

Hidrología de Colombia

El ciclo del agua en una geografía compleja

Germán Poveda Jaramillo
Óscar José Mesa Sánchez
Jaime Ignacio Vélez Upegui



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

obra selecta

Germán Poveda Jaramillo

Ingeniero civil, magíster y doctor en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos; magíster en Ciencias de la Ingeniería. Entre 1998 y 2015 fue miembro del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Miembro de Número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y de la Academia de Ciencias del Mundo (TWAS). Integrante de la Misión Internacional de Sabios en 2019. Integrante del comité científico de la Misión de Medición de la Precipitación Global de la NASA. Ganador en cuatro ocasiones del premio Alejandro Ángel Escobar. Recibió en 2007 la Medalla Excelencia Académica, y en 2016 la Orden Gerardo Molina, por parte del Consejo Superior de la Universidad Nacional de Colombia. Ha sido investigador visitante en universidades de Estados Unidos, Reino Unido y Alemania.

Óscar José Mesa Sánchez

Profesor Titular de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero civil, M.Sc. y Ph.D. Profesor de la Facultad de Minas desde 1985. Investigador sobre hidrología y clima. Premio Nacional de Investigación Alejandro Ángel Escobar. Premio Lorenzo Codazzi de la Sociedad Colombiana de Ingenieros. Profesor visitante de la Universidad de Colorado. Miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales. Investigador emérito en el escalafón del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. Autor de múltiples libros y artículos de investigación.

Jaime Ignacio Vélez Upegui

Ingeniero civil, magíster en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos y doctor en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Profesor de la Universidad Nacional de Colombia en la Facultad de Minas desde 1990 hasta 2022. Docente Investigador en el Área de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos y Gestión de Riesgo por Eventos Hidrometeorológicos. Miembro Correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales. Premio Nacional de Investigación Alejandro Ángel Escobar. Premio Lorenzo Codazzi de la Sociedad Colombiana de Ingenieros.



obra selecta

Hidrología de Colombia

**El ciclo del agua en una geografía
compleja**

obra selecta

Hidrología de Colombia

El ciclo del agua en una geografía
compleja

Germán Poveda Jaramillo
Óscar José Mesa Sánchez
Jaime Ignacio Vélez Upegui



Bogotá, D. C.
2023

- © Universidad Nacional de Colombia
- © Editorial Universidad Nacional de Colombia
- © Germán Poveda Jaramillo
- © Óscar José Mesa Sánchez
- © Jaime Ignacio Vélez Upegui

Editorial Universidad Nacional de Colombia

Alberto Amaya Calderón
Director

Comité editorial

Alberto Amaya Calderón
Ana Patricia Noguera de Echeverry
Fabio Andrés Pavas Martínez
Veronique Claudine Bellanger
Fredy Fernando Chaparro Sanabria
Jairo Iván Peña Ayazo
Pedro Nel Benjumea Hernández

Primera edición, 2023

ISBN 978-958-505-372-4 (impreso)

ISBN 978-958-505-373-1 (PDF)

Edición

Editorial Universidad Nacional de Colombia
direditorial@unal.edu.co
www.editorial.unal.edu.co

Colección Obra Selecta

Juan Carlos Villamil Navarro - Diseño de cubierta
Andrea Kratzer M. - Diseño de colección
Liliana Guzmán, Judy Andrea Coronado, Laura Camila Acosta,
John Fredy Guzmán - Coordinación editorial
Germán Poveda Jaramillo - Diagramación LaTeX
Julián Arcila-Forero - Edición LaTeX
Sebastián Montero - Corrección de estilo
Irene Poveda Agudelo - Fotografía de portada (río Sinú)

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

Impreso y hecho en Bogotá, D. C., Colombia

Catalogación en la publicación Universidad Nacional de Colombia

Poveda Jaramillo, Germán, 1958-

Hidrología de Colombia : el ciclo del agua en una geografía compleja /
Germán Poveda Jaramillo, Óscar José Mesa Sánchez, Jaime Ignacio Vélez Upegui.
-- Primera edición. -- Bogotá : Universidad Nacional de Colombia. Editorial
Universidad Nacional de Colombia, 2023
676 páginas : ilustraciones (principalmente a color), diagramas, fotografías, mapas.
-- (Colección Obra Selecta)

Incluye referencias bibliográficas e índice analítico

ISBN 978-958-505-372-4 (impreso) ISBN 978-958-505-373-1 (epub)

1. Hidrología -- Investigaciones -- Colombia. 2. Ciclo hidrológico -- Colombia 3.
Evaluación del impacto ambiental -- Colombia 4. Cambios climáticos -- Colombia
5. Balance hídrico (Hidrología) -- Colombia 6. Lluvia -- Colombia 7. Lluvia --
Región Andina -- Estadísticas 8. Caudal de la corriente de agua 9. Variabilidad de
precipitación -- Colombia 10. Pérdida de suelos 11. Procesos 12. Denudación I. Mesa
Sánchez, Oscar José, 1953- II. Vélez Upegui, Jaime Ignacio, 1959- III. Título IV Serie

CDD-23 551.4809861 / 2023

Para Clara, Irene y Daniel
G.P.J.

Para Camilo, Ana María y Andrés
In memoriam Luz Alba
O.J.M.S.

Para los estudiantes
J.I.V.U.

Contenido

Prefacio	17
Introducción	21
1 Contexto global	27
1.1 Sistema climático global	27
1.2 Ciclo hidrológico global	30
1.2.1 Promedio global de largo plazo	30
1.2.2 Precipitación	31
1.2.3 Evapotranspiración	31
1.2.4 Almacenamiento y transporte de agua en la atmósfera	33
1.2.5 Aguas subterráneas	34
1.3 Mecanismos de la circulación atmosférica global	35
1.3.1 La zona de convergencia intertropical (ZCIT)	35
1.3.2 Caracterización del ciclo anual de la precipitación global	39
1.3.3 Celda de Hadley	43
1.3.4 Celda de Walker	47
1.3.5 Variación mensual y latitudinal	47
1.4 Balance de energía global	48
1.4.1 Promedio global	49
1.4.2 Balances de energía en el tope de la atmósfera y en superficie	52
1.4.3 El doble papel de las nubes	57
2 Variabilidad anual e intraanual	59
2.1 Contexto continental	59
2.2 Ciclo anual de la precipitación	59
2.2.1 Según la información de TRMM	65
2.2.2 Según la información de Ideam y Chirps	66

2.3	El chorro del Chocó	77
2.3.1	Ciclo anual	79
2.3.2	El chorro del Chocó y la hidroclimatología de la costa Pacífica	82
2.3.3	El experimento ChocoJEX	84
2.4	Otras tres corrientes en chorro del Este	87
2.4.1	Chorro del Caribe	87
2.4.2	Chorro de media atmósfera	88
2.4.3	Chorro del Orinoco	88
2.5	Sistemas Convectivos de Mesoescala	90
2.5.1	Clasificación de eventos de tormenta	92
2.5.2	Ciclo anual de los eventos	95
2.5.3	Corte zonal entre 3°N y 7°N	97
2.5.4	Fuentes de humedad y ciclos de vida de SCM al occidente de Colombia	100
2.5.5	Tipologías de SCM	102
2.5.6	Ondas de gravedad sobre la costa Pacífica	103
2.6	Oscilaciones tropicales intraestacionales	105
2.6.1	Oscilación de Madden-Julian o intraestacional	105
2.7	Ondas tropicales del este	110
3	Balance hidrológico	117
3.1	Ecuaciones de balance hídrico	118
3.2	Información utilizada	120
3.2.1	Modelo digital de terreno y extracción de la red hídrica	120
3.3	Campo de precipitación promedio anual	120
3.3.1	Información utilizada	121
3.3.2	Métodos de interpolación	121
3.3.3	Mapas de precipitación promedio anual	122
3.3.4	Análisis de los resultados	123
3.4	Estimación de los campos de evapotranspiración real y potencial promedio anual	127
3.4.1	Temperatura, punto de rocío, presión atmosférica humedad relativa y brillo solar	127
3.4.2	Radiación solar neta	127
3.4.3	Métodos de Cenicafé y Thornwaite	129

3.4.4	Método de Turc modificado	130
3.4.5	Método de Penman aproximado	130
3.4.6	Método de Morton	130
3.4.7	Método de Turc	130
3.4.8	Método de Choudhury	132
3.5	Número adimensional de Budyko	132
3.6	Almacenamiento de agua en el suelo	135
3.6.1	Región Andina	135
3.6.2	Región Amazónica	136
3.6.3	Región Orinoquia	137
3.6.4	Región Pacífica	137
3.6.5	Región Caribe	138
3.7	Escorrentía y caudales promedio de largo plazo	138
3.8	Balance hídrico en la región Pacífica	142
3.8.1	Introducción	142
3.8.2	Metodología	143
3.8.3	Información	143
3.8.4	Resultados	146
3.8.5	Conclusiones sobre el balance hídrico en la costa Pacífica	149
3.9	Balance de agua en la atmósfera	151
3.10	Modelo del ciclo anual de caudales (dos tanques)	154
3.11	Balance hidrológico a escala mensual	155
3.11.1	Metodologías para la estimación de la evaporación mensual	155
3.11.2	Estimación del ciclo anual de almacenamiento de agua en el suelo para algunas cuencas de Colombia	156
4	Reanálisis de la lluvia	173
4.1	Introducción	173
4.2	El óptimo pluviográfico	174
4.3	Información	175
4.3.1	Información puntual	175
4.3.2	Mapas promedios multianuales	175
4.3.3	Campos mensuales	175
4.4	Métodos de interpolación	179

4.5	Metodología de estimación	181
4.5.1	Estimación de los campos mensuales de precipitación para cada base de datos espacial	182
4.5.2	Estimación con el modelo Prism	182
4.5.3	Integración de la información	186
4.6	Resultados	187
4.6.1	Promedios multianuales para cada una de las bases de datos	187
4.6.2	Campos de precipitación mensual	187
4.6.3	Precipitación anual	190
4.6.4	Promedios mensuales	192
4.6.5	Ciclo anual por regiones	197
4.6.6	Variación de la precipitación con la altura	197
4.6.7	Correlación con variables climáticas	203
5	Caudales extremos	209
5.1	Caudales máximos anuales	209
5.1.1	Regionalización de crecientes	209
5.1.2	Análisis nacional	211
5.1.3	Caudales máximos estimados para distintos periodos de retorno	211
5.1.4	Análisis regional	211
5.2	Estimación de caudales máximos anuales en un contexto no estacionario	218
5.2.1	Variación temporal de parámetros por regresión en ventana móvil	220
5.2.2	No estacionariedad a partir de la variación temporal de cuantiles	224
5.2.3	No estacionariedad a partir de vectores covariables de fenómenos macroclimáticos	225
5.2.4	Relevancia	227
5.3	Caudales mínimos anuales	231
5.3.1	Regionalización de caudales mínimos	231

5.3.2	Análisis nacional	234
5.3.3	Base física del escalamiento simple de los caudales mínimos	235
5.3.4	Análisis regional	237
5.3.5	Caudales mínimos estimados para distintos periodos de retorno	240
5.3.6	Curva de recesión	244
5.3.7	Estimación del caudal base	255
5.4	Escalamiento de los cuantiles probabilísticos de la curva de duración de caudales con el caudal medio	265
5.4.1	Datos usados	266
5.4.2	Metodología	267
5.4.3	Resultados	267
5.4.4	Conclusiones	267
5.5	Índice de precipitaciones estandarizadas y sequías meteorológicas	269
5.5.1	Variabilidad espacio-temporal de las sequías	269
5.5.2	Análisis de rachas	271
5.6	Intensidad, frecuencia y duración de sequías hidrológicas	277
5.6.1	Datos	277
5.6.2	Metodología	278
5.6.3	Resultados	278
6	Variabilidad interanual	285
6.1	Las fases extremas del ENSO: El Niño y La Niña	285
6.1.1	Definición e índices	285
6.1.2	Impactos en América del Sur	286
6.1.3	Efectos del ENSO sobre las precipitaciones	291
6.1.4	Efectos del ENSO sobre la evaporación	302
6.1.5	Efectos del ENSO sobre los caudales de los ríos	303
6.1.6	Efectos del ENSO sobre la humedad del suelo	320
6.1.7	Efectos del ENSO sobre la actividad vegetal como indicador de la evapotranspiración	329
6.1.8	¿Cómo se explican las anomalías hidroclimáticas en Colombia y el norte de Sudamérica durante El Niño?	330

6.1.9	Interacciones tierra-atmósfera durante el ENSO en Sudamérica tropical	331
6.1.10	Efectos del ENSO sobre las variables del balance de energía en superficie	336
6.1.11	Impactos de El Niño sobre las epidemias de malaria y dengue	336
6.1.12	Sobre la definición de anomalías hidroclimáticas	337
6.2	Efectos de otros fenómenos macroclimáticos	339
6.2.1	Oscilación decadal del Pacífico	339
6.2.2	Oscilación del Atlántico norte	341
6.2.3	Oscilación multidecadal del Atlántico	342
6.2.4	Dipolo de las temperaturas superficiales del océano Atlántico tropical	344
6.3	Predicción de caudales medios mensuales	344
7	Precipitación a escala horaria	383
7.1	Ciclo diario de la precipitación en los Andes	383
7.1.1	Ciclo diario promedio	383
7.1.2	Ciclo diario según la misión TRMM	394
7.1.3	Variabilidad estacional del ciclo diario	396
7.2	Condiciones termodinámicas	398
7.3	Curvas intensidad-duración-frecuencia	400
7.3.1	Teoría de escalamiento temporal	401
7.3.2	Estimación de curvas IDF mediante la teoría de escalamiento simple. Método 1	407
8	Estadística de las lluvias andinas	419
8.1	Introducción	419
8.2	Análisis de multiescala	421
8.3	Persistencia espacial y temporal	429
8.3.1	Función de autocorrelación	430
8.3.2	Escala de fluctuación	431
8.3.3	Varianza de la lluvia bajo agregación en el tiempo	432
8.3.4	Hipótesis de Taylor	432
8.3.5	Correlación e información mutua	433

8.4	Entropía de Shannon	442
8.4.1	¿Por qué y cómo emerge la máxima entropía en la lluvia?	442
8.5	Entropía generalizada de Tsallis o q -Entropía	449
8.6	La función q -entropía dinámica	449
8.7	La extrema variabilidad espacio-temporal de la lluvia tropical de montaña	450
8.8	Análisis probabilístico de la intermitencia de las lluvias horarias	452
8.8.1	Introducción	452
8.8.2	Información y aspectos metodológicos	454
8.8.3	Conclusiones	459
8.9	Espectro multifractal	460
8.9.1	Función de distribución, intermitencia y multifractales	460
8.9.2	Espectro de potencias	462
8.9.3	Definición del espectro multifractal y metodologías de estimación	462
8.9.4	Datos	468
8.9.5	Resultados	468
8.9.6	Función densidad de probabilidad empírica	468
8.9.7	Espectro de potencias	471
8.9.8	Espectros multifractales	472
8.9.9	Modelo para el exponente de Renyi	474
8.9.10	Elevación sobre el piso del valle	476
8.10	Conclusiones	476
9	Procesos de denudación	481
9.1	Erosión	481
9.1.1	Erosión laminar	481
9.1.2	Erosión concentrada	484
9.2	Remoción en masa	484
9.2.1	Caída de bloques y desgarres	485
9.2.2	Flujos	485
9.2.3	Deslizamientos	486
9.2.4	Reptación	486
9.3	Causas principales de los procesos denudativos	486

9.4	Determinación de la erosión y la susceptibilidad a los procesos de denudación	487
9.4.1	Aplicación de la EUPS para Colombia	487
9.4.2	Estimación de la producción de sedimentos	491
9.4.3	Propuesta metodológica para la determinación de la susceptibilidad a procesos de denudación	493
9.4.4	Rangos utilizados	495
10	Cambio climático	507
10.1	Introducción	507
10.2	Estudios previos	509
10.3	Predicción del cambio	512
10.4	Metodología	513
10.5	Resultados y discusión	514
10.5.1	FOE, CP y análisis espectral	514
10.5.2	Análisis de homogeneidad	516
10.6	Conclusiones	519
10.7	El Proyecto RIOCCADAPT	521
11	Deforestación e incendios	525
11.1	Introducción	525
11.2	Deforestación y destrucción de los sistemas de soporte a la vida	526
11.3	Causas socioeconómicas y culturales	528
11.4	Dinámica espacio-temporal de la deforestación	529
11.5	Fuegos	538
11.6	Impactos hidrológicos y climáticos de la deforestación	542
11.6.1	Alteración de los balances de agua, energía y carbono	548
11.6.2	Alteración de dinámicas atmosféricas y oceánicas de gran escala	549
11.6.3	Aumento de la temperatura del aire y reducción de la precipitación y la evapotranspiración	550
11.6.4	Temporadas secas más largas y mayores déficits de agua	551

11.6.5 Pérdida de la precipitación reciclada	552
11.6.6 Debilitamiento de la cascada de circulación de humedad en el sistema suelo-vegetación-atmósfera	555
11.6.7 Muerte del bosque y sabanización permanente de la Amazonia	556
11.6.8 Debilitamiento de los ríos aéreos de Suramérica	558
11.6.9 Disminución del transporte de humedad hacia los Andes	559
11.6.10 Disminución del aporte de agua atmosférica a los páramos y glaciares y amenaza al suministro de agua y la calidad del aire en las ciudades Andinas	563
11.6.11 Alteración del chorro superficial de Suramérica y amenaza al suministro de agua y la calidad del aire en la cuenca del río de La Plata	564
11.6.12 Pérdida del embalse forestal e intensificación de los eventos hidrológicos extremos	566
11.6.13 Colapso de la bomba biótica de humedad atmosférica	567
11.7 ¿Cómo detener la deforestación?	568
11.7.1 Imponer el cumplimiento de la ley	569
11.7.2 Redefinir nuestra relación con la naturaleza y alcanzar los ODS	569
11.7.3 Adoptar la biotecnología como el motor desarrollo socioeconómico y ambiental de Colombia	571
11.7.4 Fijar ya una meta nacional de deforestación cero y penalizar la deforestación	572
11.7.5 Frenar la reforestación con monocultivos y restaurar los ecosistemas	573
11.7.6 Implementar una ciencia y un sistema económico honestos con el medio ambiente	573
11.7.7 Avanzar en el desarrollo e implementación de la jurisprudencia ambiental	574

11.7.8 Exigir a los gobernantes y a los decisores un compromiso serio para resolver las crisis ambiental y climática	575
11.7.9 Tener presente que está en juego un tema de equidad intergeneracional	575
11.7.10 Involucrar el conocimiento ancestral en la discusión y la pedagogía ambiental	575
11.8 El panel científico por la Amazonia	576
11.8.1 Origen y objetivos	576
11.8.2 Informe de evaluación	578
11.8.3 Principales mensajes del informe SPA	579
11.8.4 Recomendaciones del SPA: Cuatro acciones urgentes	580
11.8.5 El SPA en las redes sociales	580
12 HidroSIG	581
12.1 Introducción	581
12.2 Visualización	582
12.3 Base de datos	582
12.4 Herramientas de análisis	582
12.4.1 Análisis de variables climáticas	582
12.4.2 Interpolación	584
12.4.3 Análisis de modelos digitales de terreno	585
12.4.4 Estimaciones hidrológicas	585
12.4.5 Análisis temporales	586
12.4.6 Otras herramientas	587
12.5 Requisitos computacionales	588
Bibliografía	589
Índice analítico	670

Prefacio

La Hidrología es la ciencia del agua. La palabra proviene del griego $\nu\delta\omega\rho$, *hýdōr* (agua) y $\lambda\acute{o}\gamma\omicron\varsigma$, *lógos* (estudio). Como tal tiene ramificaciones en todas las disciplinas científicas. Específicamente, la hidrología tiene que ver con todos los aspectos del ciclo del agua en el medio ambiente natural, particularmente aquellos señalados por Brutsaert (2005):

- Los procesos del agua continental, es decir, los procesos físicos y químicos a lo largo de las distintas trayectorias del agua en los continentes (sólida, líquida, gaseosa) en todas las escalas, incluyendo los procesos biológicos que influyen en el ciclo del agua.
- El balance hídrico global, propiamente los rasgos espaciales y temporales de los flujos de agua entre todos los compartimentos del sistema global (atmósfera, océanos y continentes), además de las cantidades de agua almacenada y los tiempos de residencia en dichos depósitos de agua.

La hidrología estudia las propiedades y los procesos que hacen parte del ciclo hidrológico, incluyendo aquellos que involucran el agua en la atmósfera, como la formación y dinámica del vapor de agua, la lluvia, la nieve, el hielo, el granizo, la evaporación desde cuerpos de agua, desde el suelo y desde la superficie de las hojas de las plantas, y la transpiración por las estomas de las plantas. También estudia los procesos que involucran la dinámica del agua en el suelo, como la humedad del suelo, la infiltración, la percolación, las aguas subterráneas y sus interacciones con las aguas superficiales, el transporte del agua en las laderas y en los canales de los ríos, los caudales de los ríos, el agua en los casquetes de nieve y hielo (glaciares y criósfera), y sus relaciones con el agua en los océanos, en los acuíferos, en la biósfera, etcétera. La hidrología también se ocupa de las tareas de prevención y protección contra eventos extremos (inundaciones y sequías), el suministro de agua para diversos propósitos, incluyendo el consumo humano, la irrigación, la generación de energía eléctrica, la salud humana, la recreación, y los temas relacionados con la calidad y la contaminación del agua.

Por razones históricas, la necesidad de dar respuestas a problemas prácticos hizo prosperar la ingeniería hidrológica, pero paradójicamente retrasó el desarrollo de principios científicos fundamentales de la hidrología. Además de la urgencia asociada con las necesidades prácticas, otras razones explican tal desarrollo asimétrico de la hidrología:

- Durante el siglo xx, los principios hidrológicos fueron desarrollados con base en la experimentación en escalas de laboratorio o en parcelas pequeñas. Este entendimiento de los componentes individuales del ciclo hidrológico en escalas pequeñas y de laboratorio es común en los cursos de hidrología de pregrado y posgrado.

- A mayores escalas espacio-temporales, muchos desarrollos de la hidrología se apoyaron en relaciones empíricas, tales como simples métodos de regresión o modelos de caja negra, que no propician el entendimiento de la dinámica de los procesos físicos relevantes.
- La modelación de procesos hidrológicos se ha apoyado principalmente en el conocimiento y las mediciones realizadas en pequeñas escalas, mientras que muchos problemas ingenieriles requieren información, análisis y predicciones a escalas espacio-temporales mucho mayores. Esta disparidad entre escalas espaciales y temporales se ha tratado de superar mediante parametrizaciones empíricas y calibración de modelos. Como resultado se da una desconexión entre las fluctuaciones y la variabilidad que exhiben las observaciones de distintos tipos de procesos hidrológicos en distintas escalas, con el entendimiento de los procesos en escalas pequeñas y los modelos a escalas mayores. Tal estado de la ciencia y la ingeniería hidrológicas requiere nuevas miradas, más aún al enfrentar los retos que plantean los temas del agua, incluyendo los efectos del cambio climático, la deforestación y los cambios en los usos del suelo.
- Los procesos biogeofísicos exhiben alta complejidad, entendida como un estado de intrincación y entrelazamiento entre las partes interactuantes de la estructura y función de un sistema (Chaisson, 2015). En las escalas mayores, los procesos hidrológicos están acoplados a través de retroalimentaciones positivas y negativas. Esto significa que las causas y los efectos no son unidireccionales, sino de doble vía. La no linealidad es más la regla que la excepción en los acoplamientos entre los fenómenos hidrológicos, geofísicos, químicos y biológicos. Recientemente han surgido nuevos enfoques para describir la evolución de sistemas complejos que interactúan en múltiples escalas. Tales enfoques han surgido en campos tan diversos de física, ecología, biología, geociencias, mecánica de fluidos, matemáticas, teoría de probabilidad, sistemas dinámicos no lineales, mecánica estadística y computación, entre otros. La diferencia más importante es el reconocimiento de que no es posible entender muchas propiedades importantes de los sistemas naturales estudiando el comportamiento individual de sus componentes de forma aislada. Se requiere un entendimiento integrado, particularmente al considerar los fenómenos emergentes en diferentes escalas de espacio y tiempo, y los procesos de autoorganización.

Además de enfrentar estos retos, la hidrología debe avanzar en dar respuestas a las preguntas fundamentales que impone el cambio climático causado por la acción humana, dado que ya estamos en el Antropoceno (Prillaman, 2010), una nueva era geológica en la que los humanos estamos dejando una huella discernible a escala planetaria, que se manifiesta en el calentamiento global y en muchas otras dimensiones ambientales y ecosistémicas, y causada por el agotamiento, la degradación y la contaminación de la base de recursos naturales y de los sistemas de soporte de la vida (Crutzen y Stoermer, 2000; Ripple *et al.*, 2017; Steffen *et al.*, 2011; Syvitsky, 2012; Syvitsky y Kettner, 2011; Zalasiewicz *et al.*, 2011), al punto de que el ser humano está causando la sexta gran extinción masiva de seres vivos (Ceballos y Ehrlich, 2018). Una de las consecuencias del calentamiento global y la deforestación es la alteración del ciclo hidrológico en escalas espaciales que van desde la local hasta la global, y sus consecuencias en la intensificación y aumento de la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, y en los cambios en los balances de agua en distintas escalas espaciotemporales. Estos retos enfatizan el carácter del agua como el gran recurso natural, pero también como amenaza por excesos y déficit, más aún ante la demanda creciente para todos los propósitos impuesta por el aumento de la población.

Adicionalmente, durante las últimas décadas se ha avanzado en el entendimiento de los efectos de la variabilidad climática natural en distintas escalas de tiempo, y sus efectos en todas las variables del ciclo hidrológico. El caso paradigmático es sistema El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por su sigla en inglés), y sus impactos sociales, ambientales, ecológicos y económicos en todo el planeta.

La deforestación y los cambios en los usos del suelo también imponen amenazas y retos fundamentales a la estabilidad e integridad de los ecosistemas por su impacto sobre los ciclos de agua, energía y carbono, y por la destrucción de los hábitats naturales que provoca la pérdida de biodiversidad. El recurso agua puede convertirse en un recurso no renovable por problemas de cantidad y calidad. Las investigaciones que dieron

lugar a este libro fueron realizados por los autores durante más de tres décadas, con la colaboración de profesores, colegas y estudiantes en Colombia y en el exterior. Entre ellos queremos agradecer a Darío Valencia Restrepo, Pedro Juan Restrepo, Ricardo A. Smith, Andrés Ochoa, Adriana Pulgarín, Alejandra M. Carmona, Alejandra Isaza, Alejandro Jaramillo, Álvaro Jaramillo, Anastassia Makarieva, Andrés F. Hurtado, Andrés F. Borja, Antonio D. Nobre, Axel Kleidon, Blanca A. Botero, Brian Mapes, Camilo Carvajal, Carlos A. Nobre, Carlos Sierra, Carlos E. Puente, Carlos C. Hoyos, Catalina Góez, Cécile Penland, Clara I. Villegas, Claudia C. Rave, Daniela Posada, David Dawdy, David Raymond, David Sauchyn, Diana I. Quevedo, Diana M. Álvarez, Ed Waymire, Edicson Pulgarín, Edier Aristizábal, Elizabeth Arango, Ernesto Roldán, Estefanía Muñoz, Felipe Álvarez, George J. Huffman, George Kiladis, Gladys Bernal, Henry Díaz, Hernán A. Moreno, Hernán D. Salas, Jessica Gómez, Jesús D. Gómez, Jhan C. Espinoza, Jheison A. Urzola, Joanny Sánchez, Johanna Yepes, John F. Mejía, John Gash, Jorge Amador, Jorge M. Ramírez, José E. Salazar, José F. Jiménez, Juan D. Giraldo, Juan D. Pérez, Juan F. Salazar, Juan F. Álvarez, Juan Mauricio Bedoya, Julián E. Morales, Julián Rojo, Jürgen Kurths, Ketty Pineda, Kevin Trenberth, Liliana Jaramillo, Liliana Vallejo, Lina A. Acevedo, Lina I. Ceballos, Luis Alejandro Builes, Luis F. Carvajal, Luis F. Salazar, Luz Adriana Acosta, Luz Adriana Cuartas, Maik Renner, Manuel D. Zuluaga, Manuela Rueda, Manuela Velásquez, Marcelo Barreiro, María I. Montoya, María V. Vélez, Mariano Masiokas, Marta María Gil, Meiry Sakamoto, Miguel Mahecha, Murugesu Sivapalan, Natalia Quiceno, Nick Graham, Olga Janeth Barco, Ólver O. Hernández, Óscar A. Estrada, Óscar A. Rueda, Óscar D. Álvarez, Paola A. Arias, Paola A. Roldán, Paula Agudelo, Patricio Aceituno, Paula L. Correa, Peter Bunyard, Peter Furey, Peter R. Waylen, Peter van Oevelen, René Garreaud, Ricardo Mantilla, Roy Rasmussen, Sandra Castro, Sara C. Vieira, Sara M. Vallejo, Scott Peckham, Silvana López, Stefan Hastenrath, Terzio Ambrizzi, Tom Over, Verónica Botero, Víctor Peñaranda, Vijay K. Gupta, Viktor Gorshkov, Viviana Urrea, Vladimir Toro, Walter A. Petersen, William Rojas y Yuley Cardona.

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia, la Facultad de Minas y el Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, así como la colaboración de muchas instituciones y entidades, entre las cuales se destacan Colciencias, Fundación Alejandro Ángel Escobar, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Unidad de Planeamiento Minero-Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía, Ideam, Cenicafe, Empresas Públicas de Medellín, Isagen, Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), National Center for Atmospheric Research (NCAR), Centro de Hidrología y Ecología (Wallingford, Reino Unido), Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), Comisión Europea, International Development Research Center (IDRC) de Canadá, proyecto Global Energy and Water Exchanges (Gewex), Climate Hazards Group, US Geological Survey (USGS), US Agency for International Development (Usaid), National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el Instituto Max Planck de Biogeoquímica (Jena, Alemania).

Finalmente, los autores agradecen el apoyo de la Editorial de la Universidad Nacional de Colombia, en particular el cuidadoso trabajo de revisión editorial por parte de Laura Camila Acosta-Uzeta, Judy Andrea Coronado Castro, John Fredy Guzmán, Julián Arcila-Forero y Liliana Guzmán.

Introducción

Como se menciona en el prefacio, es necesario entender, modelar y predecir (por las razones correctas) los fenómenos y las variables que hacen parte del ciclo hidrológico natural en un amplio rango de escalas de espacio y tiempo. En la figura 1 se muestra el ciclo natural del agua, ignorando las influencias humanas.

A partir del entendimiento del ciclo del agua en condiciones naturales será posible entenderlo, modelarlo y predecirlo en relación con las intervenciones humanas que están alterando la cantidad y la calidad del agua a escalas planetaria, continental, regional y local. La figura 2 muestra la dinámica de las distintas componentes del ciclo hidrológico y las diversas fuentes de alteración e intervención por parte de los seres humanos.

Ante estos retos, varios hitos han marcado la evolución de la hidrología como ciencia en las décadas recientes. El primero es la publicación del reporte *Opportunities in the Hydrologic Sciences* (OHS) (NRC, 1991) por parte del Consejo Nacional de Investigaciones (NRC, por su sigla en inglés) de Estados Unidos en 1991, que definió la hidrología como la ciencia que estudia los procesos de las aguas continentales y el balance hidrológico global, y sus interfaces con los procesos físicos, químicos y biológicos en un rango amplio de escalas de espacio y tiempo (NRC, 1991, p. 4). El reporte OHS, más conocido hoy como el *Libro Azul*, definió una agenda de investigación y docencia que aún hoy sigue vigente como un marco conceptual sólido para avanzar en el entendimiento, la modelación y la predicción de los fenómenos hidrológicos.

A su vez, la hidrología también está asociada de manera fundamental con fenómenos que tienen relaciones directas con el bienestar de los sistemas humanos y los sistemas naturales. De hecho, tal como lo ha anotado T. Dunne, la ciencia hidrológica seguirá siendo vital solo si: 1) descubre nuevos fenómenos, procesos o relaciones que gobiernan el comportamiento del agua y de sus constituyentes, y (2) si se concentra en fenómenos hidrológicos reales, tales como las inundaciones, las sequías, las cuencas hidrográficas, los flujos y almacenamientos de agua, y aun los efectos de proyectos de ingeniería de gran escala, tales como la modificación de caudales, la conservación de suelos o la modificación de los cauces (NRC, 1998).



Figura 1. Dinámica de las distintas componentes del ciclo hidrológico natural, incluyendo depósitos de almacenamiento y flujos de agua en sus distintas fases líquida, sólida y gaseosa
 Fuente: U.S. Geological Survey (USGS) (2023).

El segundo hito lo constituyó la publicación del reporte *A Framework for Reassessment of Basic Research and Educational Priorities in Hydrologic Sciences*, también conocido como el Reporte WEB (*Water, Earth and Biota*) (Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (Cires), 2000). El Reporte WEB aborda el papel central que juega el agua para vincular el paisaje, la atmósfera y los océanos, la geoquímica y la biota, en escalas espaciales que van desde la molecular hasta la planetaria, y temporales desde la escala instantánea hasta la geológica. La perspectiva de las interconexiones en múltiples escalas es necesaria para lograr un entendimiento integral de la complejidad de los procesos naturales y de los cambios causados por las interacciones entre los sistemas naturales y los sistemas humanos. El Reporte WEB también identifica caminos fundamentales de investigación y docencia para el avance teórico y aplicado de la hidrología. En este contexto hemos desarrollado las investigaciones plasmadas en este trabajo, en relación con la hidrología de Colombia y su variabilidad espaciotemporal.

De otra parte, diversas iniciativas lideradas por la Asociación Internacional de las Ciencias Hidrológicas (IAHS)¹ han enfrentado muchos de estos retos:

- La predicción de los procesos hidrológicos en cuencas sin información o con información escasa (Problema PUB, por las siglas en inglés de *prediction in ungaged basins*), desarrollada durante la década 2003-2012, con el propósito de reducir la incertidumbre en los pronósticos hidrológicos.

¹ Para mayor información puede consultar la página <https://iahs.info/>

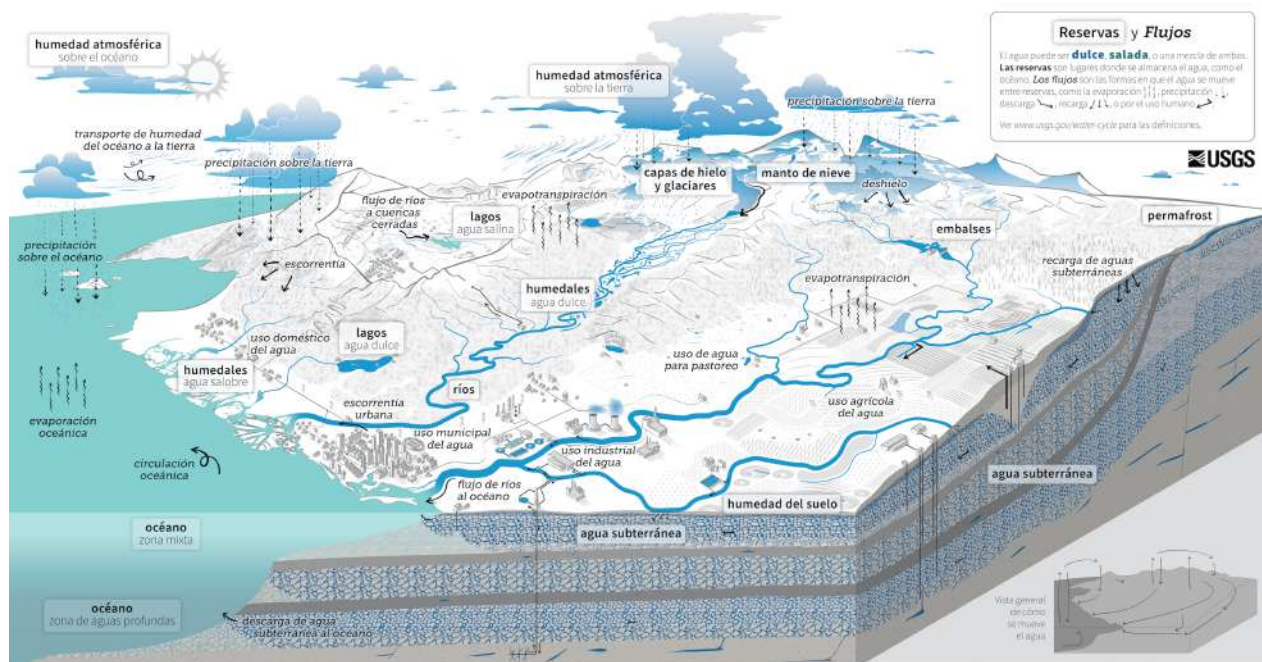


Figura 2. Dinámica de las distintas componentes del ciclo hidrológico natural y las distintas fuentes de uso e intervención por los seres humanos
 Fuente: U.S. Geological Survey (USGS) (s.f).

- La década 2013–2022, denominada "Panta Rhei - Todo Fluye", fue dedicada a desarrollar actividades de investigación sobre los cambios en la hidrología y en la sociedad. Tuvo como propósito alcanzar una mejor interpretación de los procesos que gobiernan el ciclo hidrológico concentrándose en la dinámica de su cambio en conexión con los cambios acelerados impuestos por los seres humanos (Montanari et al., 2013).
- La lista de los 23 Problemas No Resueltos en Hidrología (Blöschl et al., 2019), una iniciativa motivada en la necesidad de dar más coherencia a los esfuerzos de investigación en hidrología y para contribuir a la tarea de largo plazo de desarrollar nuevas teorías en hidrología.
- La década 2023-2033, dedicada a las Soluciones del Agua, denominada HELPING - *Hydrology Engaging Local People IN one Global world*, para:
 - Acelerar la comprensión de los vínculos entre los procesos hidrológicos a escala local y global y su interacción con los recursos hídricos.
 - Colaborar con científicos y sociedades locales para aprender de la experiencia local, las diferencias en los procesos hidrológicos y el cambio en todo el mundo, y transferir soluciones a escala mundial.
 - Sintetizar la comprensión hidrológica en todo el planeta y apuntalar la gestión de las crisis actuales encontrando soluciones holísticas para mitigar las crisis futuras.

Desde la perspectiva local, la localización tropical de Colombia en la esquina noroccidental de América del Sur define rasgos hidrológicos, climáticos, ecológicos y geomorfológicos muy singulares derivados de: 1) los altos gradientes topográficos que imponen las tres cordilleras que cruzan a Colombia de suroeste a noreste, 2) la dinámica hidro-climática y ecológica en las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco, 3) la influencia de los patrones de circulación atmosférica sobre el mar Caribe y los océanos Pacífico y Atlántico circunvecinos y 4) fuertes mecanismos de retroalimentación entre los procesos hidrológicos que ocurren entre el suelo, la vegetación y la atmósfera (Poveda et al., 2006).

Además de la complejidad natural, otros obstáculos han dificultado el avance de la ingeniería hidrológica en Colombia: 1) falta de información espacio-temporal de las variables hidrológicas más relevantes, 2) información limitada en espacio y tiempo, 3) falta de metodologías apropiadas para predecir los procesos hidrológicos en ecosistemas tropicales y 4) costo prohibitivo de los datos hidrológicos, meteorológicos y climáticos, una política nefasta y equivocada que mantuvo el Ideam por muchos años y que le hizo mucho daño a la investigación científica en Colombia, afortunadamente ya corregida, así como el alto costo de las licencias comerciales para el uso de sistemas de información geográfica. Tal situación es la regla general en el mundo en desarrollo.

Este libro avanza en el estudio, entendimiento y cuantificación de los principales aspectos de la hidrología de Colombia, fuertemente entrelazada con su climatología, su ecología y su biogeoquímica, y con diversos mecanismos dinámicos y termodinámicos de la circulación atmosférica y oceánica. El capítulo 1 hace una revisión de los contextos global y continental que enmarcan la hidrología de Colombia. Se discuten ideas relevantes del sistema climático del planeta, sus retroalimentaciones y escalas, y su variabilidad espacio-temporal. Ese capítulo estudia el contexto y el significado de la variabilidad natural del clima de la Tierra y aborda el tema del calentamiento global y el cambio ambiental global, causados por las acciones humanas. Adicionalmente, tal capítulo estudia los balances promedios de largo plazo de agua y energía del planeta, y examina su variabilidad latitudinal y en distintas escalas de tiempo, y discute además el importante papel de las nubes en tales dinámicas. Además, se abordan de manera general algunos de los mecanismos más relevantes de la circulación atmosférica global, incluyendo el ciclo anual de traslación de la Tierra, las celdas de Hadley y de Walker, la zona de convergencia intertropical (ZCIT), entre otros temas.

El capítulo 2 discute los principales mecanismos de forzamiento hidroclimático en Colombia, incluyendo el ciclo anual de rotación de la Tierra alrededor del Sol, la ZCIT, el Chorro del Chocó, las corrientes en chorro superficiales del Caribe, de la Orinoquia-Amazonia y de media atmósfera, el balance de humedad atmosférica, los sistemas convectivos de mesoescala, la topografía y su papel en la localización del denominado *óptimo pluviométrico*, las retroalimentaciones entre los Andes y la Amazonia, las interacciones que ocurren en la interfaz suelo-atmósfera, poniendo de presente la enorme amenaza de la deforestación para el desarrollo sostenible y socioeconómico de Colombia. Además, se discuten los principales mecanismos de la variabilidad climática de Colombia a la escala de tiempo intraanuales, haciendo énfasis en las oscilaciones intraestacionales de 40-50 días (o de Madden-Julian) y las ondas tropicales del Este, que constituyen la cuna de los huracanes sobre el Atlántico Tropical Norte y el mar Caribe.

En el capítulo 3 se cuantifica el balance hídrico superficial de largo plazo, en cualquier sitio de la red hidrográfica del país. Para ello se usa un modelo digital del terreno, sobre el cual se traza la red de canales usando metodologías modernas de cartografía computacional. Para la estimación del balance hídrico de largo plazo, se estiman los campos (mapas) promedios anuales de precipitación, evapotranspiración real y potencial, y escorrentía, a una resolución espacial de 5 km. Para propósitos de estimación se implementan metodologías geoestadísticas de interpolación, que incluyen diversas variantes del método de Kriging, las cuales se apoyan en información *in situ* de precipitación en más de 1200 estaciones de medición, así como información de intensidad de la precipitación obtenida por el satélite de la Misión de Medición de la Lluvia Tropical (TRMM, por la sigla en inglés de *Tropical Rainfall Measuring Mission*) (Kummerow *et al.*, 1998). Para la estimación de los campos promedios de largo plazo de evapotranspiración real y potencial, se implementan varios métodos conocidos en la literatura, y también se usan las herramientas de Kriging para la construcción de los campos interpolados. Varios de los métodos de estimación de la evapotranspiración requieren información distribuida de diversas variables hidroclimáticas (temperatura, radiación, presión de vapor, etc.), cuyos mapas también se construyen en este trabajo. Así mismo, se reportan también los trabajos de Álvarez (2007) y Álvarez *et al.* (2011) en relación con la cuantificación de la incertidumbre asociada con la estimación de los campos hidrológicos promedios de largo plazo sobre toda Colombia. Este es un requisito obligatorio de cualquier estudio de variables distribuidas en el espacio. Los trabajos mencionados también involucran la estimación de incertidumbre en la estimación del área de drenaje de las cuencas hidrográficas a partir de modelos digitales de terreno, y su influencia en el cálculo de la incertidumbre en la estimación del balance hídrico

de largo plazo, así como los caudales promedios de largo plazo de todos los ríos de la red hidrográfica del país. Además, se usan nuevos criterios para cuantificar la bondad de estimación de los campos hidrológicos obtenidos.

En el capítulo 4 se presenta la reconstrucción de los campos de precipitación mensual para Colombia y sus alrededores para 1975–2006, a una resolución espacial de cinco minutos de arco (aproximadamente 9.3 km), con base en los trabajos de Hurtado (2009) y de Hurtado y Mesa (2014).

El capítulo 5 presenta un método novedoso para la estimación de caudales extremos (máximos y mínimos) de distintos periodos de retorno, una necesidad cotidiana en tareas de diseño hidrológico e ingeniería. El método propuesto para estimar los caudales extremos en cualquier punto de la red hídrica del país se basa en la ecuación de balance hídrico de largo plazo, en combinación con ideas provenientes de la teoría de escalamiento estadístico de caudales extremos con respecto al área de las cuencas. Se presentan mapas de caudales mínimos estimados mediante métodos de regionalización y mediante el método de la curva de recesión. Este capítulo se basa en los trabajos de Poveda *et al.* (2007a) y de Poveda *et al.* (2007b), y constituye un aporte a la solución del problema de predicción hidrológica en cuencas sin medición (Programa PUB), un tema fundamental del Programa Hidrológico Internacional de la Unesco. La originalidad y la importancia de estos aportes han sido reconocidos por la comunidad hidrológica internacional (Gupta *et al.*, 2007). Los análisis se efectúan a nivel nacional y para las cinco grandes regiones de Colombia. Adicionalmente, con base en las mismas ideas se presentan los resultados del método propuesto para estimar los percentiles de las curvas de duración de caudales diarios en las cinco grandes regiones de Colombia, para todo el periodo de registro, así como durante las fases del ENSO: El Niño, La Niña y normal.

En el capítulo 6 se examina la asociación existente entre diversos fenómenos macroclimáticos y el ciclo anual de lluvias, caudales, evapotranspiración, humedad del suelo y actividad de la vegetación en Colombia, con énfasis en las fases del ENSO. Se estudia la variación de las funciones de distribución de probabilidades (histogramas de frecuencias) de variables hidrológicas en Colombia durante las dos fases del ENSO, así como sobre los caudales y lluvias promedios de los distintos meses del año, y el efecto del ENSO sobre las curvas de duración de los caudales, así como sobre la humedad del suelo y la actividad de la vegetación. Otros fenómenos macroclimáticos que se estudian en relación con la variabilidad hidroclimática de Colombia incluyen la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), las temperaturas del océano Atlántico tropical, entre otros.

El capítulo 7 analiza la variabilidad del ciclo diurno de la precipitación en Colombia, usando información *in situ*, así como de información del satélite de la misión TRMM, ya referida. En particular, se hace énfasis en la variabilidad diurna de la precipitación sobre los Andes de Colombia, y se cuantifica el efecto de diversos fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo diurno de la precipitación, incluyendo las dos fases del ENSO, la Oscilación de Madden-Julian, las ondas del Este, los huracanes, y la posible influencia de las fases de la Luna. Así mismo, en este capítulo se implementan varias metodologías de estimación de tormentas de larga duración y alta intensidad, en particular a través de técnicas de estimación de las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), basadas en métodos modernos provenientes de la teoría de escalamiento temporal estadístico de la lluvia. Se obtienen expresiones analíticas y mapas regionales para las curvas IDF en Colombia.

El capítulo 8 hace una caracterización estadística de las lluvias sobre los Andes. Se trata de la aplicación de herramientas clásicas y modernas de la teoría de procesos estocásticos y de la teoría de la información, para cuantificar la extraordinaria variabilidad espacio-temporal de las lluvias en regiones montañosas tropicales.

El capítulo 9 discute los procesos de denudación del suelo y se presentan los resultados de la estimación de la erosión laminar sobre Colombia, usando la ecuación universal de pérdida de suelo. Se construyen mapas de erosividad de la lluvia, de erodabilidad en función de las texturas del suelo, del llamado *factor topográfico*, del factor de cobertura y manejo del suelo, y de la erosión laminar media anual de Colombia. En este capítulo también se presenta un procedimiento para estimar la susceptibilidad a los movimientos en masa.

En el capítulo 10 se presentan evidencias recientes sobre los impactos del cambio climático y del cambio ambiental en Colombia.

El capítulo 11 presenta estimaciones recientes de las tasas de deforestación y de fuegos en Colombia. Además, discute en detalle los principales impactos hidrológicos y climáticos de la deforestación en Suramérica tropical, y propone una serie de medidas, estrategias y programas para detener la deforestación en Colombia.

En el capítulo 12 se describe el *software* producido, HidroSIG, un sistema de información geográfico digital de la hidrología y climatología de Colombia (a una escala de 30 segundos de arco), y se incluye un manual de usuario para su utilización.

Pensamos que este trabajo constituye un aporte significativo para entender los procesos y los mecanismos biogeofísicos que controlan la variabilidad de la hidrología y la climatología de Colombia y sus regiones, en gran rango de escalas de espacio y tiempo. De este trabajo podrán beneficiarse estudiantes, profesores e investigadores, así como decisores y profesionales de diversas entidades gubernamentales, incluyendo varios ministerios y sectores (Ambiente, Agricultura, Salud, Energía, Vías y Transporte, Industria y Comercio, Riesgos y Desastres, entre otros), Parques Nacionales Naturales, así como los institutos de investigación del Sistema Nacional Ambiental (Sina) (Ideam, Alexander von Humboldt, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andréis (Invemar) e Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico John von Neumann (IIAP), corporaciones autónomas regionales, autoridades ambientales y de planificación territorial y de gestión del riesgo de desastres, decisores departamentales y municipales, así como la sociedad civil, el sector privado y las organizaciones no gubernamentales.