLOMBIA SE CARACTERIZAN POR PRESENTAR un régimen climático cálido a frío según la altitud; y dos periodos de temporadas lluviosas y secas, con efectos climáticos adversos como La Niña (lluvias) y El Niño (sequías), que actúan sobre un relieve altamente contrastante formado por un sistema de tres cordilleras de los Andes, macizos, sierras, serranías, valles interandinos, piedemontes, extensas llanuras y litorales. La composición litológica de estos relieves está formada por todos los tipos de rocas, cuyas edades pueden ser muy antiguas —del Precámbrico— o recientes; presenta múltiples estructuras geológicas —fallas, pliegues, fracturas, diaclasas, diques, etc.—, que favorecen los procesos de erosión, alteración y meteorización, de tal modo que originan extensos depósitos inconsolidados del Cuaternario sobre los cuales se desarrolla una densa cobertura vegetal que hace de Colombia un país verde. El conjunto de todas estas características y propiedades hace que se configuren sistemas fluviales diversos y complejos, que le confieren a Colombia una de las mayores riquezas hídricas del mundo.

Dicha riqueza hídrica de Colombia genera el desarrollo de ecosistemas naturales de selvas, montañas, planicies, litorales y valles, además de ser fuente de saneamiento básico para agua potable de zonas urbanas y actividades industriales y agropecuarias. Durante la Conquista, gran parte de los asentamientos urbanos en Colombia se localizaron sosteniblemente en las orillas de los ríos por ser fuentes de transporte y alimentación; sin embargo, el crecimiento de la población —en muchos casos descontrolado— ha llevado a afectaciones por la ocurrencia de diferentes procesos como inundaciones, erosión hídrica, avenidas torrenciales, entre otros. Ante la alta frecuencia y distribución de desastres naturales asociados a estos sistemas fluviales, siempre existen preguntas como: ¿estos suceden por acción de la naturaleza o del ser humano?, ¿por qué se producen?, ¿son fenómenos aleatorios o controlables?, ¿el ser humano se metió al sistema del río o el río invadió sus terrenos? Para obtener la mejor respuesta, es prioritario conocer el comportamiento natural de los ríos y así mitigar sosteniblemente las amenazas que ellos pueden generar.

Este libro recoge los resultados de las investigaciones y estudios que he realizado en diferentes ríos colombianos por más de treinta años con diferentes entidades públicas y privadas. Se trata de un texto técnico sencillo basado en la experiencia, el cual cuenta con múltiples figuras, mapas, fotografías e imágenes que facilitan la comprensión de cualquier lector. Su contenido, estructurado en cuatro partes, se enfoca, en principio, en diferentes técnicas de procesamiento de sensores remotos para el estudio de ríos; luego presenta las principales características geológicas y estructurales de los sistemas fluviales y su resistencia a la erosión hídrica o fluvial; en la tercera parte se realiza la caracterización geomorfológica de sistemas fluviales, desde la tipología de ríos, morfometría, morfología y la morfodinámica; mientras que en la última parte, de corte práctico, se muestran ejemplos de tres grandes ríos colombianos: Magdalena, Cauca y Sinú, mediante la caracterización geológica y geomorfológica de sus diferentes zonas morfodinámicas.

Esta obra en coedición entre el Centro Editorial de la Facultad de Ciencias Humanas de la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, no solamente permite la cooperación institucional sino la transferencia de conocimientos al sector público de una de las instituciones más importantes del país, en la cual el contexto geográfico de los ríos en sus múltiples funciones de catastro, agrología, cartografía, ordenamiento territorial, amenazas y riesgos naturales, etc., es prioritaria. ✱





Agradecimientos y reconocimientos

AGRADEZCO A TODAS LAS ENTIDADES PÚBLICAS QUE HAN hecho posible este trabajo investigativo, entre otras, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad del Norte, el IDEAM, Cormagdalena y la Universidad de Córdoba. También expreso mi gratitud y reconocimiento a las firmas privadas que me han permitido tener experiencias prácticas y ampliar mis conocimientos en diversos proyectos en los ríos de Colombia: Riverport, Sociedad Portuaria, Triple A de Barranquilla S.A.E.S.P., Concep S.A.S., Universidad del Norte, Ingeniería de Proyectos S.A.S. INP., Urrea S.A. E.S.P., Consorcio Consultores del Sinú B&G, Consorcio Hidroestudios Nechí, Web Ingeniería, Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores, Ideha, Consorcio Dique, Royal HasconingDHV – Gómez y Cajiao, Occidental de Colombia - Amec Foster Wheeler y la GTZ.

Mis agradecimientos a los colegas Manuel Alvarado Ortega, Eddie Lora y Humberto Ávila, quienes me han impartido sus experiencias y conocimientos en trabajos conjuntos durante muchos años.

Este libro, producto de mi formación y alta experticia investigativa por muchos años en el estudio de los ríos, tuvo una gran contribución del uso de técnicas de teledetección, con el gran aporte de imágenes de satélite existentes para Colombia y la Tierra en general.

En la actualidad, entidades internacionales públicas y privadas han puesto a disposición del público —ya sea de forma gratuita o comercial— imágenes de satélites que permiten mejorar los estudios de sistemas fluviales; entre dichas entidades quisiera destacar: Nasa, usgs, Landsat, Universidad de Maryland, Spot Imagen, Agencia Espacial Europea, Copérnicus-Sentinel, Digital Globe, Capella Space, Google Earth, Esri-Prosis, Datum Ingeniería e Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Al laboratorio de SIG y sensores remotos del Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia, agradezco el apoyo logístico en el uso de *software* como Erdas y Arcgis, y haberme facilitado fotografías aéreas y productos satelitales existentes. Al Grupo de Investigación de Geotecnologías de la Universidad Nacional de Colombia también le doy las gracias por su acompañamiento técnico e investigativo durante muchos años de trabajo.

Finalmente, manifiesto mi gratitud y reconocimiento especial a Planet, por apoyar directamente esta investigación de ríos tropicales con el suministro abierto de imágenes de alta resolución tipo PlanetScope y RapidEye, las cuales han sido un baluarte importante para la caracterización y el seguimiento del comportamiento morfodinámico de ríos, con datos diarios casi en tiempo real.

Un reconocimiento especial a los profesores Jhon Williams Montoya, del departamento de Geografía de la Facultad de Ciencias Humanas de la Universidad Nacional de Colombia, y Johan Avendaño, actualmente a cargo de la Dirección de Investigación y Prospectiva del Instituto Agustín Codazzi, por su gestión institucional y aportes para coeditar esta obra técnica. ✨

PART 1



Sensores remotos

LOS SENSORES REMOTOS CONSTITUYEN UNA HERRAMIENTA indispensable para el estudio de sistemas fluviales, debido a sus registros temporales. En Colombia, se cuenta con más de 50 años de registros satelitales y 80 años de registros aerofotográficos (IGAC).

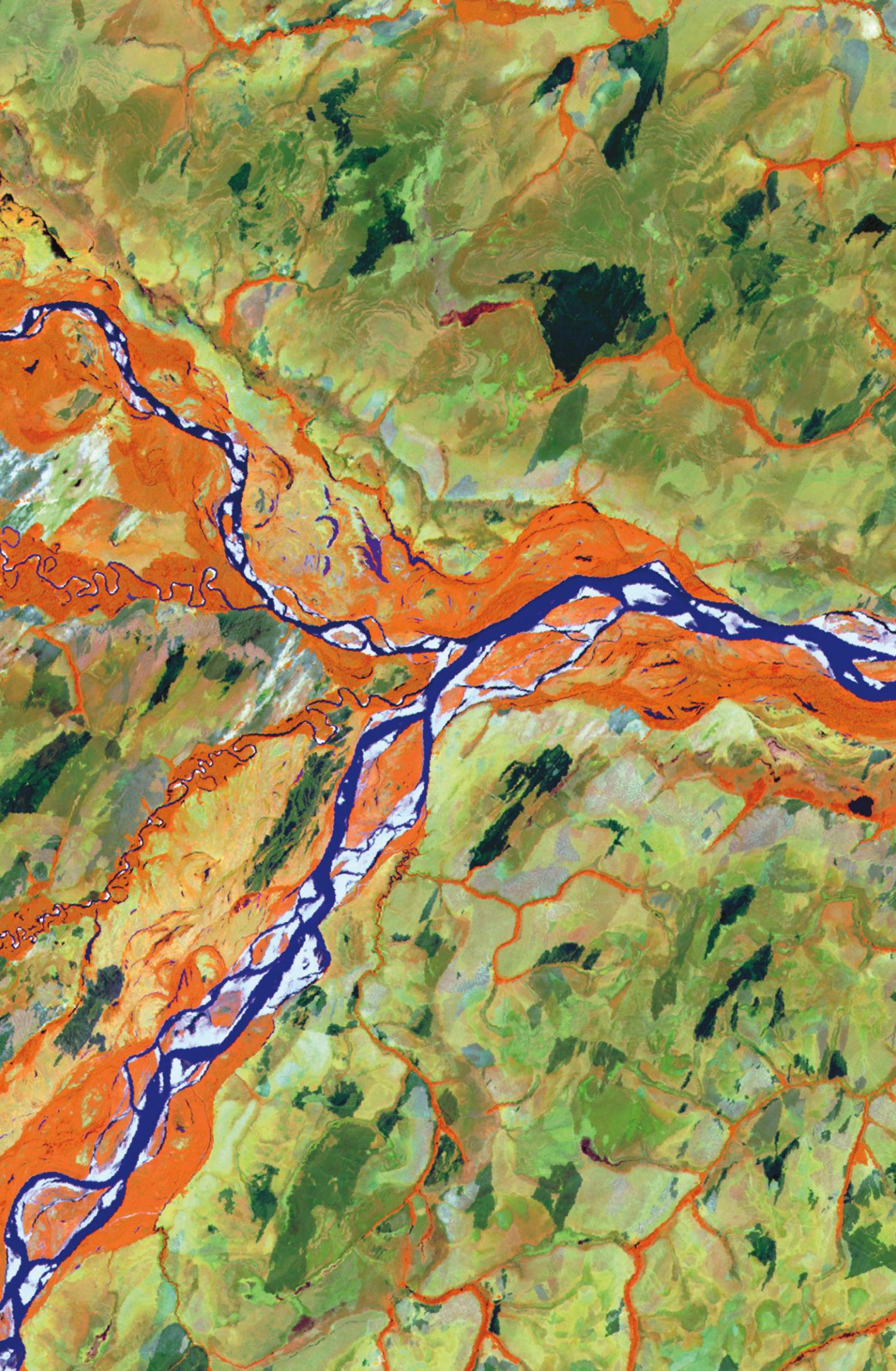
Las respuestas espectrales de bandas en canales del visible, infrarrojo de reflectancia y termal permiten la diferenciación, caracterización y cartografía de diferentes elementos fluviales como el agua, los sedimentos en suspensión, las llanuras de inundación, lechos mayores, entre otros.

En las imágenes de satélite, las coberturas geográficas y resoluciones digitales (dimensión del píxel) permiten análisis locales y regionales. La posibilidad de registros de toma de varias imágenes en un día y la disponibilidad de imágenes de múltiples archivos en servidores públicos y privados de carácter gratuito y con bajos costos permiten el análisis multitemporal de sistemas fluviales a diferentes niveles de escala o resolución.

Además, la capacidad técnica y disponibilidad gratuita de programas de procesamiento de imágenes en línea permiten un mayor uso de estas técnicas de teledetección.

En este capítulo se presentan los principales conceptos de los sensores remotos con énfasis en las aplicaciones a estudios fluviales. Se incluyen las características de diferentes tipos de sistemas satelitales comúnmente utilizados en estudios de ríos; igualmente se presenta un análisis del comportamiento espectral del agua, la concentración de sedimentos en cuerpos de agua y procesos espectrales para la determinación de la dinámica fluvial.

Conceptos básicos de sensores remotos son tratados en Vargas (2015), con un enfoque en las bases para la clasificación geomorfológica; Vargas (2008a) también presenta un análisis relacionado con las ciencias geográficas; Chuvieco muestra aspectos teóricos y básicos de la teledetección (1996), y en otra investigación (2008) se aproxima a la teledetección con énfasis en las ciencias ambientales; Gilvear y Bryant (2016) presentan un trabajo de análisis de datos de sensores remotos para geomorfología y ciencias fluviales; Bizzi et ál. (2016) presentan criterios para el uso de sensores remotos en la caracterización de propiedades hidrogeomorfológicas en ríos de Europa.



Principales sistemas satelitales ópticos

EL SISTEMA LANDSAT

LANDSAT (*LAND* = TIERRA; *SAT* = SATÉLITE) ES UN SISTEMA americano de la Nasa en cooperación con el Servicio Geológico Americano (USGS). Se considera en el medio científico como el principal sistema satelital de observación de la Tierra, por ser el que registra las imágenes más antiguas del planeta con su satélite **ERTS-1** (Earth Resources Technology Satellite, lanzado en 1972); por su gran cobertura geográfica (185 x 185 km); por mantener continuidad en su registro hasta la actualidad gracias a Landsat 9 —que fue lanzado en septiembre de 2021—; por contar con varias bandas multiespectrales entre el visible y el infrarrojo, incluyendo bandas del termal; por abarcar resoluciones espaciales de entre 15 y 30 m; por su buena calidad radiométrica de entre 8 y 14 bits, y, finalmente, debido a que posee un registro y disponibilidad gratuita en diferentes servidores de Internet.

Landsat, a través de su historia, ha contado con diferentes sensores o instrumentos que han ido mejorando las características de adquisición de las imágenes en cuanto a lo espectral, espacial y radiométrico. El primer sensor de Landsat se llamó **RBV** (Return Beam Vidicon Camera) y operó desde la puesta en órbita del primer satélite **ERTS-1** hasta Landsat 3.

Un segundo sensor, denominado MSS (Multispectral Scanner System) estuvo operando desde Landsat 2 hasta Landsat 5.¹

Landsat TM (Thematic Mapper) es considerado por los usuarios como uno de los sensores más útiles por su buena calidad radiométrica. TM es un radiómetro de barrido multispectral que se llevó a bordo de los satélites Landsat 4 y 5, proporcionando una cobertura casi continua desde julio de 1982, ya que luego fue montado en otros satélites, hasta que suspendió sus registros en junio de 2013.²

Landsat 6,³ con su sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper), fracasó en alcanzar su órbita en octubre 5 de 1993, pero para buena fortuna de la ciencia el satélite de Landsat 5 continuó su aporte de imágenes TM. En 1999 fue lanzado Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), que utiliza los mismos instrumentos de TM en Landsat 4 y 5. Además, tiene una banda pancromática con resolución espacial de 15 m/píxel y un canal o banda en el infrarrojo térmico de 60 m/píxel. Landsat 7 operó sin problemas hasta mayo de 2003, cuando una falla en un componente de *hardware* produjo en las imágenes un bandeamiento de espacios vacíos.⁴

Landsat 8, denominado LDCM (Landsat Data Continuity Mission), se lanzó en 2013 y posee dos sensores o instrumentos: el OLI (Operational Land Imager) y el Sensor Térmico Infrarrojo (TIRS). A diferencia de ETM+, presenta dos bandas adicionales, la Coastal/aerosol (banda 1), que es útil para la determinación de las zonas de actividad clorofiliana y aerosoles en zonas costeras, y la Cirrus (banda 9), que permite detectar las nubes cirros altas y delgadas, midiendo la luz en la parte del espectro electromagnético donde las nubes son más visibles. En el TIRS presenta dos canales termales (bandas 10 y 11).⁵

Landsat 9 fue lanzado el 27 de septiembre de 2021 y lleva instrumentos mejorados a partir de Landsat 8, denominados OLI-2 y TIRS-2. La resolución radiométrica pasa de 12 a 14 bits, con capacidad de diferenciar 16 384 tonos de grises.⁶

Debido a que Landsat es tanto un sistema pasivo como un sensor óptico, y por sus características espaciales, espectrales, radiométricas, alta cobertura geográfica (185 km x 185 km) y la gran temporalidad de sus registros (más de 50 años), es uno de los mejores satélites para estudios fluviales de geología, geomorfología, morfodinámica, inundaciones, etc.; particularmente para grandes ríos de llanuras, permitiendo cartografías precisas a escalas medias a bajas entre 1:50.000 y 1:100.000. En la figura 1.1 se presentan ejemplos de cauces fluviales en imágenes Landsat y en la tabla 1.1. sus principales características espectrales, espaciales, radiométricas y temporales.⁷

1 Para mayor información véase <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-1>, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-2>, y USGS (2018).

2 Véase <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-4>, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>.

3 Véase <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-6>

4 Véase <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>.

5 Para mayor información ver USGS (2018) y <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>.

6 USGS (2022) y <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9>.

7 Algunos sitios web para tener información y descargas de imágenes Landsat son: <https://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9/landsat-9-overview>, <https://www.usgs.gov/>.

Figura 1.1. Ejemplos de imágenes Landsat MSS, TM, ETM y LDCM- OLI. Sector de confluencia del río Cravo Norte al río Meta.

Fuente: Nasa-USGS, con procesamiento propio.

- a. Landsat MSS, 1973
- b. Landsat TM, 1988
- c. Landsat ETM, 2000
- d. Landsat LDCM - OLI, 2020

