

**LAS AGUAS DE LA ORINOQUÍA COLOMBIANA
Y EL CAMBIO CLIMÁTICO**

JORGE ELIÉCER MARIÑO MARTÍNEZ

Las aguas de la Orinoquía Colombiana y el cambio climático / The waters of the Colombian Orinoquía and climate change / Mariño Martínez, Jorge Eliécer. Tunja: Editorial UPTC, 2023. 243 p.

ISBN (impreso) 978-958-660-782-7

ISBN (ePub) 978-958-660-783-4

Incluye referencias bibliográficas

1. Aguas Subterráneas, 2. Aguas Superficiales, 3. Cambio Climático 4. Cuenca del Río Orinoco, 5. Desafíos Ambientales

(Dewey 558/21)(THEMA RB - Ciencias de la Tierra/Geociencias)



Uptc
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia



Rector, UPTC

Enrique Vera López

Comité Editorial

Dr. Carlos Mauricio Moreno Téllez

Dr. Jorge Andrés Sarmiento Rojas

Dra. Yolima Bolívar Suárez

Mg. Pilar Jovanna Holguín Tovar

Dra. Nelsy Rocío González Gutiérrez

Dra. Ruth Maribel Forero Castro

Dr. Óscar Pulido Cortés

Mg. Edgar Nelson López López

Editor en Jefe (e)

Dr. Óscar Pulido Cortés

Coordinadora Editorial

Andrea María Numpaque Acosta

Primera Edición, 2023

50 ejemplares (impresos)

Las aguas de la Orinoquía Colombiana y el
cambio climático

The waters of the Colombian Orinoquía and
climate change

ISBN (impreso) 978-958-660-782-7

ISBN (ePub) 978-958-660-783-4

Colección Investigación UPTC N.º 01

Proceso de arbitraje doble ciego

Recepción: diciembre de 2022

Aprobación: abril de 2023

© Jorge Eliécer Mariño Martínez, 2023

© Universidad Pedagógica y Tecnológica de
Colombia, 2023

Libro financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Dirección de Investigaciones y CIFAS de la UPTC. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 del 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Impreso y hecho en Colombia - Printed and made in Colombia

El libro es producto del proyecto de investigación COLCIENCIAS-UPTC: Modelo hidrogeológico conceptual e isotópico de la sabana estacional de Paz de Aripuro, Casanare, Colombia. SGI 1869

Mariño Martínez, J. E. (2023). *Las aguas de la Orinoquía Colombiana y el cambio climático*. Editorial UPTC.

DOI: <https://doi.org/10.19053/9789586607827>



Facultad Seccional Sogamoso

Director de la Colección

Jorge Enrique Espíndola Díaz, Ph.D.

Director Centro de Investigación y Extensión
- CIFAS

Subcomité Especializado de Evaluación de Obras de la Facultad Seccional Sogamoso

Héctor Antonio Fonseca Peralta, M.Sc.

Liliana Fernández Samacá, Ph.D.

Luis Alfonso Moreno Corredor, Ph.D.

José Javier González Millán, Ph.D.

Karol Lizeth Roa Bohórquez, M.Sc.

Corrector de Estilo

Giseth Alexandra López López

Diseño y Diagramación de la Colección

Vivian Andrea Espíndola Carvajal

David Leonardo Pérez Avella

Libro N.º. 01

Las opiniones vertidas en los textos son de
entera responsabilidad del autor.

Editorial UPTC

La Colina, Bloque 7, Casa 5

Avenida Central del Norte No. 39-115, Tunja,

Boyacá

comite.editorial@uptc.edu.co

Imprenta

Búhos Editores Ltda.

Tunja - Boyacá

RESUMEN

La cuenca del río Orinoco u Orinoquía es una zona con abundante agua y sinónimo de riqueza, belleza y biodiversidad. Por la importancia de dicha cuenca, este libro se centra en determinar la relación entre, las aguas de superficie, las aguas subterráneas o del subsuelo y los cambios climáticos que el planeta está experimentando. Para esto se utilizaron diversos métodos y herramientas desde la medición de caudales de agua de los ríos, pozos, aljibes y aún de la precipitación; pasando por, pruebas de pozos, análisis de suelos, radiografía geofísica del subsuelo, y análisis químicos, con el fin de determinar la litología de las rocas que la contienen, la composición química e isotópica de sus aguas y así entender su calidad, orígenes y correlaciones. Aunque la Orinoquía se relaciona con abundante agua, en los últimos años se perciben desafíos que podrían poner en peligro dicha abundancia: la ampliación de la agro-industria, el aumento de la exploración de los hidrocarburos, el aumento de la población, y el cada vez más presente cambio climático que trae consigo un clima cada vez más impredecible, olas de calor más fuertes, sequías e inundaciones más severas. Finalmente, esta investigación hace una reflexión sobre cómo el aprovechamiento de los abundantes recursos de la cuenca está causando cambios significativos en el entorno que se constituyen en amenazas sobre los mismos recursos naturales, y que presentan nuevos desafíos ambientales sobre los frágiles ecosistemas, y sobre los servicios ambientales que podrían prestar; y como resultado, están impactando la calidad de vida de los habitantes de la Orinoquía.

Palabras clave: cuenca del río orinoco, cambio climático, aguas superficiales, aguas subterráneas, desafíos ambientales.

ABSTRACT

The Orinoquia or Orinoco river basin is an area with abundant water and it is a synonym of wealth, beauty and biodiversity. Because of the importance of this Basin, this book focuses on determining the relationship between surface water, groundwater and the climate changes the planet is experiencing. Several methods and tools were used to do this, from the measurement of water flows from rivers, wells, shallow wells and even precipitation; well tests, soil analysis, geophysical radiography of the subsoil, and chemical analysis, in order to determine the lithology of the rocks that contain it, the chemical and isotopic composition of their waters and thus understand their quality, origins and correlations. Although the Orinoquia region is related to abundant water, in recent years there are perceived challenges that could jeopardize such abundance: The expansion of agro-industry, the increase in hydrocarbon exploration and population, at the same time, the increasingly present climate change that brings an unpredictable climate, stronger heat waves, droughts and severe rainfall with floods. Finally, this research reflects on how the use of the abundant resources of the basin is generating significant changes in the environment that constitute threats to the natural resources themselves, and that are generating new environmental challenges to fragile ecosystems; also, the use of the resources is risking the environmental services they could provide, and as a result, they are impacting the quality of life of the inhabitants of the Orinoquia region.

Key words: orinoco river basin, climate change, surface water, groundwater, environmental challenges.

PREFACIO

La cuenca de la Orinoquía es la tercera más caudalosa del mundo y tan grande que ocupa una cuarta parte de Suramérica. Cientos de ríos, miles de caños y humedales hacen de la cuenca del río Orinoco, una zona con abundante agua y sinónimo de riqueza, belleza y biodiversidad. Por la importancia de dicha cuenca, este libro se centra en determinar la relación entre, las aguas de superficie y las aguas subterráneas o del subsuelo, con los cambios climáticos que el planeta está experimentando.

En concordancia con lo anterior, se utilizaron diversos métodos y herramientas desde la medición de caudales de agua de los ríos, pozos, aljibes; así también, se hizo uso de los datos de precipitación, pasando por pruebas de pozos, análisis de suelos, radiografía geofísica del subsuelo, hasta análisis químicos, con el fin de determinar la litología de las rocas que la contienen, igualmente, de la composición química e isotópica de sus aguas y, gracias a ello poder comprender su calidad, orígenes y correlaciones.

Aunque la Orinoquía se relaciona con abundante agua, en los últimos años se perciben desafíos que podrían poner en peligro dicha abundancia: La ampliación de la agro-industria, el aumento de la exploración de los hidrocarburos y de la población, y el talón de Aquiles de la humanidad, el siempre presente cambio climático que trae consigo un clima más impredecible, con olas de calor más fuertes y precipitaciones con inundaciones más severas. La adición de todos estos desafíos podría llevar a sequías y retos por la disponibilidad del agua.

La abundancia de recursos naturales, especialmente, de hidrocarburos, arroz, palma africana y ganadería, están creando una dependencia nacional mayor en dichos recursos, y, por lo tanto, mayor expectativa sobre el incremento de la actividad económica. El aprovechamiento de esos recursos está generando cambios significativos en el paisaje; lo cual representa una amenaza latente sobre los recursos naturales.

En este sentido, es evidente que hay nuevos desafíos ambientales sobre los frágiles ecosistemas, y sobre los servicios ambientales que podrían prestar, y como resultado, se estaría impactando la calidad de vida de los habitantes de la cuenca de la Orinoquía.

Esta nueva propuesta se centra en revisar y analizar cuáles son los impactos relacionados con los cambios climáticos en las aguas de la Orinoquía, dado que el planeta está experimentando, como consecuencia de las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentos de sequías, inundaciones, y demás catástrofes ambientales que impactan de manera negativa al ser humano y a otras especies; entonces, es claro que, estos cambios climáticos drásticos, ya están afectando la cuenca y que lo harán con más ímpetu en el futuro cercano.

En el Capítulo 1, se presenta la geografía de la Orinoquía en cifras, además de algunas generalidades teóricas sobre las aguas especialmente las subterráneas. En el Capítulo 2 se presentan los aspectos básicos sobre el cambio climático que ayudan a entender el porqué se está dando el calentamiento. Como el clima es tan complejo; en el Capítulo 3 se aborda una a una las variables que afectan las fluctuaciones climáticas. Ahora bien, en el Capítulo 4, se explica cuánta agua entra a la Orinoquía por precipitación y qué porcentaje de la misma recarga los acuíferos.

Por otro lado el Capítulo 5, mediante el uso de isótopos, permite probar las diferentes hipótesis sobre la conexión entre el agua de los páramos y los acuíferos de la sabana. Enseguida, el Capítulo 6, determina las características hidráulicas de los acuíferos y la calidad de las aguas subterráneas de la Orinoquía.

La mejor manera de ver el impacto antrópico sobre un área es a través de los análisis multitemporales de la cobertura; por lo tanto, el Capítulo 7 analiza en detalle tres zonas de la Orinoquía donde se ha detectado un fuerte impacto antrópico en las últimas décadas.

En los capítulos 8, 9 y 10 se analizan los retos y posibilidades relacionadas entre el agua, la agricultura, la ganadería y los recursos minerales.

Además, los capítulos 11 y 12 plantean posibles soluciones a la decreciente disponibilidad de agua y al posible almacenamiento de CO₂ como mayor causante del efecto invernadero. De otro lado, el Capítulo 13 ilustra detalles de un plan de cambio climático elaborado especialmente, para la Orinoquía (PRICCO), y que contrasta la actual situación del clima, sus escenarios, proyecciones y tendencias para toda la región al año 2040. Por último, el Capítulo 14 privilegia la discusión sobre los desafíos y oportunidades de la Orinoquía hacia el futuro cercano, bajo un escenario de mayor actividad antrópica y de cambio climático.

La magnitud, belleza y riqueza hídrica de la Orinoquía, se resume en la forma como la describieron los primeros españoles que la visitaron, tal como lo reporta el Instituto Humboldt (2016):

“y si de allí del paraíso no sale (el río Orinoco), parece aun mayor maravilla, porque no creo que sepa en el mundo de río tan grande y tan fondo” Cristóbal Colón.

“La esplendidez y la magnificencia de los Llanos no puede comprenderse sino viéndolos. La pluma es impotente, las palabras y las frases son inadecuadas, y todas las descripciones demasiado pálidas para dar a conocer este inmenso territorio que, semejante a la mar en calma, se extienden hasta donde la vista no alcanza, y confunde sus límites con la bóveda azulada en el horizonte.” (Rivero, 1736, p. 55)

Un “Mar dulce” dentro de un “paraíso terrenal”, cubierto por una riqueza fáunica. Gumilla en 1745.

RECONOCIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento por el apoyo económico y logístico de la UPTC, COLCIENCIAS (ahora MinCiencias) y Corporinoquía a través del proyecto de investigación titulado: Modelo Hidrogeológico Conceptual e Isotópico de la Sabana Estacional de Paz de Ariporo, Casanare, Colombia (Contrato 005 de 2016).

También manifiesto reconocimiento y agradecimiento a los investigadores y estudiantes que aportaron información y comentarios a este proyecto: Héctor Fonseca, Oscar García, Germán Herrera, Alberto Ángel, Claudia López, Patricia Puerto, Heiner Chaparro, Linda Caro, Carlos Benavides, Yeison Calvo, Adriana Castro, David Chaparro y María Paula Torres.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN A LAS AGUAS DE LA ORINOQUÍA	1
1.1 ¿Qué es la Orinoquía?	
1.2 Generalidades sobre el agua	
2. ASPECTOS BÁSICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	17
3. FLUCTUACIONES CLIMÁTICAS Y SUS EFECTOS	27
3.1 Factores que controlan el clima	
3.2 Vientos, lluvia y precipitación	
4. BALANCE DE AGUAS EN LA ORINOQUÍA	37
4.1 Metodología del balance de aguas	
4.2 Resultados y análisis	
4.3 Conclusiones a partir del balance de aguas	
5. LA CONEXIÓN ENTRE LA ORINOQUÍA Y LA CORDILLERA ORIENTAL, ORIGEN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS A PARTIR DE ISÓTOPOS	51
5.1 Metodología isotópica	
5.2 Resultados	
5.3 Análisis	
6. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUÍFEROS	65
6.1 Medición de los niveles de los pozos de agua	
6.2 Radiografía del subsuelo – tomografías	
6.3 Características hidráulicas de los acuíferos – pruebas de bombeo	
6.4 Determinación de la calidad del agua subterránea	
6.5 Permeabilidad de los suelos y recarga de los acuíferos	
6.6 Análisis	

7. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL - DEFORESTACIÓN	87
7.1 Análisis multitemporal de Paz de Ariporo	
7.2 Análisis multitemporal de la cuenca de aporte del río Cravo Sur	
7.3 Análisis multitemporal de la isla del Charo (Saravena, Arauca)	
7.4 Conclusiones y recomendaciones	
8. EL AGUA Y LA AGRICULTURA	109
8.1 La agricultura de la Orinoquía en cifras	
8.2 El agua y la agricultura	
8.3 Oportunidades	
8.4 Retos	
8.5 Conclusiones	
9. EL AGUA, LA GANADERÍA Y LA CULTURA LLANERA	123
9.1 El agua y la ganadería	
9.2 Oportunidades	
9.3 Retos	
9.4 Implicaciones (reflexiones) sobre la cultura llanera	
9.5 Conclusiones	
10. EL AGUA Y LA MINERÍA (PETRÓLEO, GAS Y OTROS MINERALES)	137
10.1 Afectación de las aguas por las actividades petroleras	
10.2 Logros	
10.3 Retos	
10.4 Otros minerales	

11. PROPUESTAS FRENTE A LA ESCASEZ DE AGUA: ÁREAS PROTEGIDAS Y ALMACENAMIENTO DE AGUA	149
11.1 Áreas protegidas	
11.2 Almacenamiento del agua en el subsuelo – recarga artificial de acuíferos	
11.3 La cosecha de agua – almacenamiento de agua en superficie	
12. ALMACENAMIENTO DE CO ₂ POR SILVICULTURA Y POR CAPTURA DE CO ₂ (CCS)	167
12.1 Almacenamiento de CO ₂ y agua por los bosques (silvicultura)	
12.2 Captura y almacenamiento de CO ₂ en el subsuelo (CCS)	
12.3 Conclusiones	
13. ESCENARIOS FUTUROS DEL AGUA DE LA ORINOQUÍA – AÑO 2040	179
13.1 Escenarios, proyecciones y tendencias climáticas de la Orinoquía a 2040	
13.2 Modelación del escenario de las aguas subterráneas de Yopal a 2040	
14. DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES	193
14.1 Desafíos	
14.2 Oportunidades	
14.3 Análisis final	
REFERENCIAS	211
ANEXO: LAS MARAVILLAS DE LA ORINOQUÍA	221

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Orinoquía colombo-venezolana.....	3
Figura 2. Departamentos que conforman la Orinoquía colombiana.....	4
Figura 3. Ciclo del agua.....	8
Figura 4. Río Cusiana en Santa Helena de Cusiva (Maní-Casanare).....	10
Figura 5. Un aljibe es un indicador del nivel freático del acuífero libre.....	11
Figura 6. Bloqueo de la radiación solar por las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero).....	18
Figura 7. Porcentaje de emanaciones de GEI por distintos emisores en Colombia y en la Orinoquía.....	20
Figura 8. GEI relacionados con emanaciones fugitivas del grupo de agricultura y ganadería.....	21
Figura 9. Esteros casi secos durante la sequía de Casanare en 2013-2014.....	25
Figura 10. Ubicación de la Orinoquía al norte de Sudamérica entre el trópico de Cáncer y la línea del Ecuador.....	28
Figura 11. Sierra nevada del Cocuy-Güicán. Nevado Ritacuba Blanco a 5410 m.s.n.m.....	29
Figura 12. Aspecto de las sabanas durante la época seca.....	31
Figura 13. Dirección contraria del viento en los meses de enero (izquierda) vs. julio (derecha).....	34
Figura 14. Histogramas resumen del comportamiento mensual multianual de las lluvias (azul) y de la temperatura (amarillo) en las sabanas inundables (localización en la Figura 2).....	35

Figura 15. Norte de la Orinoquía donde se hizo el balance de aguas.....	38
Figura 16. Precipitación y temperatura promedio en la estación de Paz de Ariporo de enero a diciembre.....	39
Figura 17. Contraste entre la precipitación anual vs. precipitación en periodo seco.....	43
Figura 18. Precipitación promedio anual en la estación de Paz de Ariporo desde 1995 hasta 2014.....	43
Figura 19. Temperatura anual promedio en Paz de Ariporo vs. La temperatura media en periodo seco.....	44
Figura 20. Contraste entre la evaporación promedio anual vs. la evaporación en período de estiaje.....	45
Figura 21. Bloque diagrama resumen de los componentes que actúan en la ecuación del ciclo hidrológico en el norte de Casanare.....	48
Figura 22. Mapa de precipitación anual para Colombia, período 1976-2000.....	49
Figura 23. Ubicación de las traversas o recorridos de muestreo en las cuencas de los ríos Casanare/Guachiría, Cravo Sur y Cusiana en los departamentos de Boyacá y Casanare.....	52
Figura 24. Empobrecimiento isotópico de las nubes desde el océano hacia el continente.....	54
Figura 25. Puntos de muestreo a lo largo de la cuenca de los ríos Casanare-Guachiría, Cravo Sur y Cusiana en los departamentos de Boyacá y Casanare.....	56
Figura 26. Comparación de los valores delta (δ) de ^2H vs. ^{18}O , en la travesa a lo largo del río Cravo Sur (temporada de lluvias), comparado con la línea meteórica de Colombia de Rodríguez (2004).....	59

Figura 27. Modelo que muestra el fraccionamiento isotópico de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ desde las llanuras de Casanare hasta la cordillera Oriental en Colombia.....	62
Figura 28. Modelo conceptual que relaciona la infiltración de aguas subterráneas en las montañas, el piedemonte y las sabanas de Casanare.....	64
Figura 29. Ubicación de las sabanas estacionales donde se hicieron los estudios niveles freáticos y permeabilidad en Paz de Ariporo.....	66
Figura 30. Disminución y desecación de los humedales durante la época seca en la Orinoquía.....	67
Figura 31. Medición, ubicación y perfil esquematizado de registro de niveles freáticos.....	69
Figura 32. Tomografía y perfil litoestratigráfico de la vereda Caño Chiquito.....	71
Figura 33. Presencia de areniscas silíceas con niveles de limo en CañoChiquito.....	72
Figura 34. Tomografía y perfil litoestratigráficos de la vereda Centro Gaitán....	73
Figura 35. Prueba de bombeo en un pozo utilizando una sonda eléctrica. Se grafica el Cambio de nivel o abatimiento (s) vs. Tiempo (t) a caudal constante.....	75
Figura 36. Esquema hidrogeológico representativo.....	76
Figura 37. Diagrama de Schöeller-Berkaloff para temporada de lluvias, agosto (2017).....	79
Figura 38. Mapa de la recarga potencial (R) para el norte de la Orinoquía colombiana.....	84
Figura 39. Presencia de depósitos eólicos cuaternarios (Qpde) o médanos en Casanare.....	85
Figura 40. Ubicación de las zonas de estudio en el análisis multitemporal de Paz de Ariporo (Casanare).....	90

Figura 41. Pastos y bosques en las llanuras inundables.....	91
Figura 42. Bosques de galería (caño La Hermosa) y estero en Paz de Ariporo.....	93
Figura 43. Comparación de la cobertura terrestre de Paz de Ariporo entre los 1986 y 2016.....	95
Figura 44. Listado de los contribuyentes al cambio de los bosques de galería-sabana.....	96
Figura 45. Ganancias (verde) y pérdidas (rojo) de los bosques de galería en Paz de Ariporo entre 1986 y 2016.....	97
Figura 46. Contraste de la cobertura vegetal en la cuenca del río Cravo Sur entre 1985 y 2009.....	101
Figura 47. Relación gráfica por Km ² de la cobertura vegetal ente 1985 y 2009.....	102
Figura 48. La isla del Charo en el río Arauca al norte de Saravena (Arauca)....	104
Figura 49. Monocultivos de arroz en la Orinoquía.....	109
Figura 50. Perfil de la Orinoquía que muestra: la cordillera a la izquierda desde los páramos hasta el piedemonte, la llanura inundable entre el piedemonte y el río Meta en el centro, y la altillanura a la derecha.....	111
Figura 51. Cultivos de palma en la Orinoquía.....	114
Figura 52. Llanero y ganado en el corazón de la cultura llanera.....	123
Figura 53. Sistema Silvopastoril, bosques y ganadería combinados.....	131
Figura 54. Exploración petrolera en la Orinoquía.....	138
Figura 55. Mapa de bloques de hidrocarburos (exploración-explotación) comparado con el gráfico de compromiso de uso del suelo en Casanare.....	146

Figura 56. Ubicación de áreas protegidas y reservas naturales privadas.....	152
Figura 57. Trabajos de llano con participación de turistas en el hato-reserva La Aurora.....	154
Figura 58. Paisajes llaneros en el Hato Palmarito.....	155
Figura 59. Esquema de recarga de acuíferos libres superficiales utilizando canales y balsas.....	162
Figura 60. Recolección del agua lluvia que cae al techo y es conducida hasta un tanque de almacenamiento.....	163
Figura 61. Los árboles almacenan CO ₂ y producen oxígeno (O ₂).....	168
Figura 62. Los bosques almacenan y filtran al agua, para luego liberarla en épocassecas.....	169
Figura 63. Tala de bosques para ganadería (creación de potreros).....	170
Figura 64. Cuatro formas diferentes de entrampamiento geológico.....	174
Figura 65. Columna estratigráfica que muestra las rocas a profundidad de la Cuenca Llanos.....	175
Figura 66. Probabilidad de eventos extremos en la Orinoquía bajo las condiciones climáticas actuales.....	180
Figura 67. Cambios o anomalías proyectadas con la temperatura máxima y la precipitación.....	182
Figura 68. Abanico de la ciudad de Yopal y pozo de agua subterráneo.....	185
Figura 69. Precipitación media anual en Yopal.....	189
Figura 70. Resultados de la sequía del Casanare, 2013-2014.....	197
Figura 71. Ampliación de la frontera agropecuaria en la Orinoquía.....	198



Figura 72. ...aguas que lloviendo vienen...aguas que lloviendo van...
en la Orinoquía.....199

Figura 73. Densidad baja de los bosques en la Orinoquía.....203

Figura 74. Ecosistemas colombianos que están más bajo amenaza.....206



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Drenaje o permeabilidad (K) y su correlación con la textura de suelos equivalentes.....	82
Tabla 2. Principales escenarios de cambio entre 1986 y 2016.....	98
Tabla 3. Número de hectáreas de cultivos industriales en la Orinoquía de 2009 a 2019.....	115
Tabla 4. Efectos ambientales relacionados con la producción de hidrocarburos.....	140
Tabla 5. Diferentes métodos y sistemas de recarga artificial.....	160
Tabla 6. Proyección del aumento del consumo de agua subterránea en Yopal 2020 a 2040.....	187
Tabla 7. Balance hídrico de agua subterránea en Yopal en milímetros/año.....	191
Tabla 8. Repartición de los requerimientos hídricos por sectores de consumo y por regiones.....	202

1. INTRODUCCIÓN A LAS AGUAS DE LA ORINOQUÍA

1.1 ¿Qué es la Orinoquía?

La cuenca del Orinoco, es decir, el territorio drenado por las corrientes de agua que fluyen hacia al gran río Orinoco, ocupa casi la cuarta parte de Suramérica y, está conformada por cientos de ríos, miles de arroyos, caños y quebradas.

Aproximadamente 90 ríos son afluentes directos por la margen izquierda –llegando de Los Andes y la llanura–, y cerca de 95 son afluentes por el margen derecho y se originan en el Escudo Guayanés en Venezuela (Instituto Humboldt, 2018). La Orinoquía colombo-venezolana se puede dividir de varias formas, la más utilizada es usando las formas del relieve y geología: (A) Cordillera, (B) llanura de sedimentación y (C) Escudo Guayanés (Figura 1).

A. La Cordillera. La Cordillera Oriental colombiana se extiende en Venezuela como cordillera de Mérida, y forma un marco al occidente y norte de la planicie de la Orinoquía. Estas montañas son barrera natural de las masas de agua evaporadas en el océano Atlántico, Amazonía, y los Llanos, que, forzadas por los vientos alisios, chocan en las altas montañas y vuelven desde allí a las planicies nutriendo los ríos llaneros.

B. La llanura de sedimentación. Entre los Andes orientales y las montañas (tepuyes) del Macizo Guayanés, se extiende una planicie de origen sedimentario, es decir, producto del transporte y acumulación de suelos por factores climáticos acontecidos en el Cuaternario (desde 600.000 hasta 10.000 años atrás). En Colombia, se conoce como los Llanos Orientales y ocupa la mayor extensión de la Orinoquía.

En su área de influencia encontramos diversidad de paisajes, entre los más grandes: la llanura inundable al norte del río Meta, la altillanura en el sur; y en el área de tránsito hacia los ecosistemas de selva húmeda tropical, encontramos un paisaje selvático con características amazónicas debido a sus condiciones climáticas y tipo de vegetación, en donde prevalecen los vientos alisios y lluvia presente varios meses al año (Instituto Humboldt, 2016).

C. El Escudo Guayanés. Ubicada “sobre” el Macizo o masa montañosa Guayanés, uno de los escudos o núcleos de las masas de los continentes más antiguos de la Tierra, que constituye gran parte del norte de Suramérica, y que se formó durante la separación del supercontinente Pangea.

Esta región geológica se originó en el Precámbrico, hace 2 mil millones de años, ha sido modificada por movimientos de placas terrestres, que han ayudado a formar extensas planicies en las que se ve el substrato rocoso antiguo, o se encuentra oculto por delgadas capas de arena o sedimentos.

El tiempo, los movimientos sísmicos, el viento y la lluvia, entre otros factores, producen erosión en el Escudo, lo cual genera saltos y raudales en los ríos de la subregión. Estos mismos fenómenos también impactan otras superficies y crean planicies, montañas, islas, pequeñas serranías y mesetas.

Figura 1

Orinoquía colombo-venezolana



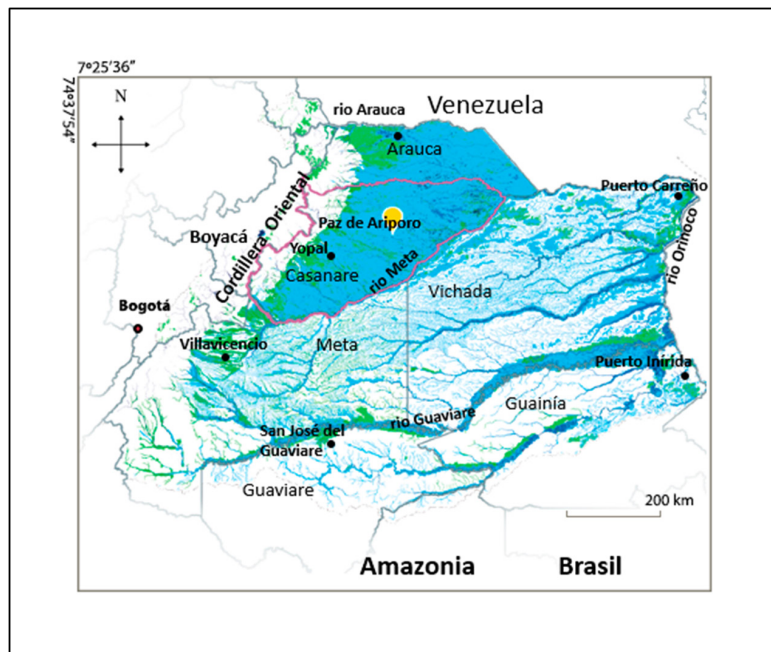
Nota. En la Orinoquía colombo-venezolana se observan tres grandes formas de relieve: La Cordillera (A), La llanura de sedimentación (B), y el Escudo Guayanés (C). Modificado de Instituto Humboldt (2016)

Orinoquía colombiana. La Orinoquía colombiana es conocida como los Llanos, se ubica al oriente del país entre la cordillera Oriental y Venezuela. Es una de las regiones naturales que ocupa gran extensión, pues abarca más de 250000 Km², lo que equivale, a la cuarta parte de la nación. Su topografía, principalmente plana, hace que más de las tres cuartas partes sean sabanas, algunas con humedales, y que la cuarta parte, está cubierta por bosques (Instituto Humboldt, 2016). Los departamentos centrales de la Orinoquía son Arauca, Casanare, Meta y Vichada. Otros departamentos como Guaviare, Guainía, Boyacá y Cundinamarca, parcialmente, hacen parte de la cuenca del Orinoco. La Figura 2 muestra los departamentos que conforman la Orinoquía con sus respectivas ciudades capitales.

A la cuenca del Orinoco también se le conoce como los Llanos Orientales, dado que, se identifica por sabanas casi horizontales. Su nombre también hace mención al río Orinoco que es el principal drenaje de esta región. La cuenca corresponde a una planicie, y en Colombia, está delimitada por los ríos Orinoco por el oriente, Guaviare por el sur, Arauca por el norte, y el piedemonte llanero por el occidente; siendo este último, la transición entre la Cordillera Oriental y la Orinoquía plana. En suma, la Orinoquía, se constituye como un polo de desarrollo energético, ganadero y agrícola del país y, está dividida en cuatro subregiones con características muy diferentes: 1) Orinoquía inundable, 2) piedemonte, 3) altillanura y 4) franja de transición.

Figura 2

Departamentos que conforman la Orinoquía Colombiana



Nota. Llanuras inundables en azul

1. Orinoquía inundable. Esta subregión está ubicada entre el río Meta y el río Arauca. No es una tierra apta para grandes cultivos agroindustriales ya que gran parte de su territorio se inunda durante la temporada de lluvias. Su actividad económica se centra en hidrocarburos y ganadería (Figura 2).

2. Piedemonte. Es el cinturón de conexión entre los llanos y el centro del país, y la transición entre las sabanas y la Cordillera Oriental. Comprende gran parte del costado occidental de Arauca, Casanare y Meta. Tiene casi dos millones de hectáreas y alberga el 65 % de la población de la Orinoquía. Tiene los suelos más fértiles, por lo que es la región más desarrollada de la Orinoquía.

3. Altillanura. Está ubicada entre el río Meta y el río Orinoco en el Vichada, principalmente, se perfila como la despensa alimentaria de Colombia, porque tiene cerca de 4 millones de hectáreas cultivables. No obstante, debe mejorar la infraestructura de acceso y la calidad de los suelos.

4. Franja de transición. Es la franja de transición entre la Orinoquía y la Amazonía y está ubicada al sur de los departamentos de Vichada y Meta, además, comprende parte del Guaviare y el Guainía. Es relevante, tener en cuenta que, su riqueza ecológica se ve amenazada por la minería ilegal.

La Orinoquía es sinónimo de riqueza, belleza, biodiversidad y coraje. A continuación, se detallan estos aspectos. En primer lugar, **La riqueza** de la Orinoquía ha hecho que la cataloguen como la región del futuro porque está generando cerca del 80 % de la producción nacional de gas, además, alrededor de la mitad ($\frac{3}{4}$) del petróleo, así también, ocupa la primera posición en cultivos de arroz, y alberga cerca del 20% del hato ganadero del país; por lo tanto, la convierte en una gran productora de carne, y la región con el mayor crecimiento en ganado vacuno y palma africana (Instituto Humboldt, 2018).

En segundo lugar, se encuentra **La belleza**, pues proviene de sus infinitas llanuras de todos los tonos de verde colmatados de agua, flora y manadas de fauna únicas que lo potencializan por su **diversidad**. El tercer aspecto que permite caracterizar esta bella región es el **coraje**, heredado de los valientes llaneros que, despojados de todo, decidieron las batallas clave de nuestra independencia y, del valor que debieron desplegar esos vaqueros para crear una cultura y sobrevivir en regiones tan apartadas e inhóspitas.

Ese verde infinito, receptor de todas las aguas, se encuentra ahora amenazado por las ocupaciones humanas relacionadas con la ganadería, la agricultura intensiva, la explotación de recursos minero-energéticos, y especialmente, por los cambios climáticos del planeta que, a pesar de las investigaciones, aún no terminamos de entender, predecir y, mucho menos controlar.

Así como esos llaneros encontraron el valor y la sagacidad para adaptarse y domar la naturaleza para sobrevivir, en consecuencia, a las generaciones actuales les corresponde tener el coraje y la inteligencia para prosperar a partir de sus recursos, al mismo tiempo, debe mantener el equilibrio de esos inmensos humedales.

En tanto que, las llanuras inundables de la Orinoquía son sinónimo de agua por doquier, por lo tanto, el entendimiento de sus aguas aéreas, superficiales y subterráneas es vital a fin de preservar el frágil equilibrio del mar verde del interior del norte de Sudamérica.

Por esta razón, el principal desafío de la Orinoquía está en el contraste que hay entre los meses de invierno, cuando cae tanta agua que inunda las llanuras de esta región, al punto que parece una gran laguna; el panorama cambia drásticamente, en los meses de verano, ya que estos se presentan intensos y con sequías prolongadas, en esta época la sabana adquiere un aspecto semidesértico. Ese equilibrio natural es delicado y puede ser desestabilizado por el cambio climático.

Como una pequeña contribución a lo mucho que seguimos sin entender de la Orinoquía, esta investigación se centra en pensar la simbiosis entre las abundantes aguas superficiales, las cada vez más utilizadas aguas subterráneas, y el cambio climático. Para este fin, se utilizaron diversos métodos y herramientas desde la medición de caudales de agua de los ríos, pozos, aljibes y aun de la precipitación, pasando por pruebas de pozos, análisis de suelos, radiografía geofísica del subsuelo, hasta análisis químicos, con el fin de determinar la composición química e isotópica de sus aguas y así entender su calidad, orígenes y correlaciones.

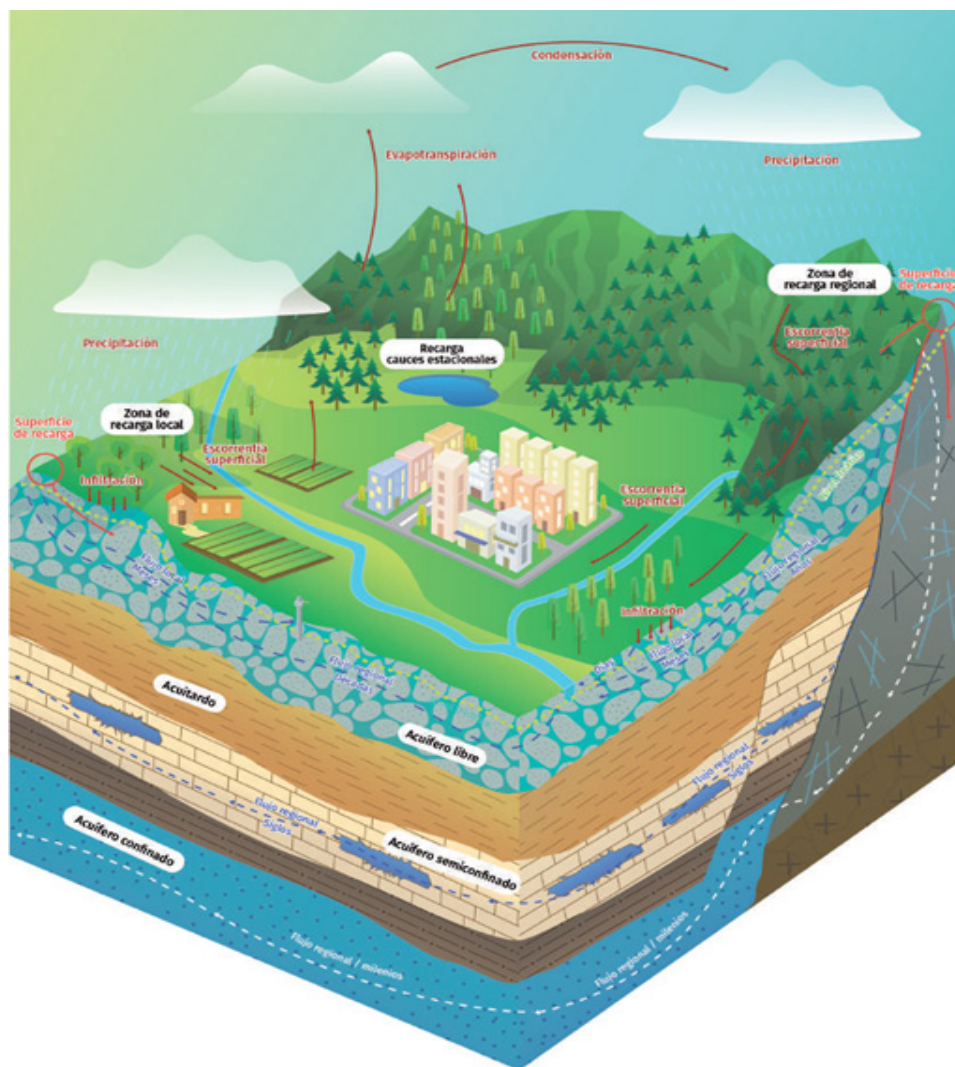
Todo esto, para comprender mejor los factores frecuentes asociados con los cambios climáticos que el planeta está experimentando, a saber: los incrementos de temperatura, las fuertes olas de calor y las inundaciones inusuales.

Para un mejor entendimiento de las sabanas inundables se toma como referencia la municipalidad de Paz de Ariporo (Casanare) lugar en el que se centraron los trabajos de campo (Figura 2).

1.2 Generalidades sobre el agua

A continuación se presentan algunas generalidades sobre la procedencia y la calidad del agua, con el fin de clarificar los conceptos básicos necesarios para comprender los siguientes capítulos que componen este texto. Las aguas hacen parte de un ciclo continuo de estados de agua que se presentan en la forma de: 1) aguas atmosféricas (evaporación, nubes, lluvia), 2) aguas superficiales (nevados, ríos, lagos, esteros) y 3) aguas subterráneas (acuíferos superficiales y profundos) (Figura 3).

Figura 3
Ciclo del agua



Nota. Ciclo del agua: evapotranspiración, precipitación (lluvia y nieve), escorrentía (ríos y caños) e infiltración (recarga de acuíferos). IDEAM (2019)

1. Las aguas atmosféricas. Estas aguas se encuentran en los tres estados: vapor de agua como en la niebla, líquido suspendido, lluvia, y en estado sólido en forma de nieve y hielo. Una vez que el agua atmosférica cae a la superficie, esta regresa a la atmósfera mediante el proceso de evaporación de las plantas, del agua de escorrentía sobre la superficie, y de la superficie de los ríos, lagos y del mar. El agua en forma de vapor por las corrientes de aire se condensa formando las nubes, para posteriormente retornar a la tierra como agua lluvia (Figuras 3 y 4, parte superior).

Cuando el agua regresa a la tierra en forma de lluvia se distribuye en diferentes formas: parte de ella se queda almacenada por algún tiempo en el suelo, la otra parte retorna a la atmósfera gracias a la evaporación y la transpiración, otra porción se desplaza sobre la superficie y se conoce como escorrentía, hasta que se incorpora a los cuerpos lenticos como lagos, ríos y mares; la parte restante se infiltra en el subsuelo a través de la tabla de agua para, finalmente, incorporarse a los acuíferos como agua subterránea (recarga de los acuíferos) (Figura 3) (SENA, 1990).

A medida que el agua viaja por el aire se le integran otros componentes: aspira gases como oxígeno y CO₂, y atrae material particulado, humo, bacterias, y contaminantes. Las aguas que se mueven en la atmósfera se diferencian por lo siguiente: falta de sales, riqueza de oxígeno, elevados porcentajes de CO₂.

2. Las aguas superficiales están compuestas por: aguas loticas que no están estancadas y se encuentran en movimiento: caños, quebradas y ríos; aguas lénticas que están relativamente estancadas (lagos y esteros) y aguas en forma sólida (nieve, granizo y hielo) (Figuras 4 y 11). Las aguas sólidas de los nevados cuando se derriten tienen las mismas características de las aguas de precipitación, y se evaporan, se incorporan como agua de escorrentía, o como agua de infiltración en los acuíferos (SENA, 1990).

Figura 4

Río Cusiana en Santa Helena de Cusiva (Maní-Casanare)



Las aguas cercanas a la superficie son más susceptibles a la contaminación por fenómenos naturales y antrópicos, al punto que pueden contaminarse y no ser aptas para el consumo dependiendo de: tipo de suelo, características de la vegetación, contaminación antrópica proveniente de ciudades o viviendas, químicos utilizados en agricultura, y contaminación relacionada con algas (lagos y embalses) (SENA, 1990).

3. Las aguas subterráneas se presentan de dos maneras diferentes: a) Aguas procedentes de la lluvia que se recargan y se almacenan profundamente (**acuífero confinado**), b) Otra parte de las aguas subterráneas no se recargan o infiltran profundamente, y fluyen verticalmente, de tal manera que, luego puedan encontrar una parte impermeable trasladándose, horizontalmente, cerca de la superficie (**acuífero libre**). Cabe resaltar que, la parte superior de los acuíferos libres se conoce como tabla de agua o nivel freático, y es la superficie que vemos en los aljibes. La tabla de agua está en contacto con la atmosfera a través del suelo ya que, la parte superior de este, no está saturado de agua (Figuras 3 y 5).

Figura 5

Un aljibe es un indicador del nivel freático del acuífero libre



El acuífero libre o freático tiene un flujo regional que semeja un río subterráneo lento, y cuando intercepta la topografía emana como manantial (SENA, 1990). Las aguas de manantial son claras sin olor y más duras que las aguas someras. Además, sus elementos químicos están relacionados con los terrenos contiguos y con la cercanía a la superficie (calcio, magnesio, hierro).

Las aguas subterráneas superficiales pueden contaminarse por la inadecuada ubicación de los sistemas de aguas servidas o pozos sépticos. Generalmente, en la Orinoquía, los acuíferos libres no están contaminados; pero, muestran una alta concentración de minerales, especialmente hierro y magnesio, que deben ser retirados con sistemas de aireación o con tratamientos químicos.

Algunos acuíferos profundos están sometidos a presión por las rocas impermeables que los supra yacen y el agua puede subir sobre la superficie sin la ayuda de sistemas de bombeo, cuando brotan sobre el nivel del suelo se conocen como pozos artesianos o saltantes, y, particularmente, se encuentran cuando se perforan pozos de agua en acuíferos confinados profundos (SENA 1990).

De todas las fuentes descritas (atmosféricas, superficiales, y subterráneas), proviene el agua para el uso domiciliario e industrial; por lo tanto, los usuarios utilizan el agua del origen más cercano y más dispuesto para su potabilización; esta fuente puede ser de las aguas de ríos y quebradas a través de un sistema de captación, o de las aguas subterráneas utilizando pozos con tubería y sistemas de bombeo.

Posteriormente, se lleva a los sitios de potabilización para su tratamiento físico-químico. Después del tratamiento, el agua pasa por un sistema de control de calidad que garantiza su potabilidad y, que, por lo tanto, puede ser llevada a los usuarios.

Una cuenca hidrográfica. Es una depresión geográfica en la que se tienen caños y quebradas cuyos caudales van a un río principal que recoge toda el agua de escorrentía de la cuenca. Los límites entre cuencas hidrográficas se conocen como parteaguas o divisorias de aguas, son divisiones topográficas ubicadas en las zonas altas que sirven de divisoria entre cuencas adyacentes.

Las cuencas hidrográficas son importantes, además, del punto de vista del agua, también desde la mirada de las condiciones climáticas, de los suelos, la flora y la fauna, ya que cada cuenca tiene sus particularidades. La cuenca hidrográfica de la Orinoquía colombiana es un buen ejemplo de una cuenca regional, ya que está delimitada por grandes ríos como Arauca, Orinoco, Guaviare, y Guainía, y por el piedemonte llanero al occidente o zona transicional entre la Cordillera y las llanuras de la Orinoquía (Figura 2).

Por esta razón, es fundamental que las corporaciones autónomas regionales (CAR) y las autoridades ambientales de los municipios estén vigilantes de las posibles fuentes de contaminación del agua para prevenir riesgos. Igualmente, deben educar de forma continua a la población sobre la cultura de conservación del agua, así como, abordar los aspectos legales relacionados con las infracciones a la legislación vigente (IDEAM, 2019).

Los desafíos más comunes que se exteriorizan en las cuencas de captación y que causan inestabilidad hídrica son causados primariamente por: 1) Mala utilización de los suelos (tala de árboles y quemas, sobrepastoreo, monocultivos sin rotación de los mismos, malas prácticas de drenaje, cultivos en zonas muy pendientes, mecanización y tala indiscriminada de los bosques. 2) Distintos tipos de contaminación industrial, de agroindustrias y de vertimiento de aguas servidas, emisiones activas y pasivas de gases y partículas, distorsión de los drenajes de agua, y explotación inapropiada de petróleo, gas y otros minerales. 3) Problemas relacionados con las invasiones ilegales de terrenos, que no cuentan con agua potable ni alcantarillado, construcción de invasiones y edificaciones en áreas inestables, el inadecuado manejo de los escombros y desechos domésticos, así como las construcciones desorganizadas que presentan altas concentraciones de residuos que, finalmente, llegan al drenaje más cercano.

En resumen, las consecuencias más notables por la contaminación y mal manejo de las cuencas hidrológicas son: 1) Incremento de sedimentación por aumento en los procesos erosivos, 2) disminución de la calidad del agua, 3) descenso de los volúmenes de agua en caños y ríos que afecta el volumen disponible para la población, y 4) enfermedades (cólera, tifoidea, disentería, hepatitis, amebiasis, etc.) (SENA, 1990).

Disposición del agua. Para que se pueda lograr una alta calidad del agua, es necesario hacer inspecciones sanitarias periódicas para reconocer los peligros latentes que pueden llegar a afectar la salud de la población de la región. Dichas inspecciones posibilitan la reducción de la presencia de enfermedades diarreicas, las infecciones en ojos y piel, las enfermedades relacionadas con virus y bacterias subyacentes al tratamiento y disposición final de las aguas negras. Las inspecciones técnicas también deben fomentar el mejoramiento de las costumbres higiénicas hogareñas.

Se puede señalar que, los ensayos de laboratorio son primordiales para definir la calidad de agua. Estos se dividen en tres grandes categorías: físicas, químicas y bacteriológicas. La primera, permite observar las **características físicas** del agua, las cuales pueden ser percibidas desde: temperatura, color, olor, sabor, y turbiedad.

La segunda, **las características químicas** del agua, estas se encuentran directamente relacionadas con los agregados químicos diluidos en ella, y que pueden alterar sus propiedades, dentro de las más comunes en la Orinoquía, halladas en el laboratorio para la calidad del agua, son: acidez, alcalinidad, pH, dureza, hierro, cloro residual, sulfatos, nitratos y fosfatos.

La tercera, comprendida por las **características bacteriológicas** las cuales están vinculadas con los virus, bacterias, parásitos, y protozoos que se diseminan en el agua como parte de los desperdicios de la actividad humana, pero también de los animales en establos y similares, por el hábito de los seres humanos de botar sus basuras a los ríos y quebradas.

Algo semejante ocurre, con las enfermedades adquiridas por el mal uso del agua, entre las que se resaltan: la diarrea, las infecciones cutáneas, el cólera, y la disentería.

Análisis. La Orinoquía siempre ha sido sinónimo de agua y, contiene tanta agua, que representa un 32,4 % del total de aguas de la nación (Instituto Humboldt, 2018). Hasta hace poco tiempo no eran frecuentes las sequías o los racionamientos de agua, pero la sequía de Paz de Ariporo y el racionamiento de agua en Yopal, han activado las alarmas de que se avecinan desafíos relacionados con la preservación de este líquido vital.

Existen algunos factores que indicarían que los desafíos relacionados con el “oro azul” podrían estar en camino: 1) El incremento de los monocultivos en la Orinoquía y, en general, de la agroindustria que consume la mayor parte del agua en una región, en algunos casos, sin los estudios previos que puedan prever el impacto. 2) El incremento de la exploración de hidrocarburos, lo que se refiere, específicamente, a la sísmica, perforaciones, y otras obras de infraestructura como carreteras. 3) Crecimiento poblacional por el boom de los dos primeros. 4) La deforestación, 5) El cambio climático con sus consecuencias como, clima impredecible, olas de calor más fuertes, y precipitaciones con inundaciones más severas.

La combinación de esos desafíos conseguiría poner a la Orinoquía en la lista de las regiones con problemas de agua. Por lo anterior, es necesario mantener un balance entre la producción y la conservación teniendo en cuenta las características singulares de esta región.

Actualmente, 1/3 de los países del planeta tiene problemas de agua, y se espera que a 2050 ese porcentaje se incremente a un 50 % (UPTC-Colciencias, 2018). Esto se debe al crecimiento poblacional, que paralelamente permea el crecimiento en el consumo de alimentos y servicios, especialmente en Asia, así también, es una consecuencia latente del cambio climático.

Según la DW, el crecimiento en el consumo no es solamente agua domiciliaria, sino que representa el consumo general que conlleva al aumento en todos los procesos, con preponderancia en la agricultura que consume cerca del 70% del agua (DW, 2021). Igualmente, con el crecimiento de la Orinoquía a todo nivel, especialmente en el consumo del agua, también disminuiría la disponibilidad de la misma.

Si a lo anterior se le suma que, el 70% del agua limpia ya está siendo utilizada, entonces se espera que en el futuro el agua sea más escasa y más costosa, y que pase a ser una mercancía negociada en bolsa y no un derecho universal; y que, por lo tanto, al regar la huerta o al tomar una ducha, en nuestra mente estaría rondando el costo de lo que implica utilizar dicha mercancía.

2. ASPECTOS BÁSICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Definición: El **cambio climático** que ha estado experimentando el planeta tierra se ha correlacionado con el aumento en la atmósfera de **gases de efecto invernadero** (GEI), con emisiones superiores a las que el espacio donde se desarrolla la vida conocida como biosfera y los mares pueden absorber.

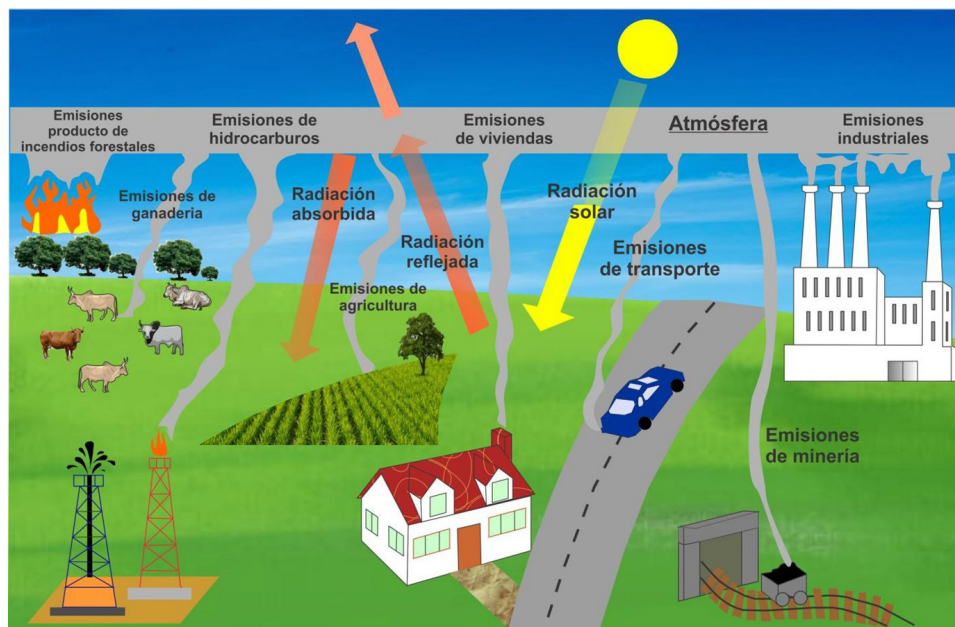
Dichos gases causan que la captura de radiación infrarroja en la atmósfera sea mayor a lo usual, y como resultado, causando el calentamiento o aumento global de la temperatura. La variabilidad climática, que consiste en las fluctuaciones de las condiciones predominantes en una zona, se diferencia del cambio climático en que en este último las condiciones predominantes son modificadas.

Los gases de efecto invernadero que más contribuyen al calentamiento son el CO₂ (dióxido de Carbono) y el CH₄ (metano). El gas metano se caracteriza por ser uno de los gases más agresivos, causantes del efecto invernadero, teniendo un poder de calentamiento global 20 - 30 veces más fuerte que el CO₂.

Los GEI operan como una barrera que absorbe y remite esa radiación infrarroja emitida por la tierra impidiendo que cierta porción de este calor se escape del planeta. Como resultado, la tierra se calienta, y en consecuencia de ello, sucede el calentamiento global más conocido también como cambio climático en el periodo reciente (Mariño y Chanci, 2020) (Figura 6).

Figura 6

Bloqueo de la radiación infrarroja por las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero)



Como resultado del COP 21 en París “Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático” (United Nations, 2015), las naciones signatarias, incluida Colombia, se responsabilizaron en gestionar de manera eficaz la medición, reporte y reducción de la emisión de los GEI para que la temperatura media del planeta, producto del calentamiento global, no supere los 2 °C para 2030, e incluso aunar esfuerzos para limitar el calentamiento global a 1.5 °C.

Según el IPCC (“Intergovernmental Panel of Climate Change” o grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático) que es una organización intergubernamental de las Naciones Unidas cuya misión es proveer una síntesis científica sobre el cambio climático.

Si la temperatura del planeta supera los 2 °C, los efectos serán catastróficos, tales como: aumento del nivel del mar (por derretimiento de glaciares, casquetes polares y dilatación térmica del agua) cambios de temperatura y precipitación, cambios en la agricultura, aparición de enfermedades tropicales, etc. Con este compromiso en mente, Colombia se ha responsabilizado en disminuir las emisiones en un 51 % para 2030 (IPCC, 1997; CAR, 2021).

Tipos de emisores de GEI: en Colombia, el IDEAM que es la oficina encargada de los asuntos climatológicos y ambientales, ha identificado en porcentaje los diferentes sectores que emiten GEI así: energía (que incluye fábricas y transporte) con un 44 %, le siguen la agricultura y otros usos del suelo con el 43 %, las basuras o residuos corresponde a un 8 %, y las fábricas o procesos industriales representan un 5 % (ver Figura 7) (IDEAM y PNUD, 2016; CAR, 2021).

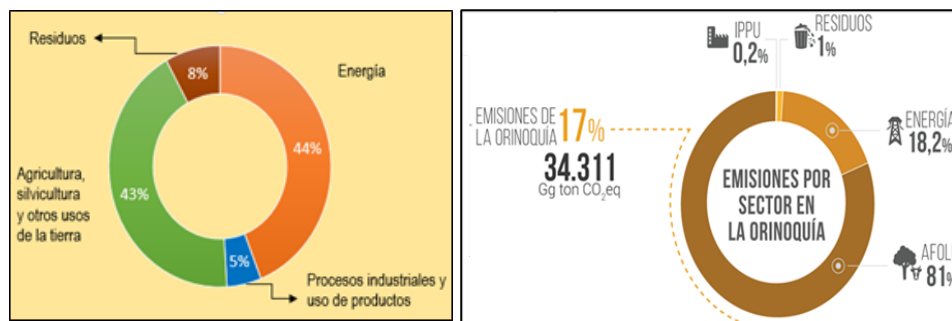
De otro lado, la oficina relacionada con el ambiente de Estados Unidos (EPA), determinó que la ganadería extensiva es una de las prácticas que más emite GEI, no solo por los gases producto de la digestión del alimento de las vacas, lo que genera metano (CH₄), sino también, por la tala y quema de bosques para abrir nuevos potreros, como consecuencia se produce dióxido de carbono (CO₂) (USEPA, 2016).

Dichas emisiones estarían alrededor de 14,5 %. La tala y quema de árboles se convierte en un ciclo perverso, porque al mismo tiempo que se aumenta el CO₂, se disminuye la producción de oxígeno (O₂) por la reducción indiscriminada de los árboles que son uno de los mayores productores de oxígeno.

Particularmente, en la Orinoquía toda la agroindustria, incluyendo el cambio de uso del suelo (AFOLI) emitiría alrededor del 81% del total de las emisiones de la región, lo que casi dobla en porcentaje a las emisiones de la agroindustria nacional (IPPU). A pesar de lo anterior, esta región solo contribuye al 17% de las emisiones nacionales (203 millones de toneladas CO₂eq) (Figura 7).

Figura 7

Porcentaje de emanaciones de GEI por distintos emisores en Colombia y en la Orinoquía



Nota. IDEAM y PNUD (2012) y CIAT (2014) IPPU=industria, AFOLI= agro-industria

Las emisiones de GEI se pueden agrupar en dos grandes grupos, por un lado, las activas y, por el otro, las pasivas. La primera, se presenta cuando hay una quema de combustible, un ejemplo de ello es lo que sucede en un horno de una industria o en una quema de bosques. La segunda, cuando no hay quema y, por lo tanto, no es tan visible que se estén emitiendo GEI. De esta manera, las emanaciones pasivas son distinguidas por el PICC como fugitivas.

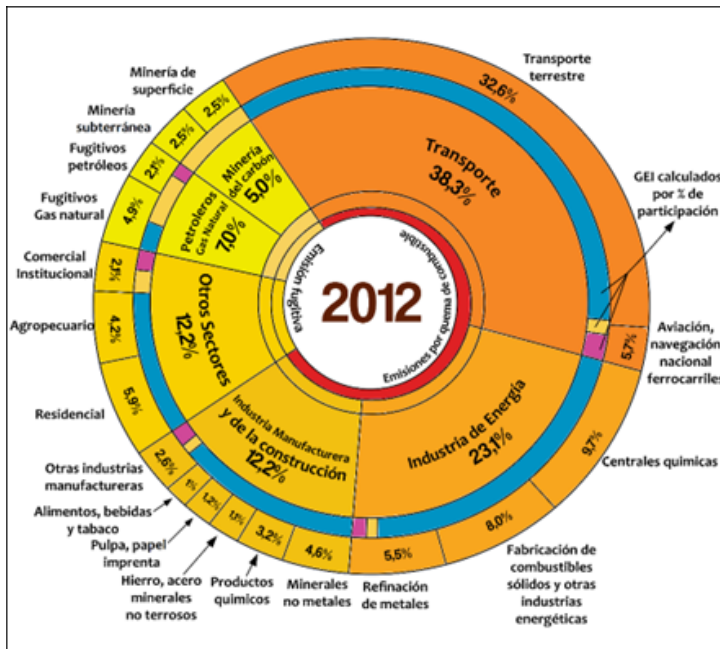
Las **emisiones fugitivas** son invisibles porque no hay ignición de materiales inflamables o combustibles, sino que se generan por la fuga de gases que están retenidos por la naturaleza y que se emiten a la atmósfera por la acción antrópica por motivo de actividades tales como: agropecuarias, residenciales, por la explotación de hidrocarburos, y por la minera (Figuras 6 y 8) (Mariño y Chanci, 2020).

Este es el caso de las emisiones de metano propagado por la flatulencia y eructos de las vacas y otros vacunos, dichas emisiones se producen de manera lenta y casi imperceptible porque el metano que emiten es invisible e inodoro. Lo que significa que, las emisiones

fugitivas de gas metano asociado al ganado bovino representan un porcentaje de los GEI relacionados con agricultura y ganadería que suman un 4,2 %. No obstante, también se generan emisiones pasivas en los cultivos que tienen que ser anegados con agua, tal como sucede con el arroz (Figura 8).

Figura 8

GEI relacionados con emanaciones fugitivas del grupo de agricultura y ganadería



Nota. IDEAM (2016)

Ante la sospecha de cambio climático por GEI, se acordó que cada país debe, además de mitigar desde sus políticas públicas, reportar las emisiones a partir de las disposiciones establecidas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC), en inglés IPCC, en donde cada gobierno debe tomar acciones para evitar aumentar en dos grados Celsius la temperatura del planeta para 2030.

En lo que a este tema respecta, Colombia como aspirante a ser un gran productor de cereales y otros monocultivos, y candidato a incrementar el hato ganadero, debe estar pensando en medir y reportar los gases relacionados con la ganadería y la agricultura, teniendo en cuenta que dichas emisiones de metano y CO₂ contribuyen en forma considerable a los GEI.

A continuación se presentan algunos argumentos que analizan las emisiones procedentes de las vacas. En el caso de Sudamérica, somos señalados, porque producir carne de vacuno demanda diez veces más terreno y emite 3 veces más GEI que en Europa o Estados Unidos debido a la tala de bosques y porque el ganado es alimentado con pasto y no con granos. En cuanto al porcentaje de proteína, algunos investigadores indican que la carne y la leche de los vacunos aportan entre el 18-37 % de las calorías y las proteínas, pero que utilizan más del 80% de las tierras cultivables y generan cerca del 60% de las emisiones de GEI relacionadas con la agricultura.

Si se consulta la documentación emitida por la oficina de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), la cría de ganado también sería uno de los principales productores de GEI, acción que representa al menos un 10% del total, incluso por encima de los automóviles. Se estima que las vacas expulsan más del 50% del óxido nitroso (su efecto invernadero es 300 veces mayor que el CO₂), cerca del 40% del CH₄ se relaciona a las actividades antrópicas y cerca del 70% del amoníaco que es asociado a la lluvia ácida (FAO, 2021).

Las vacas no solamente son grandes emisores de metano, sino que también degradan el suelo por las pisadas y contaminan el agua con la orina y el estiércol. En la actualidad, cerca de una tercera parte de la superficie terrestre se utiliza para alimentar y sostener ganado, sin tener en cuenta las tierras utilizadas para cultivar cereales, con el único fin de alimentarlo. Sin embargo, la mayor afectación ambiental viene de la deforestación que se causa en Latinoamérica a fin de generar potreros para el ganado.

En comparación con la producción de otras carnes como cerdo y aves, la carne de res requiere muchas más calorías, entre 3 y 4 veces más, para producir las mismas toneladas de carne. Lo mismo pasa con el consumo de agua, las reses requieren más agua que la que se utilizaría para criar pollos y cerdos juntos (National Geographic, 2021).

Además, el pastoreo excesivo causa daños al suelo a gran escala porque puede producir erosión y aun desertificación bajo condiciones de excesivo pastoreo. Ya se mencionó que la crianza de ganado requiere enormes cantidades de pasto y de recursos hídricos, que, en su lugar, se podrían utilizar para cubrir las necesidades alimenticias de la gente. Así también, hay que sumarle la contaminación de las aguas con los sobrantes de los nutrientes conocido como eutrofización. Los argumentos presentados han llevado a algunos ambientalistas a sostener que abstenerse del consumo de carne es parte de la solución de los cambios climáticos.

Cambio climático en la Orinoquía. Con la firma del acuerdo de París (COP21), el país ha aceptado el compromiso mundial de disminuir las emisiones de GEI a cantidades que impidan que la temperatura del planeta sobrepase los 1,5 °C, o peor aún, los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales. En consecuencia, Colombia se ha responsabilizado con disminuir en 51 % las emisiones a 2030.

Para alcanzar dicha meta, el Ministerio del Ambiente viene trabajando en un proceso técnico-político para involucrar al sector público y privado en modelos y escenarios de mitigación de largo plazo; esto ha permitido generar insumos para la formulación de la “Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono” (ECDBC), promoviendo la construcción de escenarios e identificando medidas de mitigación, mientras se comprometen los sectores en mediciones y metas específicas de reducción de GEI (Planes de Acción Sectoriales PAS) (CIAT et al., 2017).

En Colombia, la adaptación y mitigación son una prioridad, porque su ubicación dentro de la zona tropical la hace más vulnerable a los impactos. Por esta razón, y con los efectos ya descritos, se suma la vulnerabilidad propia de sectores rurales con recursos limitados. Dentro de los escenarios investigados, se destaca el plan liderado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), que intenta visualizar a futuro los escollos climáticos que afrontarán sectores claves como ganadería, agricultura, disponibilidad de agua, salud, infraestructura y servicios ecosistémicos (Capítulo 14) (CIAT et al., 2017).

Al analizar la evolución del desarrollo de las sabanas a través del tiempo, se puede decir que los llaneros han logrado implementar sistemas ganaderos de pastoreo basados en el uso adaptativo y aprovechamiento de la biodiversidad.

Quienes se dedican al pastoreo tradicional, que consiste en soltar el ganado en las sabanas naturales para recogerlo en la época de saca, se han adaptado al medio y han respetado la biodiversidad, al mismo tiempo se consideran como medio productivo para sus habitantes. Sus defensores agregan que el pastoreo extenso de esta ganadería, simplemente saca provecho de los pastos naturales de la sabana que son forrajes variados y nutritivos, paralelamente, se hace un manejo natural del agua, con un número bajo de cabezas por hectárea.

Sin embargo, este equilibrio parece estar rompiéndose porque en las últimas décadas la Orinoquía ha sido sobrecargada con nuevas economías como la exploración y producción de petróleo y gas, los cultivos agroindustriales de arroz y palma africana, entre otros, lo que ha generado grandes cambios paisajísticos y sociales ya que gran parte de la transformación se ha hecho sin planificación y sin gestionar la adecuada protección de la biodiversidad, así como, de los servicios ecosistémicos.

A pesar de su tamaño, la Orinoquía es frágil y su aprovechamiento debe corresponder a las características singulares de la región (Figura 9).

Figura 9

Esteros casi secos durante la sequía de Casanare en 2013-2014



Nota. Las sequías periódicas de la Orinoquía podrían ser más severas y frecuentes a raíz del cambio climático. IDEAM (2016)

En los siguientes capítulos se abordarán casos puntuales y regionales que relacionan el agua de la Orinoquía con el cambio climático. Particularmente, en los Capítulos 14 y 15, se presentan detalles de la situación actual del clima y los escenarios, proyecciones y tendencias para toda la región al año 2040 (CIAT, 2017). Sin embargo, en primer lugar, es necesario entender los factores que controlan el clima, tal como se explican en el siguiente capítulo.

3. FLUCTUACIONES CLIMÁTICAS Y SUS EFECTOS

El Instituto que maneja la información climática colombiana (IDEAM) ha definido el clima como: “El conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del estado del tiempo, durante un periodo de tiempo y un lugar o región dados, y controlado por los denominados factores forzantes, factores determinantes y por la interacción entre los diferentes componentes del denominado sistema climático (atmósfera, hidrosfera, litosfera, criósfera, biosfera y antroposfera)” (IDEAM, 2019).

Ahora bien, generalmente, el clima se asocia con los factores predominantes en la atmósfera, por lo que este es comprendido a partir de variables climáticas como la temperatura y la precipitación que, en el Capítulo 4, serán detallados para el caso de la Orinoquía; no obstante, estos no son los únicos componentes del sistema que controla el clima, como se explicará a continuación.

3.1 Factores que controlan el clima

El clima resultante es la fusión de la tendencia de: temperatura, humedad, presión atmosférica, vientos y precipitación, analizados en periodos largos de 30 años o más. Más allá de la precipitación, el clima está influenciado por: 1) la latitud, 2) la altitud, 3) la humedad, 4) la continentalidad, 5) la presión atmosférica; y otros factores como las corrientes marinas, los vientos y el relieve.

1) Latitud. La latitud es la ubicación de un punto con relación al Norte o Sur del planeta. Esta se mide desde la zona del Ecuador, y sus unidades varían desde los 0° en el Ecuador hasta los 90° N en el polo Norte o los 90° S en el polo Sur.

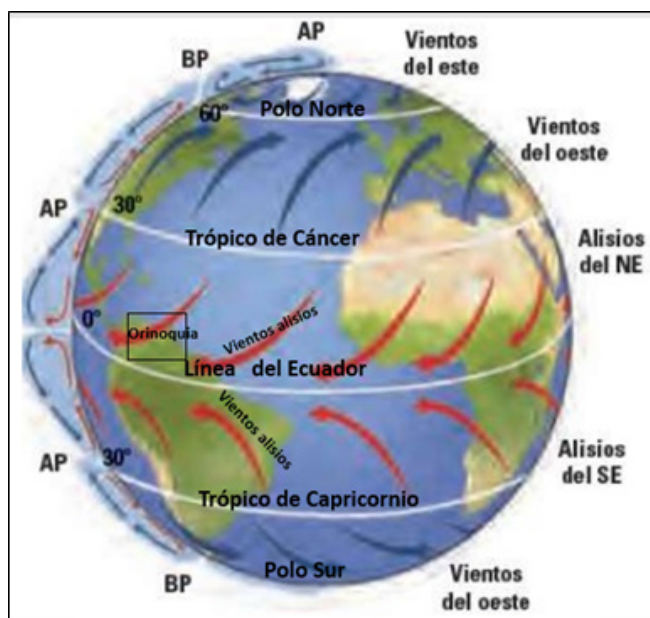
Bajo este contexto, la Orinoquía colombo-venezolana está ubicada desde 0° a 4° Norte (al sur del estado Amazonas en Venezuela, y departamento Guainía en Colombia) hasta los 10° Norte (en el estado

Delta Amacuro, Venezuela), es decir, se encuentra localizada en el cinturón intertropical de la Tierra cerca de la línea del Ecuador, y, por lo tanto, el clima es cálido tropical (Figura 10).

La posición de la Orinoquía hace que los rayos solares lleguen de manera perpendicular: 12 horas de sol al día todos los días del año. Sumada a los demás elementos (latitud, orografía, precipitación, etc.), esta condición determina la diferencia de paisajes y ecosistemas de esta región (IGAC, 1999).

Figura 10

Ubicación de la Orinoquía al norte de Sudamérica entre el trópico de Cáncer y la línea del Ecuador



La latitud o distancia de un punto a la línea del ecuador controla el ángulo de incidencia de los rayos solares durante el año, y de esta forma controla el número de horas de luz que recibe dicho punto, además de la radiación solar o cantidad de calor que recibe.

Como la Orinoquía está cerca del Ecuador, las horas de luz se mantienen casi constantes a lo largo del año, siendo los días un poco más largos en junio y un poco más cortos en diciembre, y no se presentan las estaciones. En las zonas más frías al sur y norte de los trópicos, la inclinación y la proximidad al Sol varían durante el año y, como resultado, se generan las estaciones (Instituto Humboldt, 2018). Aunque la zona intertropical también conocida como zona cálida hay diferentes temperaturas; en la Orinoquía, como en el resto de las zonas tropicales, la temperatura depende no solamente de la latitud, sino también de: la altitud, la humedad, la continentalidad y la presión atmosférica.

2. Altitud. La altitud o altura controla la presión y la temperatura en las zonas tropicales con respecto al nivel del mar. Lo que significa que existe un gradiente de altitud, es decir: entre más alto... más frío. En Colombia, el gradiente de altitud es de cerca de 1° C por cada 187 m de elevación con respecto al nivel del mar (IDEAM; 2019).

Dicho antecedente explica el porqué, aún en el trópico, la nieve y el hielo se presentan en alturas como la Sierra Nevada del Cocuy y Güicán (Figura 11). Por el gradiente de altitud, en este sentido, la Orinoquía posee nieves permanentes en las Sierras Nevadas, con una temperatura inferior a 0° C, en contraste con las sabanas del Casanare donde se alcanzan temperaturas de 30° C y más al medio día.

Figura 11

Sierra nevada del Cocuy-Güicán. Nevado Ritacuba Blanco a 5410 m.s.n.m.



3. Humedad. Esta se encuentra directamente relacionada con el porcentaje de vapor de agua que está presente en el aire. Por ejemplo, en un ambiente húmedo, el aire está saturado de agua y la evaporación disminuye, por lo que se suda menos y se siente más calor. En los sitios con humedad y temperatura altas, en las noches, se forman gotas o rocío por la disminución de la temperatura. La región de la Orinoquía presenta altos niveles de humedad, aunque como es bien conocido, estos niveles varían según la zona. En general, la región drenada por el río Orinoco tiene un rango de 60 a 80% de humedad.

4. Continentalidad. Es el efecto que tiene sobre el clima la distancia de un sector respecto a grandes volúmenes de agua como los mares. Entre mayor sea la distancia al mar, se presentan más cambios en la temperatura diaria y menos humedad (lluvia). Como la parte más interna de la Orinoquía está relativamente alejada del mar, se sospecha que un buen porcentaje de la humedad proviene de la cuenca del río Amazonas (UPTC, 2018).

5. Presión atmosférica. También conocida como el peso del aire, es decir, se concibe como el esfuerzo que ejercen los gases que conforman la **atmósfera** sobre cualquier ubicación en la Tierra. Con el incremento de la altitud, la presión atmosférica disminuye por el adelgazamiento de la **atmósfera**.

En las zonas de baja altitud, como las llanuras de la Orinoquía, la capa de aire o atmósfera es más gruesa, lo que impide que el calor se refleje y salga; así se concentra más y se calienta. El efecto es similar a lo que sucede dentro de un invernadero, retienen el calor que entra, y como resultado se eleva la temperatura en el interior (Figura 12).

Figura 12

Aspecto de las sabanas durante la época seca



Nota. En las sabanas neotropicales el calor es alto, llegando a generar un aspecto semidesértico durante la época seca

3.2 Vientos, lluvia y precipitación

La Orinoquía se encuentra en la zona intertropical, esto significa que, es la faja que esta entre los trópicos. Aunque los trópicos son líneas convencionales acordadas por el hombre, establecen un límite entre las zonas que reciben luz del sol más directamente durante el año y las que reciben menos por el carácter oblicuo de los rayos solares.

En concreto, como la Orinoquía se encuentra cerca de la línea imaginaria que divide el planeta en sur y norte, conocido como Ecuador o línea que separa a la Tierra en dos partes iguales, y al sur del Trópico de Cáncer, por lo tanto, recibe más calor al ser parte del trópico (Figura 10).

El clima en los trópicos depende no solamente de la ubicación geográfica, la latitud, la altitud, la presión y la humedad (mencionados anteriormente), sino también de los vientos y la precipitación o lluvia.

Los vientos. Los vientos son el producto del movimiento del aire en la **atmósfera**. Debido a la redondez de la tierra, el sol calienta más la zona tropical y menos al sur y norte de los trópicos; esas diferencias en temperatura, hacen que el aire frío se hunda por ser más pesado, mientras que el aire caliente sube por ser más liviano.

En los trópicos, las corrientes de aire que se forman a partir de la interacción de aire caliente y frío, se conocen como vientos alisios, estos son flujos de aire que se mueven desde los trópicos hacia el Ecuador, movilizándolo el calor desde los trópicos a los subtrópicos, al mismo tiempo que, sustituyen el aire caliente por aire frío procedente de otras latitudes más al norte y sur de los trópicos.

El movimiento de giro del planeta sobre su propio eje provoca movimientos curvos del aire atmosférico, que van en contravía con el movimiento de rotación de la Tierra que se desplaza de occidente a oriente. Como se observa en la Figura 10, los vientos alisios del noreste (NE) traen las nubes del este en dirección NE; por lo tanto, en el lado este de la Cordillera Oriental, los vientos alisios traen abundante humedad del este, ya que vienen saturados de agua desde el Océano Atlántico y desde la cuenca del Amazonas.

Por lo tanto, la Cordillera Oriental, que se transforma en la Orinoquía venezolana en la Cordillera de Mérida y, posteriormente, en la Cordillera de la Costa, se convierte en una barrera natural que detiene los vientos y carga las montañas de humedad. Esa agua descenderá por el piedemonte formando los grandes ríos que desembocarán en el Orinoco.

Los vientos alisios son más fríos a nivel del suelo que por encima, por esta razón, no forman nubes y crean un efecto de sequedad a su paso; de tal manera que, solamente forman las nubes cuando son impulsados hacia las montañas tras atravesar las llanuras generando humedad.

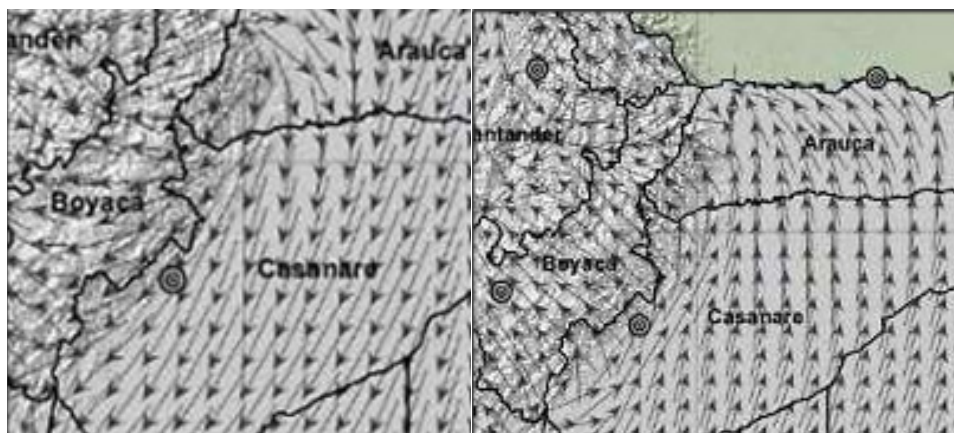
Ahora bien, en la Zona de Convergencia de los vientos alisios o zona Intertropical chocan los vientos superficiales o alisios del noreste y sureste del planeta. Por lo tanto, los vientos alisios se encuentran en la región ecuatorial porque allí, debido a la exposición directa de los rayos solares, es donde más se calientan, lo que hace que las masas de aire se eleven formando nubes y, posteriormente, lluvias.

Se ha encontrado que, al norte de Colombia y Venezuela, hay un periodo del año en la que los vientos circulan de forma reiterada generando una estación seca (las flechas rojas de la Figura 10). Debido a la inclinación del eje terrestre, esta franja se desplaza en dirección norte-sur-norte, por encima y por debajo de la línea del Ecuador, provocando en el norte de la Orinoquía, una estación seca cuando los vientos soplan en dirección norte-sur y tienen mayor velocidad; los vientos también generan una estación lluviosa porque soplan menos y van de SE a NW transportando la humedad del Amazonas como ríos de la atmósfera (IDEAM, 2019).

Por efecto de la continentalidad o distancia apreciable del Océano Atlántico, los vientos que soplan en el verano no traen mucha agua debido a la gran distancia del Océano Atlántico, en cambio, los vientos que soplan desde la Amazonía, traen más agua durante la temporada húmeda gracias a la relativa cercanía de la Orinoquía (Figura 13 derecha).

Figura 13

Dirección contraria del viento en los meses de enero (izquierda) vs. julio (derecha)



Nota. IDEAM (2019)

La precipitación. A nivel regional, o partes limitadas del planeta, los cambios en precipitación se dan primariamente por los cambios en la trayectoria y velocidad de los vientos, los que a su vez están limitados por la topografía cambiante de las Cordilleras.

Este mismo efecto causa que las precipitaciones sean variadas en la Orinoquía: desde 4.500 mm, en el piedemonte cerca de las poblaciones de Tauramena, Chámeza, Villavicencio, Pajarito, El Japón, La Reventonera y Salinas de Upín, hasta 1.500 mm de precipitación en el oriente de Arauca. Al sur, las precipitaciones son más persistente con fluctuaciones entre 500 mm y 3.500 mm en la mayor parte de los departamentos de Meta, Vichada, Guaviare y Guainía.

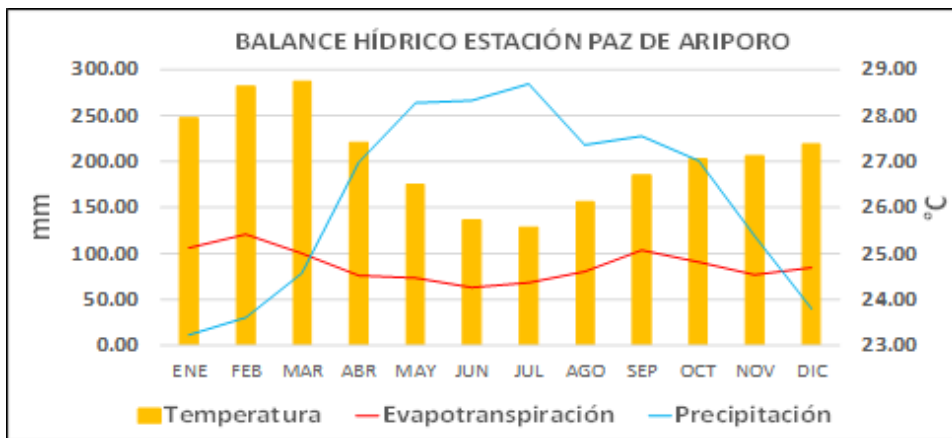
En general, el esquema de precipitación en las sabanas de la Orinoquía es monomodal, como lo muestran los resultados del Capítulo 4, lo que significa que la distribución de las precipitaciones durante el año hace que solo llueva durante un periodo del año que suele ser de abril a diciembre, mientras que, el periodo de sequía

comienza en diciembre y va hasta marzo. Durante la estación seca, la evaporación del agua del suelo o de las plantas es mayor que el porcentaje de agua que corre sobre la superficie o que se infiltra en la tierra.

La Figura 14 permite ilustrar cómo durante la mitad del año las lluvias aumentan, pero la temperatura disminuye y, por tanto, la evaporación; no obstante, ocurre lo contrario entre diciembre y marzo durante el periodo seco o estación seca debido a la disminución en las precipitaciones y al aumento en la temperatura, al punto que las sabanas se tornan semidesérticas. A este tipo de sabanas se les conoce como neotropicales.

Figura 14

Histogramas resumen del comportamiento mensual multianual de las lluvias (azul) y de la temperatura (amarillo) en las sabanas inundables (localización en la Figura 2)



Nota. Benavides y Caro (2019)

Conclusiones. En la Orinoquía, las extremas fluctuaciones climáticas entre el período de estiaje y de lluvia se explican porque los vientos alisios que vienen del norte no traen mucha humedad

por la gran distancia del océano, mientras que, en la fase de lluvia, los vientos del sur traen mucha humedad de la Amazonía.

Se concluye entonces que gran parte de la humedad de la Orinoquía depende de la Amazonía y de lo que pase allí. Otros factores importantes son la altitud y la presencia de la Cordillera, los cuales se exacerbarán por los cambios climáticos relacionados y por los efectos de los fenómenos climáticos de El Niño y La Niña, y también se verán agravados por la forma como sean manejados los crecientes impactos antrópicos, especialmente en la Amazonía.

4. BALANCE DE AGUAS EN LA ORINOQUÍA

A lo largo de los primeros tres capítulos que componen este libro, se puede apreciar la magia de la Orinoquía, la cual está en sus abundantes aguas que inundan las sabanas. Dichas aguas están representadas por la copiosa lluvia que alimenta los innumerables ríos, caños, lagunas, esteros y acuíferos; pero, esa abundante agua no está presente todo el año. Durante 8 o 9 meses, desde abril hasta noviembre o diciembre, las sabanas reciben abundante agua de la precipitación que en promedio es de poco más de 2 metros por año.

Sin embargo, no solo es la lluvia que satura de humedad la sabana, sino también, las aguas que ruedan de la Cordillera Oriental y las aguas que se infiltran recargando los acuíferos. Pero, esa danza de las aguas casi se paraliza cuando deja de llover y comienza el periodo de estiaje (verano o mejor conocido como periodo seco), y lo que antes estaba saturado e inundado de agua, en corto tiempo se torna reseco y casi semidesértico. El contraste entre el periodo de lluvias y la época de estiaje es sorprendente, pero los ecosistemas se han adaptado a tan extremo ciclo y dependen de él. Dicho ciclo es delicado y más frágil de lo que se suele pensar.

Como el agua de las sabanas depende de las partes altas, se hace necesario cuidar de dichas cuencas incluyendo sus bosques, pastizales y matorrales. Una vez que las aguas llegan a la zona inundable, se hace necesario entender cómo corren las aguas superficiales, como se conectan con las aguas subterráneas, y cuál es el mejor aprovechamiento que les podemos dar con la mínima transformación posible.

Por eso es necesario entender mejor el impacto que las diferentes actividades ganaderas, agrícolas, mineras y de infraestructura podrían tener en los ecosistemas y en la cantidad y aptitud del agua disponible para los llaneros que la habitan.

La mejor manera para entender la cantidad y disponibilidad de las aguas de una zona es haciendo un **balance de aguas** en el que se miden, o se calculan de manera directa e indirecta, los diferentes componentes o variables del ciclo hidrológico en los diferentes estados del agua como son: precipitación (lluvia), escorrentía (agua superficial), infiltración (aguas subterráneas), evaporación y transpiración (de agua en sus diferentes formas y de los entes vivos).

En seguida, se muestra el balance de aguas de la parte central de la Orinoquía, enfocado en la parte centro norte de Casanare (Paz de Ariporo – cuenca del río Guachiría) (Figura 15). La información meteorológica ha sido suministrada por el IDEAM de estaciones climáticas en Yopal, Orocué, Arauca y poblaciones cercanas. Como el contraste entre la estación de lluvias y el período de estiaje es tan alto, se presentan los resultados y contrastes entre los mapas representativos de todo el año y los mapas de estiaje (verano).

Figura 15

Norte de la Orinoquía donde se hizo el balance de aguas



4.1 Metodología del balance de aguas

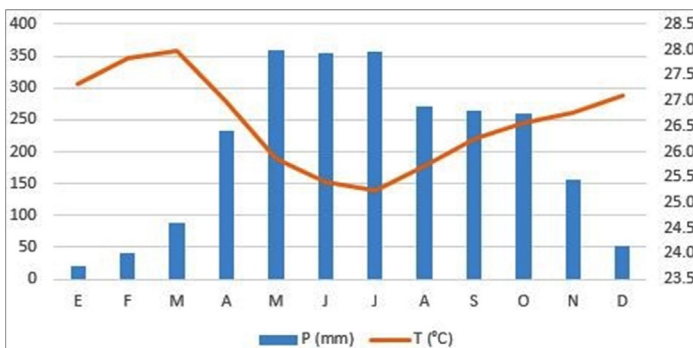
Las sabanas tropicales se caracterizan por la rotación de una temporada lluviosa y una temporada seca extensa y persistente, tal como las encontradas en el sector plano de la Orinoquía (IDEAM, 2019).

En la Figura 16, se presenta la gráfica climática de la estación Paz de Ariporo y se observa que la lluvia fluctúa entre 20 mm a 350 mm mensual, con una sumatoria de la lluvia promedio anual entre 1.900 y 2.500 mm, la temperatura media anual fluctúa de 25 a 28 °C, situada en una región cálida tropical, con un balance hídrico de abundancia de abril a noviembre (8-9 meses) y un pasivo hídrico entre mediados de diciembre y marzo (4-5 meses) (SGC, 2018).

Al graficar la precipitación mes a mes, se observa un comportamiento monomodal, es decir, presenta una sola temporada de lluvias altas dentro del año, que coincide con las temperaturas más bajas del municipio. La concentración de las lluvias en un solo periodo da como resultado un verano intenso, lo que hace al municipio sensible a sequías como la ocurrida en 2013-2014 y en la que murieron gran cantidad de chigüiros (capibaras) y otros animales silvestres y vacunos (Figura 16).

Figura 16

Precipitación y temperatura promedio en la estación de Paz de Ariporo de enero a diciembre



Nota. Benavides y Caro (2019)

La investigación abordada a lo largo de este libro, se enfoca en el estudio de una prospección aplicada, la cual integra la observación de datos climáticos y el sondeo de niveles del agua subterránea en lugares y pozos establecidos previamente, desde las sabanas altas (piedemonte) hasta las sabanas bajas a lo largo de las sabanas cerca al río Meta.

Los datos climáticos incluyen el estado actual y multitemporal de las coberturas utilizando información climática del IDEAM, fotografías aéreas e imágenes satelitales suministradas por el “Servicio Geológico de los Estados Unidos” (USGS), a través de la aplicación Earth Explorer, con imágenes satelitales del programa de sensores LANDSAT. MSS (Benavides y Caro, 2019).

Para este estudio, se tuvieron en cuenta, específicamente, 10 estaciones (Paz de Ariporo, Aeropuerto de Yopal, Saravena, Módulos, Aguaverde, Bonanza, Pore, Trinidad, Hato Burreunay y El Tapón), de las cuales cuatro son climatológicas y los otros pluviométricos, durante un periodo de 20 años, desde el año 1995 hasta el año 2014. Una vez todas las series de datos hidrometeorológicos (precipitación, temperatura, brillo solar, evaporación y humedad relativa), fueron completados, se elaboraron mapas de cada variable.

Como el contraste de la temporada seca es tan alto con respecto del resto del año, se comparó el mapa multianual con el de la temporada seca. Los mapas se hicieron mediante el software ArcGis 10.3 (Sistema de Información Geográfica), en el que se estimó la superposición de los datos hidrometeorológicos obtenidos de la base de datos del IDEAM de cada una de las 10 estaciones, con la ayuda del instrumento IDW (*Inverse Distance Weighted*) (Benavides y Caro, 2019).

Para el balance hídrico se utilizó la siguiente ecuación:

(Ecuación 1)

$$P(\text{precipitación}) = ETR(\text{evapotranspiración}) + ES(\text{escorrentía}) + I(\text{Infiltración})$$

P (precipitación): Es la variable más relevante en los cálculos climáticos porque representa la sumatoria de agua que entra en la región por la lluvia durante doce meses. Se obtiene a partir de medición en pluviómetros administrados por la oficina climatológica (IDEAM).

ETR (evapotranspiración real): Dado que, esta variable es difícil de medir, se determina, en primer lugar, la evapotranspiración potencial utilizando la ecuación de Thornthwaite; en segundo lugar, se calcula la evapotranspiración real. Para lo anterior, se utiliza la temperatura, un índice calórico, este debe ser (constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales), así también, se usa un exponente de tipo experimental determinado a partir de la temperatura.

ES (escorrentía): La escorrentía se define como el porcentaje de lluvia que fluye por la superficie y confluye en los ríos, caños, lagos y otros cuerpos de agua. Usualmente, equivale al caudal del río principal al final de la cuenca, pero esos caudales no se miden por el IDEAM en el río Guachiría, que es el principal drenaje. Por esta razón la escorrentía fue hallada, gracias al método de las curvas, el cual utiliza como dato de entrada la lluvia y sus características como: uso del suelo, cultivo, condiciones hidrológicas, absorción y humedad del suelo.

A continuación, las diferentes variables son procesadas en Arcgis 10.3, de tal manera que, se pueda obtener el número de curva y valor de S. En consecuencia, el plano de escorrentía se alcanza por medio del instrumento de Arcgis calculadora ráster, a partir de este, se elaboran expresiones algebraicas de mapas (Benavides y Caro, 2019).

I (infiltración): Es el agua lluvia o de escorrentía que atraviesa el suelo y se incorpora al nivel freático alcanzando las zonas saturadas. El resultado de infiltración es la diferencia de la Ecuación 2 del balance hídrico cuando esta se encuentra en equilibrio y se calcula así:

(Ecuación 2)

$$I = P - (ES + ETR)$$

Por otro lado, otra ecuación utilizada es el **Coefficiente de Ivanov**, que permite apreciar la duración de los periodos secos o húmedos, enmarcando así las temporadas de lluvia y sequedad en el municipio. Este coeficiente vincula la precipitación con la evaporación (Ecuación 3) (IGAC, 1999).

(Ecuación 3)

$$K = \left(\frac{P}{EVP} \right) * 100$$

Índice de disponibilidad de humedad (IDH) que vincula la precipitación efectiva y la evapotranspiración potencial (Ecuación 4).

(Ecuación 4)

$$IDH = \frac{P}{ETP}$$

Clasificación climática Caldas-Lang. Esta clasificación climática corresponde al cociente entre la precipitación y la temperatura (P/T) y se utiliza para determinar la aridez de una zona (IGAC, 1999).

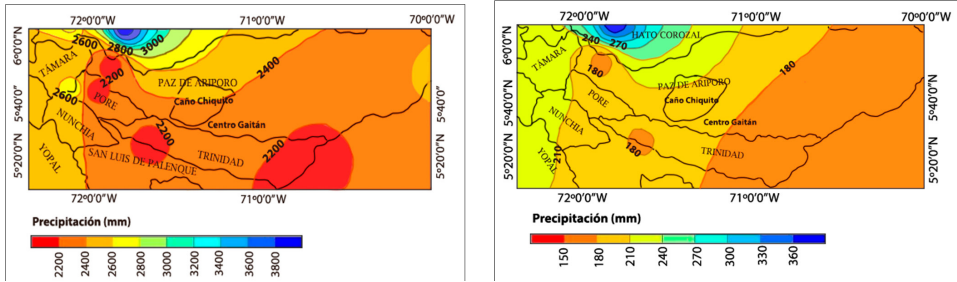
4.2 Resultados y análisis

A continuación se presentan simultáneamente las diferentes variables climáticas de: temperatura, precipitación, evapotranspiración, humedad relativa, evaporación y brillo solar, durante el año y en la época de verano. Esto con el fin de resaltar el contraste acentuado existente en la Orinoquía entre la temporada de lluvias y la temporada de verano.

Precipitación: La cantidad de lluvia promedio en Paz de Ariporo es de 2.300 mm al año, mientras que, en los 4 o 5 meses de verano solo cae un promedio de 190 mm, equivalente al 8 % de toda la lluvia que cae durante el año (Figura 17).

Figura 17

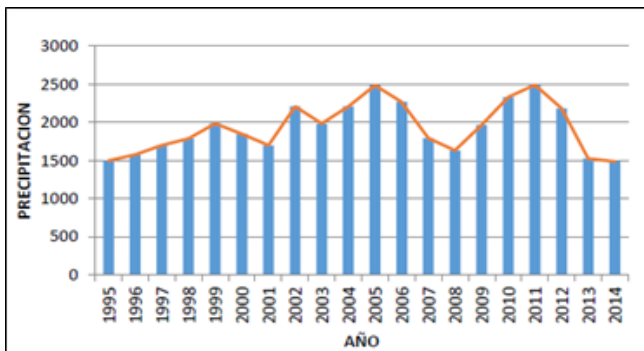
Contraste entre la precipitación anual vs. precipitación en periodo seco



Si se analiza la cantidad de lluvia promedio obtenida en los últimos 20 años (Figura 18), con respecto a los fenómenos climáticos ENSO (El Niño, La Niña) que han impactado a Colombia, se nota que la mayor influencia en la estación climática de Paz de Ariporo está directamente relacionada al impacto del fenómeno de La Niña; por otro lado, los datos revelan que, el fenómeno de El Niño no tuvo gran influencia durante ese periodo; Aun así, la sequía de 2014 parece que fue influenciada por el fenómeno de El Niño. En la Figura 18, nótese que los periodos de recurrencia o repetición de las sequías (menor lluvia) podrían estar entre 4 y 5 años.

Figura 18

Precipitación promedio anual en la estación de Paz de Ariporo desde 1995 hasta 2014

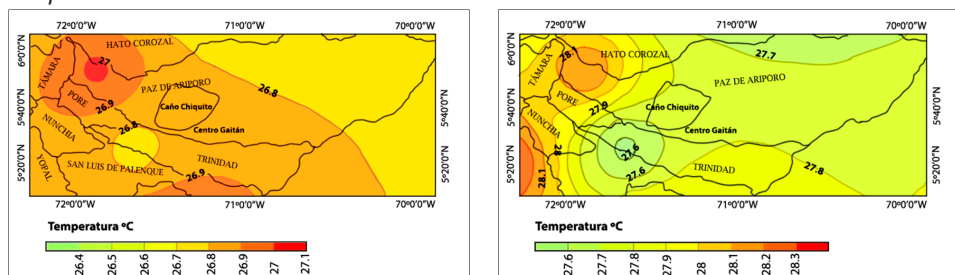


Nota. UPTC-Colciencias (2018)

Temperatura. En Casanare, la temperatura aumenta en el verano, y como resultado se eleva la evaporación y seca así la poca agua que queda en la cuenca. La temperatura promedio anual es de 26-27 °C (Figura 19, izquierda), en contraste a la temperatura media anual en el verano que es de 26-28 °C (Figura 19, derecha).

A pesar de que la temperatura oscila entre 1 y 2 grados, la influencia de otras variables como la baja precipitación en el periodo seco, la alta evaporación y el brillo solar, pueden dar escenarios suficientemente críticos, al punto que la llanura alcanza situaciones de aridez. Según la Figura 18, los periodos de sequía se producirían cada 5 años en promedio, de acuerdo con la recurrencia de la zona.

Figura 19
Temperatura anual promedio en Paz de Ariporo vs. La temperatura media en periodo seco



Brillo solar. El brillo solar, igualmente, parece incidir en las circunstancias de sequedad que se percibe durante el transcurso del verano; por lo tanto, se examina la luminosidad solar anual frente a la luminosidad solar en la época seca y, se observa que, de una media total de 2.000 horas de sol durante los doce meses, el 40% se produce en el periodo de verano, un 10% por cada mes que alcanza este periodo, lo que muestra que es una gran proporción para únicamente 4 meses.

Humedad relativa. La humedad en la atmósfera se define como la cuantía de vapor de agua que se encuentra en el aire y contribuye en la velocidad con la que se produce la evaporación.

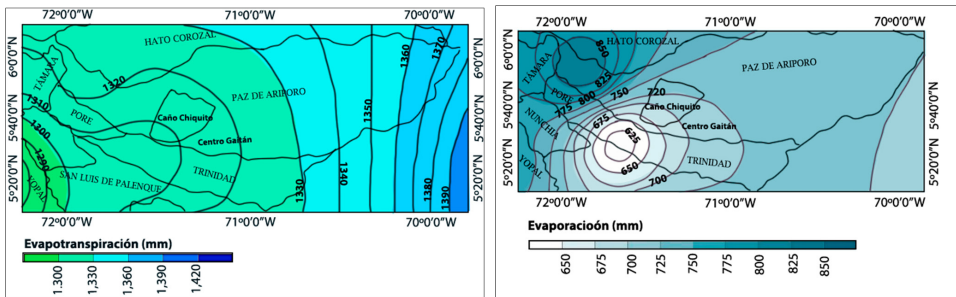
La media anual en el municipio es del 74% de humedad relativa durante el año, y de 68% de humedad relativa en el periodo seco, lo que demuestra que hay menos agua en forma de vapor en el aire. A pesar de la diferencia de humedad, la zona de Paz de Ariporo se considera con humedad alta (>60%) aún en estación seca.

Evaporación. La evaporación es otro factor decisivo durante la estación seca porque, la evaporación durante el verano (725 mm) equivale al 42% de la evaporación de todo el año, estas altas cifras se producen en una etapa en el que sólo se detectan 195 mm de lluvia; por lo tanto, se evapora cuatro veces más agua de la que llueve (Figura 20).

De este modo, la evaporación elimina casi toda el agua que cae durante el verano, incluida la que podría acumularse en los humedales. Esta fuerte evaporación descarta cualquier potencial acumulación y crea un déficit hídrico. La evapotranspiración en la Orinoquía oscilaría entre 900 a 1.200 mm/año.

Figura 20

Contraste entre la evaporación promedio anual vs. la evaporación en periodo de estiaje



Escorrentía. La escorrentía o agua que corre por la superficie hasta alcanzar los ríos depende, primordialmente, de la cobertura del suelo, por ejemplo, en la zona estudiada, gran parte de la superficie es de sabanas nativas formadas por sedimentos de llanuras aluviales cubiertas de pastos.

Es relevante tener en cuenta que, en los ríos y sus cercanías predominan los bosques de galería o lo que queda de estos, conformados por depósitos de terrazas y llanuras aluviales. Los cálculos de la escurriencia muestran que es cercana a los 1.100 a 1.300 mm/año, siendo menor en la parte central y mayor en la parte más suroccidental en los límites de Paz de Ariporo con el municipio de Trinidad (Figura 21).

Infiltración. La infiltración es más alta en las áreas aledañas a las quebradas y ríos, y se presenta en baja cantidad en los humedales. En algunas partes de la sabana si la infiltración se calcula con la ecuación: $I = P - (E + ETR)$, se obtiene como resultado que es muy baja a nula. Lo anterior contradice a lo que se esperaría de una llanura con influencia eólica que está inundada gran parte del año.

En contraste, el estudio de Benavides y Caro (2019) encontró que la infiltración estaría entre 300 y 400 mm/año, siendo mayor hacia las sabanas distales en el cual la pendiente es menor y los suelos son más arenosos (médanos). En las zonas menos permeables los valores serían cercanos a 200 mm/año.

Coefficiente de Ivanov. Este número mide la sequedad, y se encontró que, en esta parte de Casanare durante los meses de verano (diciembre - marzo), el clima se caracteriza por encontrarse seco y muy seco, representado con coeficientes < 25 ; por el contrario, durante la temporada de lluvia el coeficiente da una clasificación como muy húmedo.

Índice de disponibilidad de humedad. Para la zona de estudio, durante la estación seca, el índice de disponibilidad de humedad es pobre y, por lo tanto, limita la agricultura a menos que se riegue artificialmente; por el contrario, durante la temporada de lluvias el clima es adecuado para los cultivos que requieren un buen porcentaje de humedad.

Clasificación climática Caldas-Lang. Este tipo de categorización permite conectar la precipitación como la temperatura (P / T). Para la zona de estudio, al analizar el comportamiento del clima plurianual, resulta un clima semihúmedo; En contraste, al clasificar el clima con Caldas-Lang para la temporada seca, resulta un clima árido. Esa categorización es concordante con lo observado a lo largo de la sequía entre 2013 a 2014. Como resultado, es evidente un agravamiento de las condiciones, ya que, en ese momento, la categorización para la época de estiaje era semiárido, esto se obtiene al contrastar, actualmente, la clasificación de Caldas-Lang con la obtenida en 1999 (IGAC, 1999).

4.3 Conclusiones a partir del balance de aguas

Previamente, a partir del balance de aguas, se concluyó que, de la precipitación anual promedio de 2.200 mm en la zona de estudio, solo una pequeña parte (8 %) se precipita durante los 4 o 5 meses del periodo de verano. Aunque, la diferencia de temperatura entre el período húmedo y seco es de solo 2°C, lo que no es suficiente para justificar la sequía; sin embargo, si se adiciona la influencia de otras variables como disminución de precipitación y alta evapotranspiración durante la temporada de estiaje, es posible percibir que se dan los requisitos para que la llanura alcance ambiente de semiaridez a aridez.

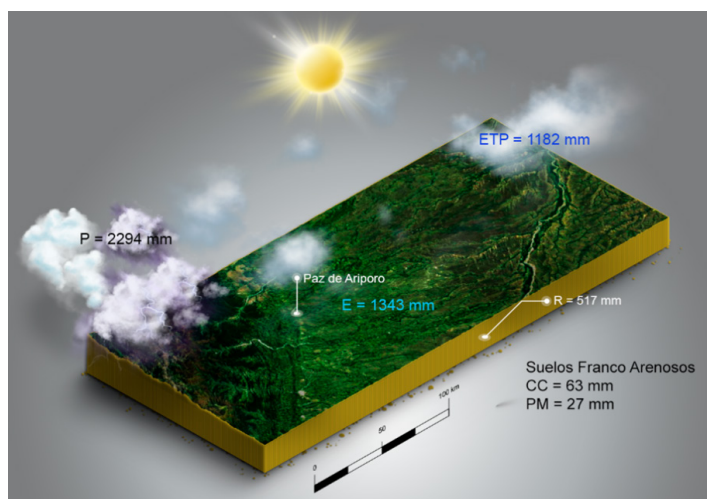
Además, se encontró que durante el verano la evaporación alcanza a ser un 400 % más que la precipitación. En consecuencia, casi la totalidad del agua disponible, se evapora y no se repone, ya que las lluvias presentes son escasas, por lo que existe un severo régimen de déficit hídrico durante el periodo seco.

En este sentido, se observa que la proporción del flujo de agua que se mueve gracias a la escorrentía es alta ($\approx 800 - 1.200$ mm/año) y, esta se incrementa hacia el oriente, a medida que convergen caños y ríos buscando el río Meta. Uno de los desafíos para calcular la infiltración es la falta de estaciones de medición del caudal de los ríos (equivalente a la escorrentía).

La infiltración se supone baja porque se asume una naturaleza lodosa de las llanuras aluviales, sin embargo, existen abundantes depósitos eólicos hacia el oriente con buena permeabilidad asociados con los depósitos fluviales y eólicos, que favorecerían una recarga directa por precipitación. De esta manera, la infiltración efectiva podría estar entre 200 - 500 mm/año, no obstante, se requiere más investigación al respecto (Figura 21 y Capítulo 6).

Figura 21

Bloque diagrama resumen de los componentes que actúan en la ecuación del ciclo hidrológico en el norte de Casanare

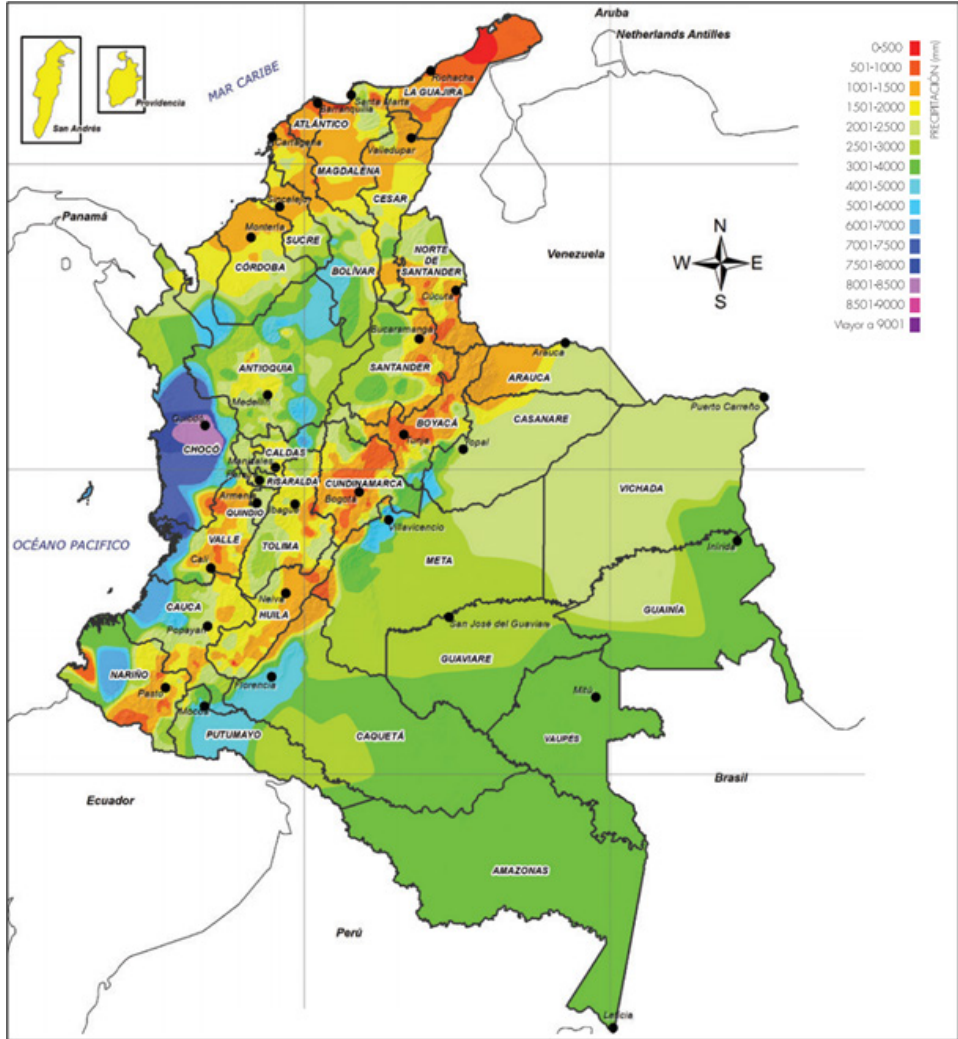


Nota. Benavides y Caro (2019)

De acuerdo con el mapa de la precipitación media en Colombia, en el norte del Casanare esta sería cercana o superior a los 2.000 mm, lo que significa que es buena y coincide con los datos anteriormente presentados. Esa abundante agua alimenta los ríos (escorrentía) y los acuíferos (infiltración). La precipitación va aumentando en dirección SE-NW de acuerdo con la dirección de los vientos alisios y en su encuentro con la Cordillera Oriental, en el piedemonte puede alcanzar los 4.000 mm por año (Figura 22).

Figura 22

Mapa de precipitación media anual para Colombia, período 1976-2000



Nota. IDEAM (2018)

5. LA CONEXIÓN ENTRE LA ORINOQUÍA Y LA CORDILLERA ORIENTAL – ORIGEN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS A PARTIR DE ISÓTOPOS

Entre la Cordillera Oriental y las sabanas de la Orinoquía hay una dependencia directa y un engranaje hídrico porque muchos de los caños y arroyos de esta región nacen en el costado este de esta cordillera y a medida que descienden aumentan su volumen, para finalmente humedecer las sabanas. Por esta razón, se adelantó esta investigación para demostrar esa conexión entre aguas a partir de isótopos trazadores presentes en el agua.

Especialmente en el área central de la Orinoquía colombiana, se sospecha de un vínculo hidráulico entre los regímenes de la parte alta (piedemonte y páramos) con los regímenes de la parte baja (llanura proximal y llanura de inundación) (Betancur, 2008). Uno de los objetivos de este estudio es establecer dicha conexión utilizando los mejores trazadores tal como son los isótopos de deuterio, oxígeno-18 y tritio. Si los valores resultantes son similares, se relaciona los regímenes de la parte baja son alimentados por agua subterránea suministrada por la lluvia y los ríos de la parte alta incluyendo los páramos.

No obstante, si los valores son muy disímiles, se puede relacionar que la recarga principal de los acuíferos de la parte baja está principalmente dada por precipitación (infiltración vertical local) que debe estar menos empobrecida isotópicamente que la parte alta. Desde el punto de vista del tritio, si las aguas no contienen este elemento, significa que son aguas relativamente viejas, de más de 50 años, previas a la era atómica, seguramente con recarga limitada (Herrera y Gutiérrez, 2012).

Por otro lado, en los páramos altos de la cordillera se cree que gran parte de la humedad proviene de la cuenca de la Orinoquía que, a su vez, proviene de la cuenca Amazónica y del océano Atlántico.

A medida que las nubes se trasladan hacia el occidente, paralelamente, se espera una saturación baja del agua, en tanto que se hacen más pobres desde el punto de vista isotópico (Mariño et al., 2017).

Es así que, el objetivo de la presente investigación es definir si la recarga de los acuíferos de los llanos de Casanare se está dando por tres posibles fuentes (hipótesis): 1) de manera vertical por la precipitación, 2) por los ríos, o 3) desde las partes altas de la cordillera Oriental de los Andes (Figura 23).

Figura 23

Ubicación de las traversas o recorridos de muestreo en las cuencas de los ríos Casanare-Guachiría, Cravo Sur y Cusiana en los departamentos de Boyacá y Casanare



5.1 Metodología isotópica

Los isótopos son átomos que tienen el mismo número atómico y de protones, no obstante, estos poseen un número diferente de neutrones, por lo que presentan una masa ligeramente desigual. Estos se dividen en dos tipos: estables e inestables. Por un lado, los inestables, también conocidos como radioisótopos, sobrellevan modificaciones nucleares propias de la naturaleza y emiten radiaciones conocidas como radiactividad (Herrera y Gutiérrez, 2012).

Por el otro, los estables no son radiactivos, así que no son nocivos. Para esta investigación se escogieron, el deuterio (^2H) que es un isótopo del hidrógeno, y el oxígeno-18 (^{18}O) que es un isótopo del oxígeno. Esencialmente, estos dos tipos de isótopos siempre se encuentran en el agua de manera natural (Mariño et al., 2017).

Conviene saber que, la constitución isotópica de una muestra de agua no es detallada en términos absolutos, por el contrario, se menciona en términos relativos. Por lo tanto, los isótopos estables se nombran de acuerdo con la relación a un patrón o estándar llamado SMOW “*Standard Mean Ocean Water*”, que representa la concentración isotópica media del océano. Los datos son presentados en unidades de desvío δ (delta) con relación al estándar (Faure, 1998).

Los estándares más utilizados para los isótopos estables del agua son: SMOW, y VSMOW o Viena, que es el estándar utilizado por la OIAE (Organización Internacional de Energía Atómica) localizada en Austria. Para la presente investigación se usó el estándar VSMOW. Los valores de desviación Delta (δ) de las ecuaciones 4 y 5 expresan la correspondencia entre los valores isotópicos de la muestra y los valores isotópicos del patrón o estándar. (Ecuación 5)

$$\delta = R - R_{\text{smow}}$$

La Ecuación 6, indica la manera como se puede presentar la composición isotópica de cada muestra (R) a partir de la abundancia isotópica del isótopo pesado fraccionada por la abundancia del isótopo, así: (Ecuación 6)

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{estándar}}}{R_{\text{estándar}}} \right] * 1000$$

Donde, R_{muestra} es la correlación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de la muestra y $R_{\text{estándar}}$ es la correlación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ del estándar. δ se expresa, según la Ecuación 6, a partir de la discrepancia en tanto por mil (‰) entre las relaciones de la muestra y las relaciones del estándar.

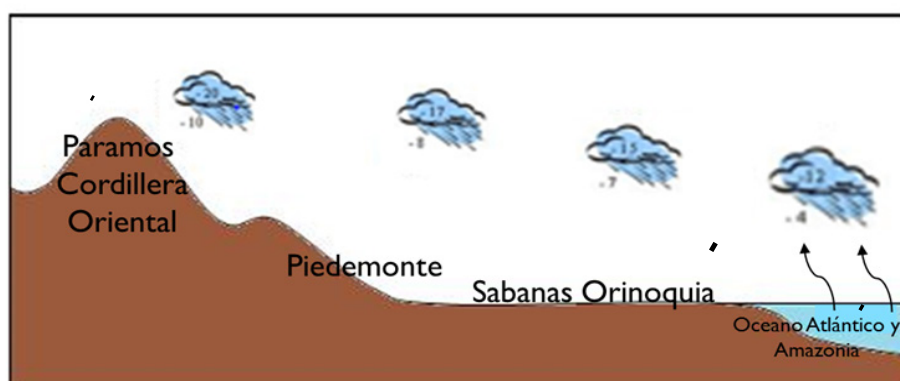
En resumen, un valor positivo de δ revela que la muestra se ha enriquecido gracias al isótopo pesado con relación al estándar (agua de mar); por otro lado, un valor negativo de la muestra revela lo opuesto.

Como los isótopos de ^2H (deuterio) y de O^{18} (oxígeno18) son levemente más pesados que los átomos primarios de hidrógeno-1 y oxígeno-16 porque tienen mayor número de neutrones, las moléculas de agua presentes en las nubes que contengan dichos isótopos (^2H y ^{18}O) se caen o se precipitan rápidamente, por lo que las nubes se van empobreciendo en estos dos isótopos en cuanto se alejan de la fuente donde se levantaron por evaporación del agua. Ese empobrecimiento hace que las unidades de desviación delta (δ) del ^2H y del ^{18}O se hagan cada vez más negativas (empobrecidos en esos dos isótopos) por fraccionamiento isotópico.

En consecuencia, y por lo que en el agua condensada en forma de vapor (en un proceso que implica el equilibrio de fraccionamiento), los isótopos más pesados del agua (^2H y ^{18}O) se concentran en la fase líquida, mientras que los isótopos más ligeros (^2H y ^{16}O) tienden hacia la fase de vapor. Por esta razón, a medida que la nube se desplaza y pierde lluvia, se vuelve más pobre en isótopos pesados (Figura 24).

Figura 24

Empobrecimiento isotópico de las nubes desde el océano hacia el continente



En la Orinoquía, la meta final fue establecer la conexión hidráulica de los sistemas de la parte alta (páramos) con los regímenes de la parte baja (sabanas o llanuras). En este sentido, si los valores isotópicos son parecidos o afines, se asume que los sistemas de la parte baja son recargados por agua subterránea surtida por la lluvia y por los ríos de la parte alta.

De otro lado, si los valores difieren altamente, se puede concluir que la recarga principal de la parte baja se da como consecuencia de la infiltración vertical local a partir de la precipitación, que debe estar más enriquecida (o menos empobrecida) que la parte alta (Calvo, 2020).

En la zona oriental de Boyacá y zona occidental de Casanare (costado este de la cordillera Oriental) una parte amplia de la lluvia proviene de la cuenca de los Llanos Orientales, la que en últimas proviene de la cuenca del río Amazonas y del océano Atlántico. Con el desplazamiento de las nubes en dirección occidente, se espera que estén menos saturadas de agua, mientras se empobrecen isotópicamente (Figura 24) (Mariño et al., 2017; Rozansky, 2002; Calvo, 2020).

De tal forma que, el muestreo para la medición de isótopos de hidrógeno (deuterio- ^2H), oxígeno (^{18}O) y tritio se hizo entre 2016 y 2017 en 156 puntos de agua (lluvia, ríos, esteros, manantiales, lagunas, aljibes, pozos), desde las frías montañas de la cordillera Oriental hasta el gran río Meta; a lo largo de tres grandes traversas de más o menos 200 km, así: 1) río Casanare-Guachiría, 2) río Cravo Sur y 3) río Cusiana (Figura 25).

Los análisis de los cerca de 40 puntos de muestreo en cada travesa, en aguas superficiales y subterráneas, permitieron determinar la conexión hidráulica subterránea entre la cordillera de los Andes y las sabanas de la Orinoquía en Casanare. Los análisis isotópicos se hicieron en el Laboratory of Isotope Geochemistry de la Universidad de BYU-Brigham Young University en Utah (Estados Unidos).

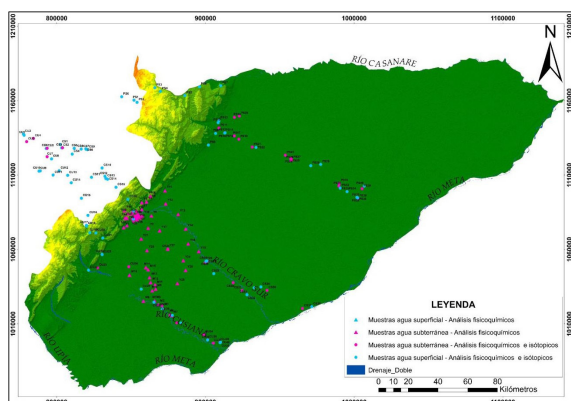
El tercer isótopo utilizado es el tritio (^3H) que es útil para determinar de edad relativa de las aguas. La concentración de ^3H en el agua de lluvia en circunstancias de equilibrio es posiblemente de unas 5 UT, que equivale a una actividad específica de unos 0,6 Bq/L (Calvo, 2020). Después de los ensayos nucleares de los años 60, el contenido de ^3H en el agua de lluvia se hizo 1.000 veces mayor en el hemisferio norte. Desde entonces, y a raíz de la disminución en los ensayos nucleares, el contenido extremo de ^3H ha venido menguando hasta alcanzar valores típicos de invierno y el doble en verano.

“Una gran parte del ^3H que se originó en las explosiones nucleares se introduce a la estratosfera. Este vuelve a la troposfera cada año durante la primavera e inicios de verano. Esto es lo que provoca las variaciones estacionales del ^3H , las cuales son pronunciadas en el tritio, ya que el tiempo de residencia en la atmósfera del H_2O al que se asocia el ^3H , es de un par de semanas” (Mook, 2000, pág. 31).

A partir de la concentración de tritio se determina si las aguas entraron en contacto con los componentes de las explosiones nucleares y, por lo tanto, son modernas (recientes), de lo contrario se consideran submodernas (antiguas).

Figura 25

Puntos de muestreo a lo largo de la cuenca de los ríos Casanare-Guachiría, Cravo Sur y Cusiana en los departamentos de Boyacá y Casanare



5.2 Resultados

Como no fue posible tomar muestras de agua de lluvia con una repetición mensual para permitir la construcción de la línea meteórica propia, se usó la línea meteórica colombiana propuesta por Rodríguez (2004), de tal manera que, se pudiera hacer los estudios isotópicos, así:

(Ecuación 7)

Cada una de las tres traversas (ríos Casanare-Guachiría, río Cravo

$$\delta D = 8.03 * \delta^{18}O + 9,6\%$$

Sur, y río Cusiana) ocupan alrededor de unos 200 km de largo, y se presentan de NW a SE. En cada travesa, el muestreo y los análisis se realizaban desde las altas montañas frías (3.000-3.500 m s. n. m.) pasando a través de la selva tropical en el piedemonte, las sabanas proximales, y finalmente, cruzando las sabanas bajas distales cerca del río Meta (120 a 50 m. s. n. m.) donde todos los ríos del Casanare convergen al río Meta como un enorme delta (Figura 25). Por brevedad solo se presentan detalles de la **travesa a lo largo del río Cravo Sur** (Figuras 23 y 25) en época de lluvia.

De tal manera que, se pueda responder apropiadamente al análisis de isótopos estables (deuterio y oxígeno-18) encontrados en el río Cravo Sur, se usaron un total de 38 muestras, recogidas en temporada de lluvias en la operación llevada a cabo entre septiembre y octubre de 2018, del total, 24 muestras corresponden a aguas de superficie (5 de humedales como lagunas y esteros, 19 de ríos, quebradas o caños) y 14 muestras de aguas subterráneas (1 aljibe y 13 pozos) (Calvo 2020).

Las muestras de agua de superficie y las muestras subterráneas provienen de la cordillera Oriental y llanos de Casanare, diseminadas en elevaciones que van de 3.600 a 100 m s. n. m., comenzando en los fríos páramos de la cordillera Oriental en el municipio de Mongua, pasando por Labranzagrande, Yopal, Quebrada Seca, El Cacho, hasta llegar al río Meta en el municipio de Orocué (Figura 25).

En general, el contenido de ^2H y ^{18}O en los páramos está más empobrecido en comparación con los pozos de la llanura que presentan un menor empobrecimiento. En los páramos, los valores delta de ^2H fluctúan entre $-68,75$ y $-61,72$ ‰ y los valores delta de ^{18}O fluctúan entre $-9,26$ y $-9,86$ ‰. En los pozos de la llanura, el contenido de la ^2H oscila entre $-24,87$ y $-49,17$ ‰ y el contenido de ^{18}O de contenido oscila entre $-5,30$ y $-8,19$ ‰ (Calvo, 2020).

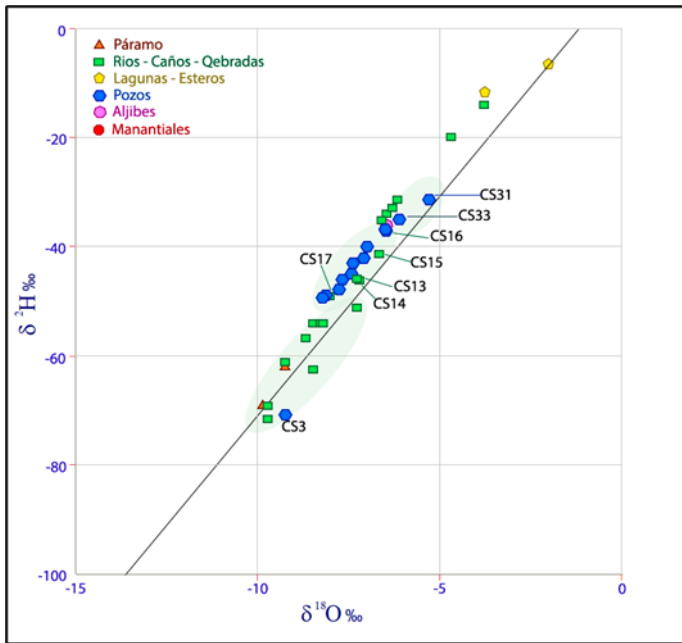
La Figura 26, presenta los resultados isotópicos de ^2H y ^{18}O del muestreo paralelo al río Cravo Sur durante el periodo de lluvias, en comparación con la línea meteórica de Colombia.

La localización en la figura de los puntos de agua superficial CS13, CS14, CS15, CS16 y CS17, que se tomaron entre 400 y 1.100 m s. n. m., muestran que la recarga de la precipitación de estas alturas se está presentando en los pozos de aguas subterráneas de la sabana proximal, sin embargo, esta recarga es indirecta ya que es llevada por las corrientes de agua superficial. La localización de las muestras de pozos de agua subterránea CS33 y CS31, indica que la recarga directa por la lluvia predomina en estos puntos (Figura 26).

En las muestras correspondientes a esteros, es evidente que exhiben más enriquecimiento isotópico que el resto de las muestras debido a los fenómenos de evaporación que se producen en dichas acumulaciones de agua no permanentes (Calvo, 2020).

Figura 26

Comparación de los valores delta (δ) de 2H vs. ^{18}O , en la travesa a lo largo del río Cravo Sur (temporada de lluvias), comparado con la línea meteórica de Colombia de Rodríguez (2004)



Nota. Calvo (2020)

Si se observa en detalle la Figura 26, se nota que la señal isotópica de los páramos es diferente, y al contrastar la señal isotópica de las aguas profundas de las sabanas es evidente dicha observación, lo que sugiere que el nivel de relación hidráulica entre el agua de la alta montaña fría y el agua contenida en los pozos de la sabana es reducida durante la temporada de lluvias; por el contrario, las precipitaciones entre 400 y 1.100 m.s.n.m., están generando una porción de la recarga de los pozos de agua subterránea de las sabanas proximales, lo cual ocurre indirectamente debido a los flujos superficiales que vienen de estas elevaciones medias (piedemonte llanero).

Los altos valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en la estación lluviosa en la travesa del río Cravo se sitúan, principalmente, entre $-6,2\text{‰}$ y $-7,4\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y entre -33‰ y -44‰ para $\delta^2\text{H}$ (Figura 27); De acuerdo con los estudios de Rodríguez (2004) que correlacionan el contenido isotópico con la altitud, la recarga de agua subterránea y superficial en los llanos se está presentando en dos alturas, una en altitudes inferiores a los 250 metros y otra en alturas entre los 1.000 y 1.500 m.s.n.m. , según la altitud y el enriquecimiento isotópico de ^{18}O y ^2H , de los datos tomados para fijar la línea isotópica meteórica Colombiana.

En donde, los análisis de ^2H y $\delta^{18}\text{O}$ indican que un gran porcentaje de la recarga de agua subterránea que está ocurriendo en altitudes menores a 250 m.s.n.m. en el piedemonte, es de infiltración directa en altitudes entre 1.000 y 1.500 m.s.n.m. y por recarga no directa por flujos superficiales (flujo regional).

El tritio se utilizó para estimar la edad relativa de las aguas subterráneas empleando la ecuación de desintegración radiactiva del tritio, asumiendo que la entrada del tritio es conocida en el sistema y que el tritio residual medido es el resultado, únicamente, de la desintegración radiactiva, por esto, el tiempo se determina a partir de su concentración.

Como las aguas superficiales de la llanura tienen valores de tritio entre $1,1 \pm 0,3$ UT a $2,7 \pm 0,3$ UT, se presume que su valor en la atmósfera en las zonas de muestreo está dentro de esta categoría. Por consiguiente, las muestras de agua subterránea PL25 (Formación Caja), CS18 (depósitos aluviales en abanico, depósitos fluviales simples y Formación Caja) y CU36 (depósitos fluviales simples) que presentan enriquecimientos de tritio entre 1,6 a 0,3 UT y 1,9 a 0 3 TU, pertenecen a una recarga moderna de menos de 10 años; por otro lado, las muestras PL21 (depósitos fluviales simples), PL27 (Formación Caja), PL34 (Formación Caja), CS22 (depósitos aluviales de abanico), CS27 (depósitos aluviales de llanura), CU4, CU6, CU23 (Formación Caja), CU30 (depósitos

fluviales simples), y CU34 (depósitos fluviales de llanura), que tienen valores $<0,3$ TU, pertenecen, posiblemente, a una recarga submoderna (mayor de 60 años).

Las muestras de agua subterránea recogidas de los sedimentos de la llanura de inundación y de la Formación Caja con concentraciones de tritio entre $0,5 \pm 0,3$ y $0,9 \pm 0,3$ se vinculan con una mixtura entre la recarga moderna y la submoderna o con una infiltración que se produjo entre los últimos 15 y 25 años.

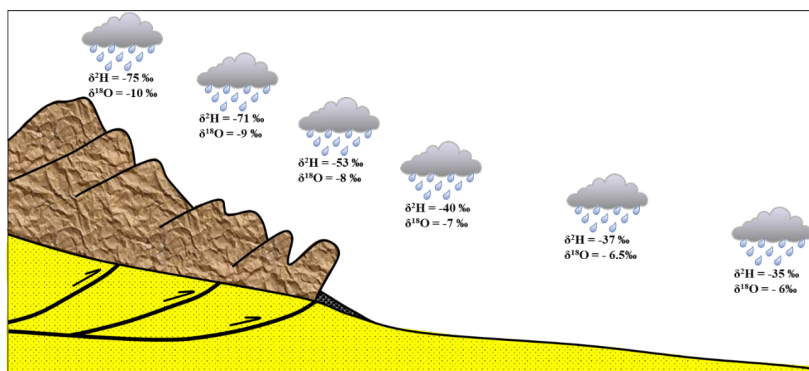
5.3 Análisis

Las muestras de aguas superficiales y subterráneas muestreadas para el análisis isotópico desde los páramos en altitudes de 3.600 metros en el costado este de la Cordillera Oriental que va hasta las llanuras del Casanare a unos 100 m.s.n.m., contribuyen a reconstruir modelos conceptuales de cómo se conectan las aguas superficiales y subterráneas, y las aguas de montaña y de sabana, en el área de estudio.

Los contenidos isotópicos en la zona muestran, principalmente, una inclinación de empobrecimiento hacia los páramos, con mayor agotamiento isotópico en las montañas más altas (páramos) ($\delta^2\text{H} = -75$ ‰ y $\delta^{18}\text{O} = -10$ ‰) en contraste con las sabanas distales inundadas ($\delta^2\text{H} = -35$ ‰ y $\delta^{18}\text{O} = -6$ ‰), que indican un claro pendiente de altitud y un fraccionamiento isotópico en la orientación SE - NO (Figura 27) concordante con el alejamiento de la humedad del Océano Atlántico y/o mar Caribe y de la cuenca del río Amazonas que son las fuentes naturales de humedad en la cuenca del Orinoco.

Figura 27

Modelo que muestra el fraccionamiento isotópico de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ desde las llanuras de Casanare hasta la cordillera Oriental en Colombia



Si se analizan los valores de $\delta^2\text{H}$ frente a los valores de $\delta^{18}\text{O}$, comparados con la línea meteórica de Rodríguez (2004) para Colombia, es claro que la señal isotópica de las altas montañas varía si se contrasta con la señal isotópica de las aguas profundas de la llanura, lo que indica la reducción del nivel de conexión hidráulica entre los páramos y las aguas de las sabanas distales pantanosas.

Así también, se puede observar que algunos pozos de aguas profundas, primordialmente aquellos que corresponden a la estación seca, tienen señales isotópicas parecidas a las de los ríos y arroyos de la llanura proximal, lo que indica que existe una conexión entre las aguas superficiales y las subterráneas, y que las aguas subterráneas, probablemente, ayudan al flujo base de las aguas de superficie (ríos).

No obstante, inclusive en la época de lluvias, algunas corrientes de superficie de la sabana tienen concentraciones isotópicas parecidas a las muestras de corrientes de superficie muestreadas a más de 2.000 m.s.n.m., lo que permite suponer que el agua que se precipita en las estribaciones de la Cordillera Oriental, tiene una contribución significativa en el flujo de las aguas de superficie de las sabanas proximales.

Unas pocas muestras tomadas de pozos localizados en las sabanas más distales e inundadas cerca del río Meta están enriquecidas isotópicamente y están por debajo de la línea meteórica colombiana (Rodríguez, 2004), dichos valores indican que es factible que la evaporación ocurra en los esteros y lagunas previamente a que se dé la recarga en los niveles del acuífero.

Los resultados isotópicos resaltados en los párrafos anteriores indican que en las sabanas del Casanare la infiltración de agua subterránea predominante es la recarga directa que proviene de las precipitaciones a altitudes inferiores a los 250 metros y la infiltración local (escorrentía laminar y proveniente de esteros y pantanos) a la misma altura donde se generan procesos de evaporación.

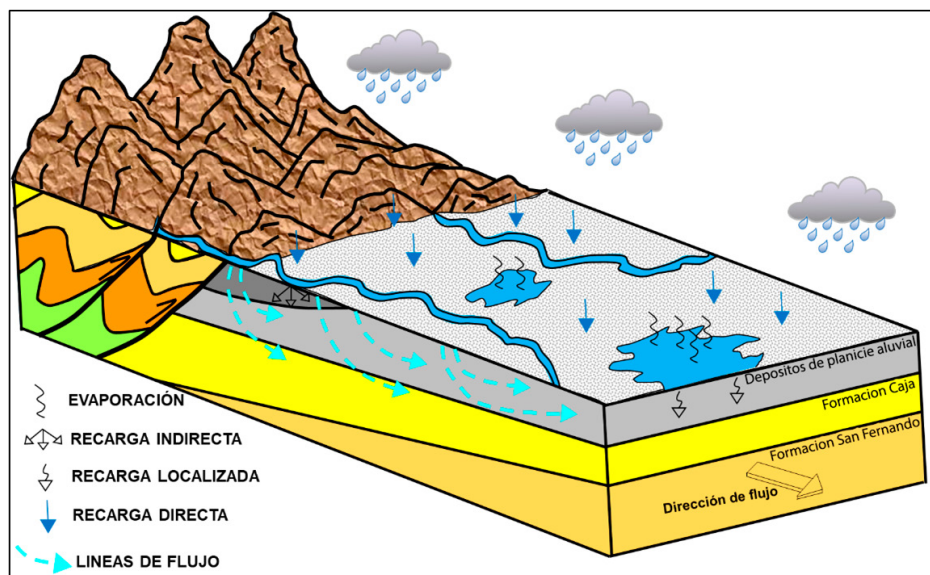
Sin embargo, también existe una recarga indirecta menor, correspondiente a las precipitaciones que ocurren entre los 1.000 y 2.000 m. s n. m, que infiltra a los acuíferos libres por los flujos superficiales que bajan de estas alturas (páramos) en el flanco oriental de la Cordillera Oriental (Figura 28).

Esta última recarga o flujo subterráneo regional se explica en parte por las numerosas fracturas en el piedemonte de la cordillera relacionadas con las diversas fallas regionales que contribuyen a acortar la corteza y a levantar la Cordillera (Cooper et al., 1995; Sarmiento et. al., 2006).

Los depósitos recientes de textura gruesa y los productos recientes del levantamiento, los ríos meandricos de alta energía en el piedemonte y las glaciaciones recientes, ayudan a aumentar la recarga de agua para una mejor conexión con las sabanas proximales (SGC, 2018).

Figura 28

Modelo conceptual que relaciona la infiltración de aguas subterráneas en las montañas, el piedemonte y las sabanas de Casanare



Nota. Calvo (2020)

Las desiguales concentraciones de tritio entre los pozos de agua superficial y el agua profunda subterránea de las sabanas del Casanare, que captan los niveles de los acuíferos de los depósitos aluviales de abanicos de los depósitos fluviales y de la Formación Caja (Guayabo), infieren disímiles tiempos de recorrido en las trayectorias de agua subterránea, que están generando mezclas.

Adicionalmente, los contenidos de tritio en pozos de más de 120 metros de profundidad, y que en algunos sectores alcanzan la formación Caja (Guayabo), indican que la recarga vertical moderna alcanza grandes profundidades. A partir de los valores de tritio se estableció que el agua subterránea es moderna (menos de 10 años) a submoderna (~ 60 años).

6. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUÍFEROS

La Orinoquía se ha presentado como el futuro de Colombia por ser una despensa agrícola, y como la última frontera de Colombia que, con ayuda de empresas nacionales y extranjeras, se podría realizar agricultura a gran escala, y hacer del país una verdadera potencia alimentaria tal como lo son Brasil y Argentina.

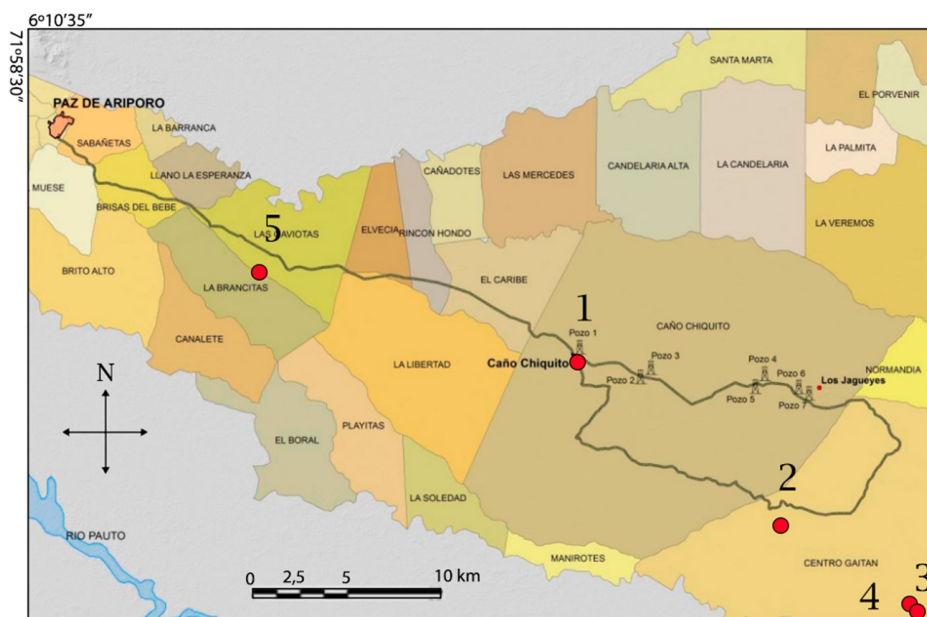
Los proyectos de producción agroindustrial de cereales, palma, caucho y caña de azúcar requieren grandes cantidades de agua. Esta región privilegiada cuenta con abundante agua durante la temporada lluviosa, tanta que los ríos principales, como el Meta, tiene dificultades para evacuarla; sin embargo, durante el verano las llanuras sufren estrés hídrico y se tornan resacas. Algunos indicios sugieren que las aguas subterráneas son la opción para proveer de esa agua extra.

Con el apoyo de la UPTC y Colciencias (2018) se desarrolló una investigación en Paz de Ariporo sobre el modelo hidrogeológico de las sabanas estacionales. Este Capítulo presenta algunos resultados de dicho estudio sobre las características de las rocas acuíferas en Paz de Ariporo, estos hallazgos tienen aplicación en la llanura inundable del norte de la Orinoquía (Figura 29) (UPTC y Colciencias, 2018).

La presentación de lo obtenido se inicia con la medición de niveles de agua a través del año, tomografías para radiografiar el subsuelo, seguido de caracterizaciones hidráulicas de los acuíferos a partir de pruebas de bombeo, y ensayos de permeabilidad de los suelos, para terminar con una reflexión sobre la calidad y vulnerabilidad de los acuíferos presentes.

Figura 29

Ubicación de las sabanas estacionales donde se hicieron los estudios de niveles freáticos y permeabilidad en Paz de Ariporo



Nota. UPTC y Colciencias (2018)

6.1 Medición de los niveles de los pozos de agua

Las llanuras de la Orinoquía forman parte de una región plana, constituida por planicies o sabanas con alturas entre 100 m y 400 m de altura, formadas por la acumulación de sedimentos acarreados por los ríos que drenan de la cordillera oriental del noroeste al sureste. Los grandes ríos y sus tributarios constituyen un paisaje de llanura preferencialmente plano, en el que se interdigitan las llanuras de inundación con las llanuras eólicas formando una zona plana y continua.

Los cursos de agua fluyen en la llanura proximal como torrentes trenzados, y luego en la llanura distal se convierten en cursos meándricos con gradientes muy bajos y una alta saturación de sedimentos.

Durante los períodos de desborde en épocas de lluvia, las láminas de agua cubren la llanura depositando el sedimento según la cercanía al río. Las gravas y arenas o sedimentos más gruesos se depositan cerca al río, mientras que, los finos (arcillas y limos) son llevados por suspensión a la parte de la llanura más alejada conocidas como cuenca o basin.

Los zurales son geformas con poca elevación separados por zanjas. Hacia el oriente, la llanura de origen eólico es conformada por limo y arena fina arrastrados por el viento que forman banquetas y desarrollan suelos arcillosos con drenaje bajo. En la zona intermedia de la llanura, la precipitación media anual fluctúa 2.002 y 2.500 mm con una temperatura media cálida persistente con pequeñas variaciones entre 26 y 28 °C, con exceso hídrico entre abril a noviembre y deficitario entre diciembre y marzo cuando los humedales disminuyen y finalmente se secan (Figura 30).

Figura 30

Disminución y desecación de los humedales durante la época seca en la Orinoquía



La disminución de los humedales y su desecación parecieran están directamente relacionados con el descenso de los niveles freáticos de los acuíferos superficiales; para probar dicha hipótesis, se midieron los niveles de los pozos durante los últimos meses de 2014 y los primeros de 2015.

En noviembre se hizo la primera medición de niveles freáticos y se calcularon siete pozos seleccionados numerados del 1 al 7, siendo el número 1, el correspondiente al pozo profundo que surte de agua al caserío de Caño Chiquito y el número 7, el más distante ubicado en Las Jagüeyes. Durante dicha medición, se encontraron niveles freáticos que variaron entre 1,23 m (Pozo 1) y 1,96 m (Pozo 6) a partir de la superficie del terreno (UPTC y Colciencias, 2018).

El nivel más superficial corresponde al pozo profundo del acueducto de Caño Chiquito, el cual, aunque su extracción es permanente, tiene su propia recarga cercana del Caño Chiquito. La mayor profundidad corresponde al pozo ubicado en Las Jagüeyes, que igualmente, presenta bombeo constante (Figuras 29 y 31).

Transcurridos dos meses de evaluación de niveles freáticos, finalizando el mes de diciembre, se observa que, aunque hay descensos en los niveles freáticos, estos no son tan marcados en los pozos que tienen en sus proximidades caños y quebradas que aún tienen agua corriente, como es el caso del pozo de Caño Chiquito (Pozo 1), el cual solo experimento un descenso de 0,41 m. Es de anotar que, en este pozo, se pueden presentar descensos superiores durante el bombeo continuo (4,96 m en diciembre 16 de 2014), pero una vez pasa el efecto de abatimiento, recupera los niveles generalizados de la región.

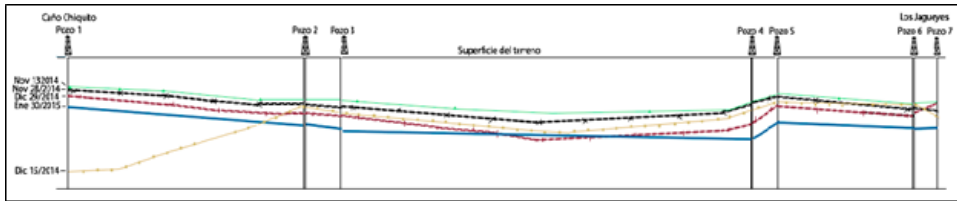
La evaluación de niveles freáticos evidencia una reducción significativa en el volumen de los cuerpos de agua superficiales de la sabana estacional, principalmente, por evaporación durante el tiempo transcurrido de la estación seca. A finales de enero, los ríos y caños que tienen su nacimiento tanto en el piedemonte, como la

llanura, presentan reducción significativa de sus caudales que tienen una alta dependencia de la recarga vertical de las lluvias.

En la sabana estacional se tiene un gran potencial hidrogeológico en los depósitos aluviales, que puede ser utilizado para reducir el déficit hídrico. Esto se puede conseguir recargando los acuíferos y aumentando el número de pozos profundos, técnicamente bien ubicados y construidos, que garanticen su sostenibilidad año tras año en el periodo de estiaje.

Figura 31

Medición, ubicación y perfil esquematizado de registro de niveles freáticos



Nota. UPTC y Colciencias (2018)

6.2 Radiografía del subsuelo – tomografías

Con el fin de conocer las características geológicas y de aguas subterráneas de las rocas del subsuelo se realiza la evaluación geofísica para determinar sus propiedades y correlacionarlas geológicamente para identificar la presencia de acuíferos.

La técnica más empleada para el estudio de la hidrogeología es la geoelectrica, específicamente, la relacionada con el levantamiento de tomografías geoelectricas, que es una medida más precisa y en tres dimensiones que busca correlacionar la resistividad de las rocas al paso de la corriente, con las características hidrogeológicas de las rocas.

Geología. El área en la que se llevaron a cabo las tomografías geoelectricas se caracteriza por no tener afloramientos de rocas, y solo presenta depósitos cuaternarios producto de la acumulación de una

llanura aluvial. La formación infrayacente a los depósitos cuaternarios es la formación Guayabo. La cual consiste en intercalaciones de litologías arenosas conglomeráticas con arcillolitas grises y limolitas con presencia de lentes ferruginosos.

Los depósitos de llanura aluvial se caracterizan, en las planchas geológicas de Bélgica (195) y del río Guachiría (196), por estar compuestos por lodos arenosos de color gris a marrón en las zonas altas de la sabana conocidas como bancos, que son las que tienen menor grado de inundación.

Las zonas bajas de sabana sufren más inundaciones y algunas permanecen anegadas durante todo el año, y están compuestas por turba negra fangosa, con menos arena y con óxidos de hierro formando costras (Alcaldía de Paz de Ariporo, 2014).

En la plancha geológica que cubre la parte urbana de Paz de Ariporo (174) los sedimentos de llanura aluvial se caracterizan por una granulometría variada entre gravas y arcillas, estas últimas constituyen el sedimento de desborde. Los bloques de roca son arenosos embebidos en materiales más finos areno-arcillosos; también se encuentran depósitos limosos en capas más delgadas. En general, los sedimentos no tienen buena selección y no están bien consolidados (SGC, 2012; 2015).

Metodología y equipos. Las tomografías fueron levantadas por medio de un tomógrafo ABEM Terrameter LS 04-064-250, usado para medir auto potencial (Self Potential SP), resistividad y polarización. Dicha herramienta es importante, en tanto que permite obtener imágenes tomográficas en tres dimensiones y, por lo tanto, lograr la proyección de las rocas a profundidad a partir de las diferencias en el potencial eléctrico (Figura 32).

Gracias a las tomografías geoelectricas se observa una representación de las propiedades eléctricas bajo la superficie del terreno. Para

esto se clavan electrodos al subsuelo de igual distancia paralelos a la zona de estudio. Una serie de cables conecta cada electrodo al sistema principal encargado de medir y almacenar la información.

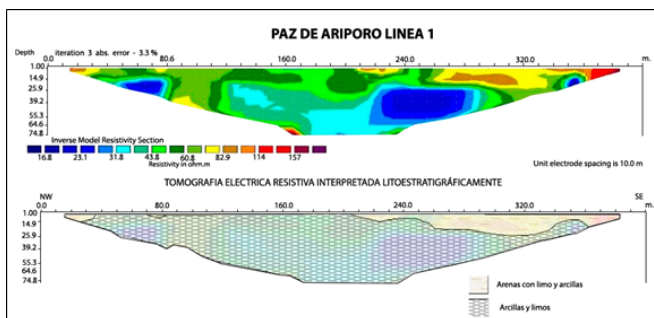
En este estudio, los electrodos se clavaron con una distancia de separación de 10 m mediante un arreglo tipo Schlumberger, y la información obtenida, fue procesada por medio del software RES2DIVN que permite la inversión correcta de los datos.

Resultados. Con las tomografías geoelectricas se logró identificar características importantes del subsuelo mediante la interpretación de los perfiles de resistividad. Dichos perfiles se levantaron en las veredas de Centro Gaitán y Caño Chiquito que son representativas de la llanura de inundación lugar en el que se presentó la sequía más severa.

Las rocas del subsuelo, en el perfil de la vereda Caño Chiquito, de acuerdo con las características geológicas y de suelos en dicha área, se interpretan como depósitos de planicie aluvial con composiciones de arenas con limo y arcillas cerca de la superficie. Los valores de resistividad de esta capa son mayores a los 70 ohm-m, y esta infrayacida por una capa de arcillas y limos con valores menores de resistividad (Figura 32 y 33).

Figura 32

Tomografía y perfil litoestratigráfico de la vereda Caño Chiquito



Nota. UPTC y Colciencias (2018)

Figura 33

Presencia de areniscas silíceas con niveles de limo en Caño Chiquito

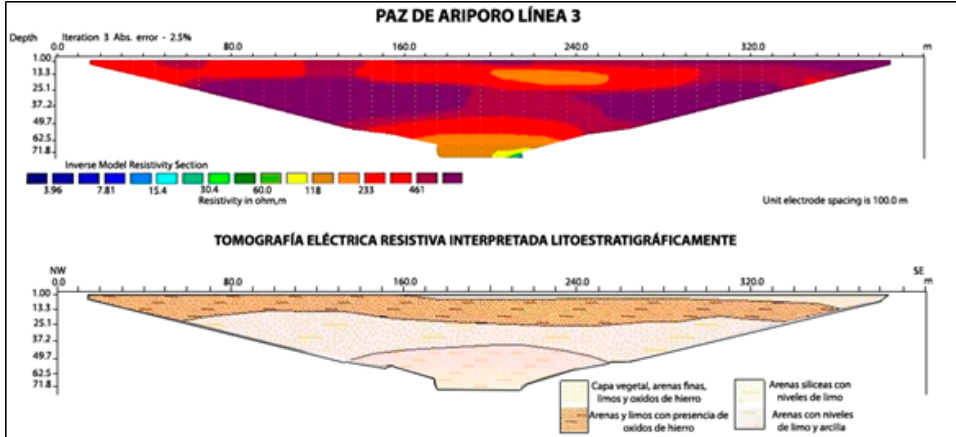


Las tomografías en la vereda Centro Gaitán, en sus perfiles de resistividad se interpretan como depósitos de planicie aluvial con composiciones de arenas finas, limos y óxidos de hierro con valores altos de resistividad mayores a los 750 ohm-m, representados por la parte más superficial.

En esta unidad suprayace una capa de arenas y limos con presencia de óxidos de hierro, presentando resistividades mayores a 170 ohm-m. La siguiente capa representa arenas silíceas con niveles de limo y resistividades de 500 ohm-m aproximadamente, y, por último, se encuentra una capa compuesta por arenas con niveles de limo y arcillas con valores de menor resistividad en todo el perfil (< 170 ohm-m) (Figura 34).

Figura 34

Tomografía y perfil litoestratigráficos de la vereda Centro Gaitán



Nota. UPTC y Colciencias (2018)

Los perfiles litoestratigráficos representan las unidades encontradas en el subsuelo. Dichas unidades se asocian con capas compuestas por arenas, areniscas silíceas con intercalaciones de limos, arcillas y presencias de óxidos de hierro con resistencias que van de los 70 ohm-m a los 500 ohm-m y pueden ser clasificados como acuíferos semiconfinados a confinados, mientras las secuencias arcillosas con intercalaciones de limo pueden considerarse como acuitardos.

Una de las mayores resistencias obtenidas en el levantamiento fue aquella que superó los 750 ohm-m, que puede estar representada por arenas, limos y óxidos de hierro secos. Esto confirma el carácter arenoso de los depósitos de la sabana distal tal como se determinó directamente con la medición de la permeabilidad de los acuíferos superficiales (numeral 6.5).

6.3 Características hidráulicas de los acuíferos – pruebas de bombeo

Si la investigación hidrogeológica se quiere hacer desde el punto de vista cuantitativo, se deben conocer las características de acuífero inherentes a él, su capacidad almacenadora, y su habilidad para permitir el flujo a través de los intersticios. Para esto se necesita establecer y definir una serie de parámetros que sirven para evaluarlo, optimizarlo y hacer predicciones. Esos parámetros se conocen como características o constantes hidráulicas.

La determinación de las características hidráulicas de los acuíferos se realizó mediante pruebas de bombeo en los pozos profundos de la zona. Estas consisten en impulsar agua en un pozo a caudal constante y registrar las caídas (abatimiento) del nivel del agua con el tiempo (Figura 35). Estas pruebas sirven para estudiar las condiciones de la roca almacenadora, hacer predicciones, calcular las variaciones en el nivel piezométrico en tiempo y espacio, identificar los límites de los acuíferos, así como determinar los volúmenes óptimos de producción de los pozos en litros por segundo o m³/día.

En síntesis, las pruebas de pozo o de bombeo permiten evaluar las reservas de los acuíferos y de esta manera obtener información necesaria, que alimente los modelos hidrogeológicos formulados para la cuenca considerada. La prueba de acuíferos permite determinar las constantes o características hidráulicas de los pozos como: conductividad hidráulica (velocidad), transmisividad (permeabilidad), capacidad específica (rendimiento) y coeficiente de almacenamiento. A continuación se explican cada una de dichas características:

La **conductividad hidráulica** está relacionada con la permeabilidad y es la aptitud que una roca brinda al ser atravesada por el agua. De forma técnica, es la constante de proporcionalidad lineal entre el volumen de agua y el gradiente hidráulico (la pendiente o inclinación del acuífero). Se expresa en metros/segundo o metros/día.

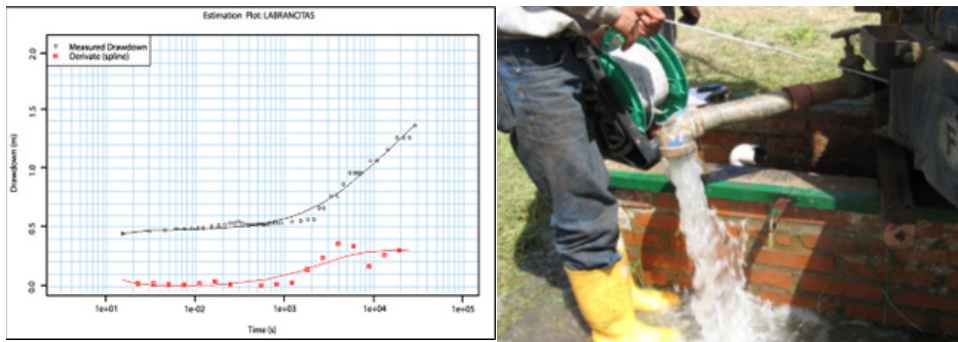
La **transmisividad** es la conductividad hidráulica por el espesor y señala la viabilidad del agua para circular por un acuífero. Se expresa en metros²/día.

La **capacidad específica** se comprende como la concordancia entre la cantidad de agua bombeada y el total del cambio de nivel del agua, y se expresa en caudal por longitud (litros/segundo/metro).

El **coeficiente de almacenamiento** se relaciona con la cantidad de agua que se puede sacar de una roca, a través de un pozo, para que se produzca un descenso unitario en el nivel piezómetro. Se expresa en porcentaje y sirve para diferenciar acuíferos libres de acuíferos confinados.

Figura 35

Prueba de bombeo en un pozo utilizando una sonda eléctrica. Se grafica el Cambio de nivel o abatimiento (s) vs. Tiempo (t) a caudal constante



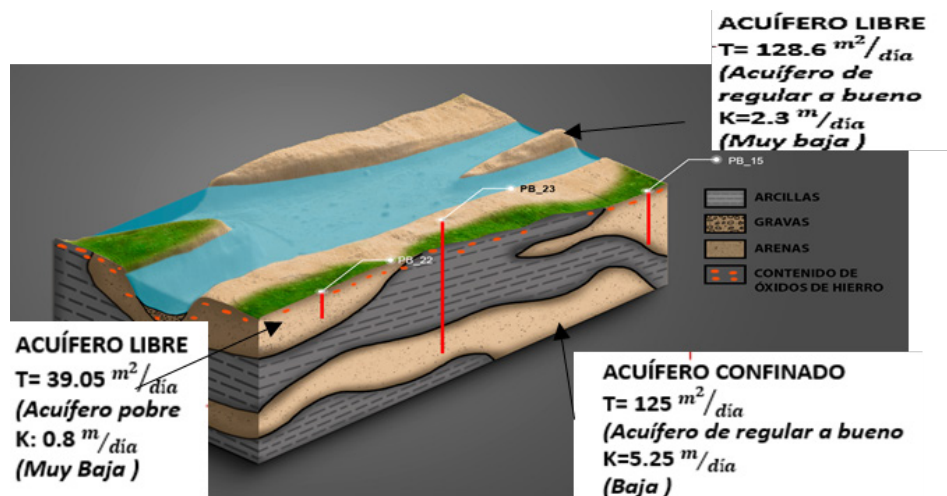
Resultados. En concordancia con los resultados alcanzados de la información secundaria, a partir de la reinterpretación de algunas pruebas y de las pruebas de bombeo adicionales, se puede concluir que, el acuífero del miembro superior de la Formación Guayabo tiene en promedio una transmisividad de 67,22 metros²/día y una conductividad hidráulica de 2,71 metros/día, indicativos de una permeabilidad media, y al comparar estos valores con la capacidad específica que en la mayoría de las pruebas dio baja (0,5-2 litros/segundo/metro), se clasifica este acuífero como de baja-media productividad, de tipo semiconfinado.

Los depósitos en planicies aluviales presentes en Paz de Ariporo pueden ser acuíferos desde libres a confinados dependiendo las litologías presentes en la zona. Los **depósitos cuaternarios** poseen una transmisividad promedio de 61,89 metros²/día, y una conductividad hidráulica también promedio de 2,14 metros/día, indicativo de una permeabilidad media: De acuerdo al valor de capacidad específica de 1.12 litros/segundo/metro, se clasifica estos acuíferos semiconfinados de baja productividad.

Para resumir la información relacionada con los pozos de bombeo y las características hidráulicas de los acuíferos, se esquematizó un bloque diagrama con el fin de realizar una interpretación completa acerca de las condiciones hidrogeológicas e hidráulicas en el área de estudio. El bloque diagrama presenta las características hidráulicas de los acuíferos libres y confinados (Figura 36).

Figura 36

Esquema hidrogeológico representativo



Nota. Benavides, Caro y Mariño (2021)

Los valores de transmisividad en los acuíferos libres fluctuaron entre 30 y 120 m²/día indicando acuíferos con algo de permeabilidad, los valores para los acuíferos confinados fueron muy variables desde 4 a 849 m²/día denotando que algunos son permeables y otros son algo permeables (Chaparro et. al., 2019).

Los valores de conductividad hidráulica en los acuíferos libres fluctúan entre 0,8 y 2,3 m/día manifestando una baja velocidad de desplazamiento. En los acuíferos confinados los valores son más amplios y van de 0,04 a 9,7 m/día lo cual expresa una velocidad baja a media.

Según su capacidad específica (CE, indicador de productividad), 15 pozos con valores de CE que varían de 0,425 a 1,3 (l/s/m), se sitúan en acuíferos con buena extensión lateral y poca productividad, tres en acuíferos con variada continuidad lateral regional y productividad media con valores de CE de 1. 27 a 2,0 (l/s/m), y dos en acuíferos continuos y discontinuos de extensión regional, con productividad alta con valores de CE que oscilan entre 2,8 y 3,1 (l/s/m), estos últimos varían en función de su espesor y continuidad, ya que las formaciones y depósitos son de gran extensión, cubriendo grandes áreas fuera de la cuenca. De acuerdo con los resultados de la capacidad específica, la productividad de los acuíferos se cataloga como media.

6.4 Determinación de la calidad del agua subterránea

Determinar la calidad del agua en la Orinoquía es primordial, ya que la población rural, se abastece de aguas subterráneas por medio de embalses, pozos someros (aljibes) y pozos profundos. Las comunidades más inmediatas al piedemonte toman el agua de consumo y se surte del agua de las corrientes y arroyos que descienden de la Cordillera Oriental. Las comunidades de la sabana utilizan más el agua subterránea de aljibes y pozos.

Inicialmente, el muestreo de agua para calidad se enfocó en el norte de Casanare, sin embargo, posteriormente se amplió a tres grandes sectores desde los fríos páramos de la Cordillera hasta el gran río

Meta: la cercanía a los ríos Casanare-Guachiría, del río Cravo Sur y del río Cusiana.

También, se intentó muestrear tanto en tiempos de lluvias como en tiempos secos para notar las diferencias, dado que estos son extremos (Figura 25). Es así que, en la región preocupa no solamente la cantidad de agua, especialmente durante la época de estiaje, sino también de la calidad, que depende no solo de la procedencia, pues también incluye el recorrido en el que se recoge impurezas esto significa que su potabilidad puede ser alterada.

El análisis consistió en determinar las concentraciones de aniones, cationes y las propiedades físicas como la conductividad eléctrica, sólidos totales, pH y turbiedad. Además, fue posible realizar el muestreo en dos temporadas: una realizada en el mes de agosto de 2017 que corresponde a la temporada de lluvias y la otra en mayo de 2018.

De acuerdo con el análisis obtenido de las muestras y luego de haber realizado la validación de los resultados se interpretaron mediante diferentes diagramas hidrogeoquímicos, que muestran en resumen las características químicas presentes en el agua subterránea, como lo son, diagrama de Stiff, Piper y Schöeller-Berkaloff (Figura 37).

En cuanto a los diagramas de Schöeller-Berkaloff, para el muestreo de agosto de 2017, se agruparon las muestras según el tipo de punto de muestreo (superficial o subterráneo), y se encontró que las muestras subterráneas del mes de agosto pertenecen a una misma familia de aguas, ya que tienen un comportamiento muy similar al graficarlas en estos diagramas (Figura 37).

Se evidencia que las concentraciones de Na^+K son menores en las muestras de tipo subterráneas (Pozo Doña Alix y Aljibe Finca “La Venturosa”, Centro Gaitán) y las demás muestras guardan similitud en cuanto a sus concentraciones de Ca, Na, SO_4 , HCO_3 y NO_3 .

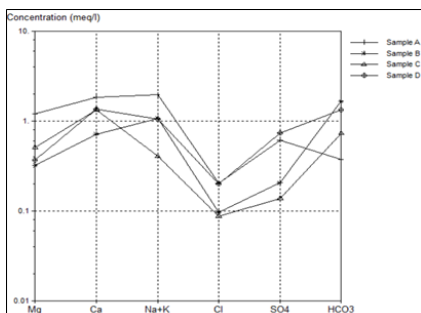
Por último, para este muestreo, los análisis de las muestras superficiales difieren de las muestras obtenidas en el acueducto que presenta un comportamiento más linealizado; y para las muestras que corresponden a las muestras tomadas en los cauces, presentan una concentración específica para cada uno que se diferencia entre sódica, clorurada y sulfatada (Calvo, 2020).

En general, las aguas superficiales y subterráneas de las llanuras casanareñas muestran bajo contenido mineralógico, mínimas conductividades eléctricas, predominio de iones bicarbonato, calcio y magnesio, así como bajos contenidos de cloruro y sulfato, que están relacionados con agua lluvia. En este sentido, las cantidades de bicarbonato son más elevadas en los acuíferos que en las aguas de superficie, relacionados con fenómenos redox que se producen en la capa de suelos como resultado de la recarga a los acuíferos del subsuelo.

Los contenidos de hierro son relativamente altos, superando el límite para el agua potable. En algunas áreas los contenidos de fósforo son elevados debido al cultivo del arroz. En ciertas muestras, los contenidos de hierro, níquel, manganeso y nitratos pueden ser altos (Calvo, 2020; Benavides y Caro, 2019, Veloza y Morales, 2009; Benavides, Caro y Mariño, 2021).

Figura 37

Diagrama de Schöeller-Berkaloff para temporada de lluvias, agosto (2017)



Nota. López (2020)

6.5 Permeabilidad de los suelos y recarga de los acuíferos

Como existe mucha controversia sobre la permeabilidad de las superficies de las llanuras inundables en la Orinoquía, esta investigación se enfocó en determinar in - situ las características de dichos suelos, especialmente las que tienen que ver con permeabilidad y granulometría y lo anterior, con el fin de aclarar las diferentes hipótesis sobre la textura de los suelos, se han planteado los siguientes postulados:

1) En ambientes fluviales como es el caso de las llanuras inundadas de Paz de Ariporo, se asume que la anegación periódica de los ríos tapizaría las planicies con sedimentos de textura fina depositados por las inundaciones rítmicas de los ríos que llevan sedimentos lodosos en suspensión, ese material fino aislaría la superficie del suelo evitando la recarga o infiltración vertical (Veloza y Morales, 2009).

2) En contraste, las investigaciones de la oficina geográfica nacional concluyeron que las superficies de las sabanas inundables son de textura gruesa arenosa porque se han desarrollado cerca de las zonas de desborde de los ríos. Por consiguiente, cuando se detienen las lluvias, los suelos no pueden retener el agua por su textura granular. Como resultado, el suelo permanece seco porque el agua se infiltra (IGAC, 2016).

3) La textura arenosa de los suelos se debe al origen eólico de los mismos por la acumulación de arena y desertificación que se dio al final de las glaciaciones. Para determinar la validez de las hipótesis anteriormente presentadas, se resolvió llevar a cabo análisis de permeabilidad y granulometría de los suelos en las zonas donde se presentó mortandad de fauna durante la sequía de 2013-2014 (Chaparro et al., 2019) (Figura 29).

Ensayos de permeabilidad. Para la investigación sobre la absorción de los suelos in-situ se utilizó el ensayo de carga constante decreciente que consiste en hacer una perforación manual en el suelo, colocar un tubo de PVC y medir la velocidad del descenso del nivel del agua en 5 zonas de Paz de Ariporo (Figura 29). Para el ensayo se utilizaron los siguientes materiales: Flexómetro, cronómetro, agua, pala, barra, y tubo de PVC de 6 pulgadas.

Al perforar un agujero en la tierra de más o menos 20 cm de diámetro y 1 metro de hondura, se consigue el diámetro adecuado para penetrar un ducto de PVC de 7,5 cm radio y 1 metro de longitud, que se hunde en la base del agujero. Esto permite que el agua se infiltre por la base del tubo solamente. A continuación, el tubo se llena de agua.

La velocidad con que sube el nivel del agua por el interior del tubo se mide en periodos de 1, 2 y 5 minutos al inicio de la prueba, y posteriormente, se espacia cada 5 minutos, hasta que las diferencias entre las dos interpretaciones previas sean mínimas y se tengan suficientes lecturas para determinar la permeabilidad. En consecuencia se espera que la velocidad de infiltración varíe con la permeabilidad del suelo a investigar.

Para calcular la permeabilidad se usó la ecuación de Angelone que se basa en la metodología del permeámetro en el que la carga es persistente (Angelone et al., 2006). Los resultados se contrastaron con los de granulometría para así llegar a las conclusiones obtenidas a partir de la medición de diferentes variables.

Resultados. Los resultados del coeficiente de permeabilidad indican que la filtración de la parte superficial de los llanos está entre POBRE a BUENA (Tabla 1). En concordancia con las conclusiones del IGAC que reporta que los suelos de Casanare son franco arenosos y lodosos, con grosores cambiantes según la ubicación con respecto de la cercanía al cauce de los ríos, donde los sedimentos más gruesos están cerca al cauce principal y los sedimentos más finos, al ser llevados por suspensión, están más alejados (IGAC, 1993).

Es posible, que, en este estudio, los sitios de muestreo correspondan con zonas de causas de los ríos, y, por lo tanto, los sedimentos investigados tengan una textura arenosa prevalente. Para confirmar la naturaleza arenosa de los suelos, se realizaron pruebas de curva granulométrica en el material extraído para las pruebas de permeabilidad. Dicha prueba consiste en hacer pasar la muestra por tamices de diferente diámetro, además determinar

el porcentaje de cada diámetro y generar una curva granulométrica (Terzaghi y Peck, 1973).

Para la muestra número 1, toda la granulometría es menor que el tamiz # 4, esto significa que gran parte del material tiene un diámetro de 0,85 a 0,425 mm, que corresponde a arena media; De acuerdo con dicho calibre el coeficiente de permeabilidad fructuaria entre pobre y bueno.

Las cinco pruebas de granulometría mostraron que el tamaño de los granos fluctuaba entre 0,425 y 2 milímetros en el rango de arena media a gruesa (Tabla 1). Al correlacionar la granulometría con la permeabilidad, se comprobó que el coeficiente de permeabilidad se clasificaría entre pobre y bueno, prevaleciendo la buena permeabilidad.

Tabla 1

Drenaje o permeabilidad (K) y su correlación con la textura de suelos equivalentes

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje				Bueno			Pobre			Prácticamente impermeable		
Tipo de suelo	Grava limpia		Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada			Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición			
				Suelos "impermeables" modificados por la vegetación o la descomposición. ^d								
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.			Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.		
Determinación indirecta de k	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.			Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia								

1 y 5 → (rojo)

2 → (azul)

3 → (amarillo)

4 → (verde)

Nota. Casagrande & Fadum (1940)

6.6 Análisis

De acuerdo con el análisis de las transmisividades por el orden de 3.98 m²/día hasta 845 m²/día, los acuíferos se clasifican desde poco permeables a permeables, respectivamente; dicha variación está influenciada por la composición litológica diversa, aunado a la mezcla de litologías gruesas de los canales aluviales, así como, a los cuerpos arcillosos que quedan al transcurrir los cauces abandonados que contienen los acuíferos estudiados en las pruebas de bombeo.

Ahora bien, en cuanto a “La correlación entre la reinterpretación geofísica e hidráulica del área de investigación se determinó que la actividad de los ríos influenció en la depositación de materiales a lo largo del tiempo, modelando los acuíferos, afectando las propiedades hidráulicas al depositar cuerpos arenosos limitados con barras de depósitos finos de meandros abandonados o zonas de inundación que ocasionalmente podrían convertir acuíferos libres en acuíferos confinados o semiconfinados, disminuyendo las propiedades de conductividad y almacenamiento de agua” (Calvo,2020,pág. 28).

Es decir, se infiere que según la capacidad específica (CE) encontrada entre 0.09 a 3.125 (l/s/m), los acuíferos presentes en la zona cambian en su ensanchamiento y prolongación, desde acuíferos cuaternarios locales a regionales como la formación Guayabo, con variada productividad de muy baja a alta.

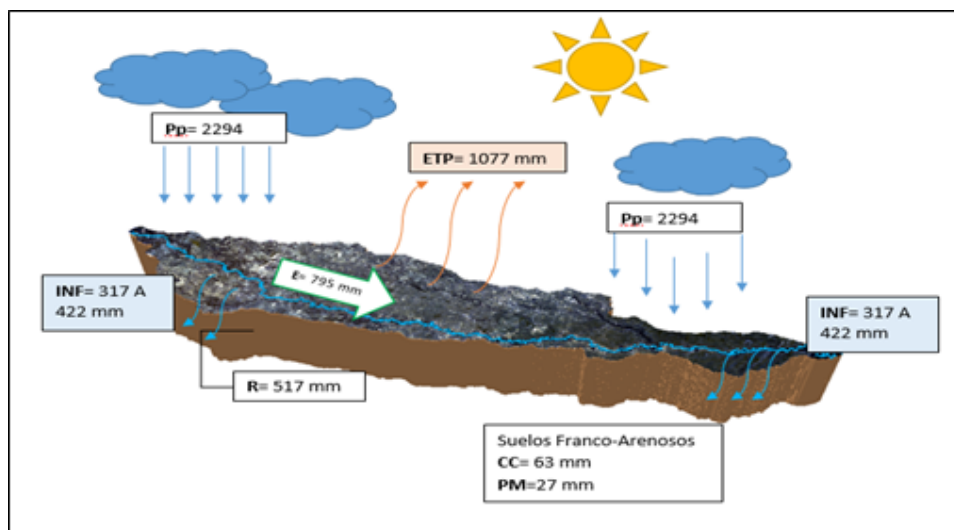
A pesar de las diferentes características hidráulicas y extensión de los acuíferos, estos no pueden dar abasto a toda la población. Para lo cual, en temporada de sequía se deben considerar pozos de mayores profundidades en acuíferos de la Formación Guayabo (Caja) que no están demasiado afectados superficialmente por la evapotranspiración y la descarga lateral, como los acuíferos libres de los depósitos cuaternarios.

Se determinó que la recarga potencial es mayor hacia el oriente de la cuenca y tiene un valor promedio entre 200 y 400 mm/anales, debido a la relación de la litología superficial de los suelos de origen eólico y la escasa vegetación que permite la infiltración hacia los acuíferos subterráneos, esto es corroborado por los altos coeficientes de infiltración obtenidos de acuerdo con la cobertura superficial (suelo-vegetación-pendiente) (Figura 38).

Se concluye que, para mejorar el seguimiento e inspección de las aguas subterráneas y superficiales se requieren más estaciones de monitoreo.

Figura 38

Mapa de la recarga potencial (R) para el norte de la Orinoquía colombiana



Nota. Pp=precipitación, ETP=evapotranspiración, E=escorrentía, R=recarga, INF=infiltración. En los suelos CC (capacidad de campo) y PM (punto de marchitamiento), Benavides y Caro (2019)

Parte de la explicación para la presencia de las sequías en Casanare podría estar en la naturaleza arenosa de los suelos que permiten que el agua se infiltre fácilmente.

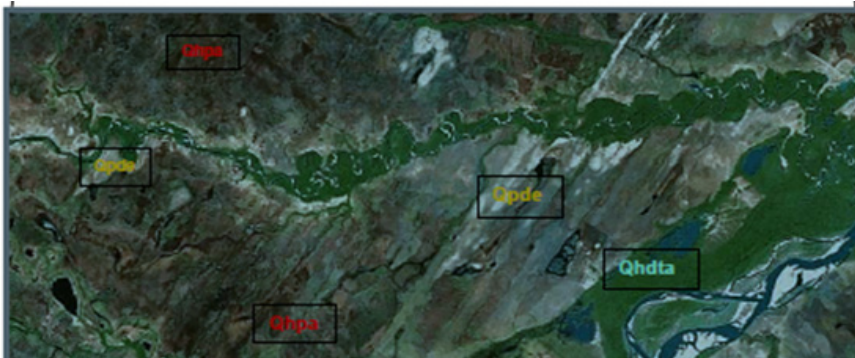
La escasez de agua, especialmente en época seca, es posible mitigarla con estudios hidrogeológicos que ayuden a ubicar los acuíferos, y, por lo tanto, la ubicación acertada de los pozos. También se requieren estudios adicionales sobre la recarga y conexión hidráulica de los acuíferos.

Como los suelos en esta parte de las sabanas inundables son preferencialmente arenosos, el agua se infiltra con facilidad, lo cual permite recargar los acuíferos semiconfinados y libres que se pueden utilizar accediendo a ellos con pozos de agua. Estudios hidrogeológicos adicionales ayudarían a una mejor ubicación de las rocas contenedoras de agua. A partir de los resultados, se reafirma la hipótesis número 2 que indica que los suelos son principalmente arenosos debido a la cercanía y frecuencia de los ríos.

De la misma manera, se confirma la existencia de depósitos de ambiente eólicos conocidos como dunas, o médanos en la Orinoquía, tal como se ve en las estructuras diagonales que representan las dunas en la Figura 39, las cuales indican que los médanos tal vez son más frecuentes de lo que siempre se pensó. La presencia simultánea de depósitos fluviales y eólicos confirmaría la dominancia de los suelos arenosos en el área.

Figura 39

Presencia de depósitos eólicos cuaternarios (Qpde) o médanos en Casanare



Nota. SGC (2012)

7. ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL - DEFORESTACIÓN

Para los que apreciamos, vivimos o visitamos frecuentemente la Orinoquía, nos parece que la ganadería extensiva es parte del paisaje y algo que siempre ha estado ahí en la cultura llanera, no obstante, no siempre fue así.

Antes de la llegada de los españoles, la Orinoquía fue habitada por tribus indígenas que se movían desde los llanos hasta los páramos. Con la llegada de las misiones jesuitas hace 300 a 400 años entre los 1600 y 1700 se introdujo el hato ganadero con ganadería extensiva, donde se dejaba libre el ganado bovino por la llanura para luego ser capturado en la época de lluvias para ser llevado, en grandes rodeos, por Villavicencio y Sogamoso a Bogotá; o ser sacado por transporte fluvial, cuando esto era posible, hacia Venezuela.

Uno de esos hatos es Caribabare que tenía casi 450.000 hectáreas y que ocupó una buena parte de Casanare (Instituto Humboldt 2018). Las anteriores afirmaciones plantean dos interrogantes, el primero, ¿las llanuras que observamos en la actualidad siempre han sido así o estuvieron llenas de bosques?; el segundo ¿Cuál es la mejor vocación de esas tierras, ganadera, agricultura, bosques, o explotación mineral?

Los cambios que enfrentan los ecosistemas son frecuentemente más graves, estas transformaciones son más frecuentes y están relacionadas con las alteraciones en el uso del suelo, las que pueden ser lícitas o ilícitas. Al obtener los recursos naturales, el hombre transforma los componentes del sistema.

Dados los compromisos utilitarios que se dan entre los muchos integrantes, la modificación del estado de uno de ellos afecta, en mayor o menor medida, a los otros integrantes del sistema. A menudo, el resultado de las actividades humanas no se ve

inmediatamente. Además, a veces este se produce en lugares muy alejados del lugar donde se produjo la actividad humana.

De esta manera, es más complejo asociar un impacto en el medio ambiente con su fenómeno original. La mejor manera de estudiar los cambios a través del tiempo es analizando las transformaciones en la cobertura, la cual se relaciona con los rasgos que ocupan la superficie del planeta; entre estos la flora nativa, los bosques, los prados, los cuerpos acuáticos, los baldíos, las edificaciones y las construcciones.

El uso del suelo tiene que ver con la acción o utilización que el ser humano emprende de las distintas cubiertas del terreno para suplir sus necesidades. De acuerdo con el Instituto Geográfico, la cobertura vegetal se puede representar por la proyección de la vista de su techo, la que se considera como la manifestación completa del intercambio entre los factores bióticos y abióticos (IGAC, 1999).

Una manera de entender lo que pasó es mediante estudios multitemporales que determinan lo que se ha construido o desarrollado sobre el terreno y el impacto que esto ha tenido en regiones puntuales.

Para esto se analizan fotografías aéreas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi e imágenes satelitales, ligadas al uso de herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) en el análisis e interpretación de datos generados por las imágenes, para así diagnosticar qué tanto han cambiado las diferentes variables del componente cobertura vegetal en el tiempo, su causa y su evolución.

Como una manera de interpretar lo que ha sucedido a través del tiempo con la cobertura vegetal de la Orinoquía, se presentan análisis multitemporales de tres sectores: 1) en el municipio de Paz de Ariporo, 2) en el área de drenaje del río Cravo Sur (Yopal, Casanare), y 3) en isla del Charo (Saravena, Arauca).

7.1 Análisis multitemporal de Paz de Ariporo

En las últimas décadas, Colombia ha visto cómo la intensidad climática tanto de la temporada seca como de temporada de lluvias, es drástica, presentándose afectaciones como sequías e incendios, calamidades en la flora y la fauna, además extensas inundaciones o deslizamientos por causa de la sobresaturación de los cauces. Uno de los ejemplos más representativos se presentó en algunas veredas del municipio de Paz de Ariporo que en temporada seca sufre afectaciones por escasez de agua, no obstante en la temporada de 2013-2014 la sequía fue tan fuerte que resultó en una gran mortandad de chigüiros y de ganado vacuno, especialmente, en el área adyacente a las veredas de Centro Gaitán y Caño Chiquito (Figura 40).

En el contexto geográfico, Paz de Ariporo es representativo de la Orinoquía, no solamente por su gran extensión que lo hace uno de los municipios más grandes del país (13.793 Km²), sino también, porque se extiende desde el piedemonte, pasando por la sabana media, hasta la sabana baja limitada por el río Meta.

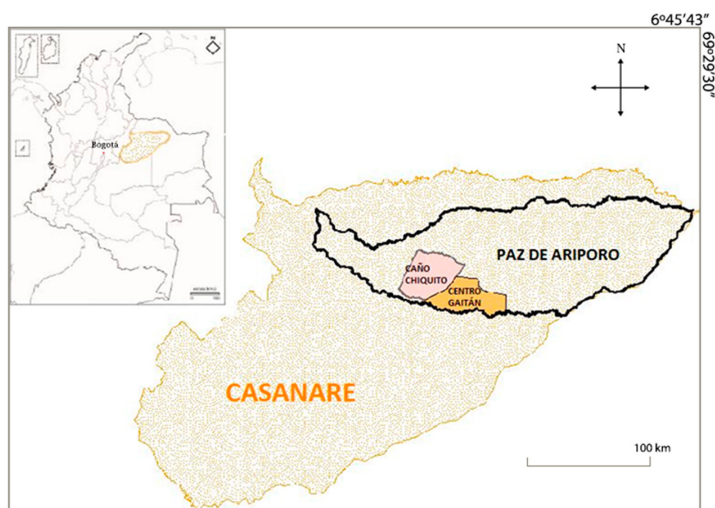
Los efectos climáticos que ha enfrentado esta parte de la Orinoquía colombiana están, relacionados con el cambio climático global, principalmente, mas la acción antrópica en una región que presenta un fuerte ciclo climático natural entre las épocas secas y lluviosas. La recarga o infiltración de agua se da desde el piedemonte nutriendo los ríos Guachiría, Muese y Ariporo; adicionalmente, dicha infiltración también se da de manera directa por las lluvias en la propia sabana, esta agua se mueve hacia las zonas de menor pendiente, y para su uso en diferentes actividades, se requiere encausarla y conducirla hasta sitios alejados.

El análisis de los cambios en la vegetación a través del tiempo o análisis multitemporal se hace para un periodo de 30 años. Un estudio de tal magnitud en tiempo es importante para la Orinoquía colombiana ya que ayudará en su modelamiento, y a determinar algunas de las causas que afectan el ciclo hídrico natural, así

como, las zonas con mayores afectaciones y las medidas que se deben tomar para mitigar sus efectos (Figura 40).

Figura 40

Ubicación de las zonas de estudio en el análisis multitemporal de Paz de Ariporo (Casanare)



Cobertura vegetal. En Colombia no se contaba con un sistema estandarizado, ni con un sistema concordante sobre la recopilación de la información relacionada con la cobertura del suelo.

Para responder a dicha carencia, el proyecto Corine Land Cover Colombia (CLC) estandarizó un procedimiento de sistematización con cualidades graduadas establecidas en concordancia con la información que se puede extraer de las imágenes satelitales Landsat TM de la NASA según las condiciones locales de Colombia.

El ajuste y consolidación de la metodología CLC facilita equiparar los porcentajes de cambio de uso del suelo, y ayuda a utilizar el mismo lenguaje entre muchas entidades que la utilicen, igualmente, a futuro facilitará la estandarización de la información.

Para la actualización cartográfica de la cubierta y utilización del suelo en toda el área de Paz de Ariporo, se utilizó una técnica basada en el proceso e interpretación de imágenes de satélite; subsiguientemente, esta interpretación se organizó jerárquicamente, usando las categorías generales de CLC: 1) Territorios artificializados, 2) Territorios agrícolas transitorios y permanentes, y pastos, 3) Bosques y áreas seminaturales (densos, fragmentados, abiertos o de galería forestal), pastizales y arbustos 4) Superficies de agua, y 5) Zonas húmedas.

Si se tiene en cuenta que las categorías mencionadas son para una escala de 1:100.000, se hicieron algunos ajustes en los niveles siguientes que permitieron dar más detalle, como los criterios fisonómicos de altura y densidad, o la directa revisión de campo, que permitieron definir claramente una determinada cobertura (Figura 41).

La base de datos Corine Land Cover para Colombia posibilita representar, calificar, clasificar y contrastar las propiedades de las coberturas del suelo, deducidas a partir del uso de imágenes satelitales de media resolución (Landsat), para el levantamiento de mapas de cubierta vegetal a escala 1: 100.000.

Figura 41

Pastos y bosques en las llanuras inundables



Nota. Alcaldía de Paz de Ariporo, PBOT (2014)

Ecosistemas sensibles. De las categorías de cobertura y uso del suelo mencionados anteriormente, los bosques de galería y los esteros son los más afectados, por lo que se hará especial mención de ellos. Los bosques de galería, generalmente están asociados a los cursos hídricos, son considerados un ecosistema de alta sensibilidad debido a las funciones de protección, regulación del ciclo hidrológico, así como el principal corredor de fauna silvestre (Alcaldía de Paz de Ariporo, PBOT, 2014).

Los bosques paralelos a los caños o de galería se caracterizan por tener una gran influencia de los ríos Ariporo, Muese y Guachiría, además, de los caños La Hermosa, El Venado, Pica pico, Aguas claras, entre otros; son determinantes para las condiciones hídricas y edáficas particulares que favorecen el establecimiento de un bosque continuo y extenso.

Su exuberante vegetación de árboles de hoja ancha en ocasiones asociada con palmas, cuyas copas pueden alcanzar hasta 25 metros de altura, no solo se debe a la mayor humedad, sino también, a algunas propiedades químicas favorables del suelo.

Los humedales y esteros son de gran importancia en la regulación del sistema hídrico de la zona, y para el desarrollo y establecimiento de la fauna, ya que no solo brindan gran parte del año agua y alimento a las aves, sino que también se constituyen durante la época seca en los únicos sitios de abastecimiento de agua para mamíferos y reptiles.

En Paz de Ariporo, las condiciones antes mencionadas configuran los esteros como una fuente de humedad y disponibilidad de nutrientes para la vegetación, que, a su vez, soporta grandes mamíferos y variedades de rastreros, acuáticos y pájaros. Es así como los esteros se convierten en extensiones que constituyen el hábitat para la fauna del municipio tanto acuática como terrestre, especialmente para las aves, en las que prevalecen las garzas (Figura 42).

Figura 42

Bosques de galería (caño La Hermosa) y estero en Paz de Ariporo



Nota. Alcaldía de Paz de Ariporo, PBOT (2014)

Metodología de teledetección. La energía electromagnética de los objetos, se puede percibir desde los satélites. La información sobre esa energía puede ser compilada de acuerdo con la frecuencia y fuerza de la onda electromagnética de reflexión, gracias a que todos los materiales rebotan la energía electromagnética. Los sensores cuantifican la fuerza de la radiación emitidas por un objeto particular y analizan sus particularidades a partir de las variaciones en la frecuencia.

Los sensores de los satélites LANDSAT-TM tienen varias bandas para medir los diferentes niveles de radiación y de esta manera, determinar la reflectividad de la cobertera vegetal, dicha reflectividad de la cubierta vegetal está controlada por 3 variables:

1. Textura del revestimiento vegetal, que depende de la densidad de las hojas, su repartición y su dimensión.
2. Las características ópticas de las partes que reflejan la radiación (tallos, hojas, etc.).
3. Orientación de la observación que está controlada por la orientación del sol, y por la localización del sensor respecto del anterior.

A pesar de que las hojas son las más comprometidas en la respuesta espectral de las coberteras vegetales, en algunos casos también son muy importantes otras partes de la planta como, los troncos, las partes reproductivas y los frutos, cuyos equilibrios acabarán determinando la firma espectral de la cobertera vegetal.

En Paz de Ariporo la clasificación y elección de coberturas vegetales se hizo a partir del análisis de imágenes satélites de la NASA (Landsat) para verificar los componentes determinados durante la fase de visitas al área. De esta forma, se obtuvo los mapas de cobertura en los diferentes años a estudiar a escala 1: 100.000. Las coberturas se escogieron siguiendo la Metodología Corine Land Cover "NATIONAL LAND COVERAGE LEGEND" ajustada para Colombia por el IDEAM (IDEAM, 2010).

El último paso fue establecer el diagrama de fases a seguir para la asignación final de la cobertura:

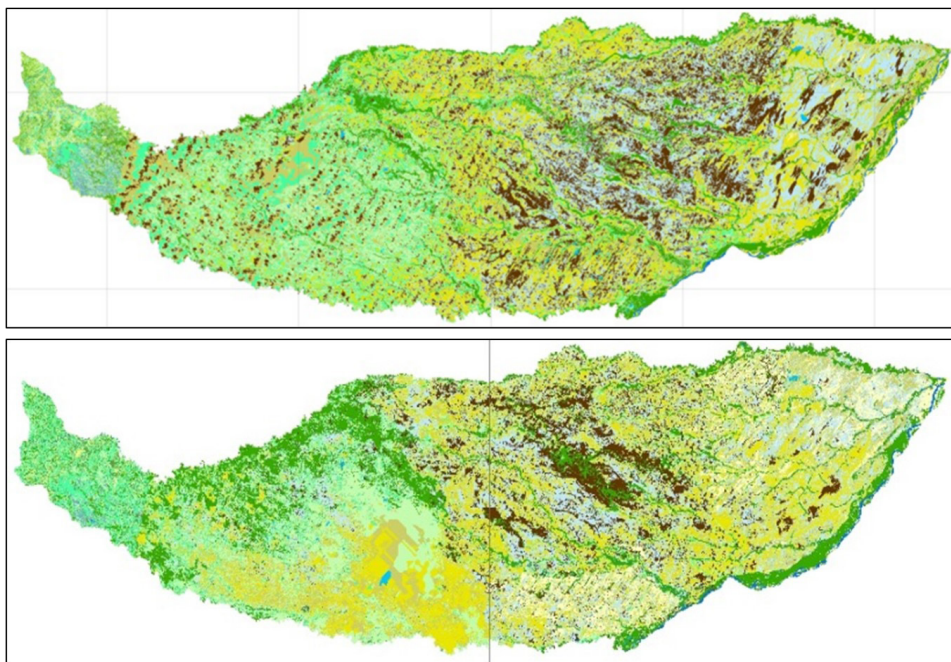
- Escogencia de información fundamental.
- Establecimiento de las bases de datos.
- Salidas al área de estudio.
- Refinamiento analógico de los resultados de sensores.
- Discusión y equivalencia.
- Establecimiento de las características de la cobertera vegetal.

Resultados: Los resultados de los análisis multitemporales de imágenes satelitales dependen de las combinaciones de bandas que permiten resaltar aspectos relacionados con la cobertera vegetal, y que permite encasillarlos en unas categorías previamente establecidas de vegetación y de cobertura del suelo.

El principal resultado es la cobertura del suelo de paz de Ariporo a escala 1:100.000 en dos épocas diferentes. La Figura 43 presenta el contraste de la cobertura del suelo en Paz de Ariporo entre 1986 y 2016 con una diferencia de 30 años.

Figura 43

Comparación de la cobertura terrestre de Paz de Ariporo entre los 1986 y 2016



Nota. Chaparro (2017)

La Figura 43 ilustra que los herbazales no arbolados (amarillo ocre) han crecido a expensas de los bosques, especialmente, hacia la parte centro-sur del área, que corresponde con las veredas donde se presentó la sequía con mayor severidad, también muestran que los terrenos desnudos y degradados han crecido en los últimos 30 años.

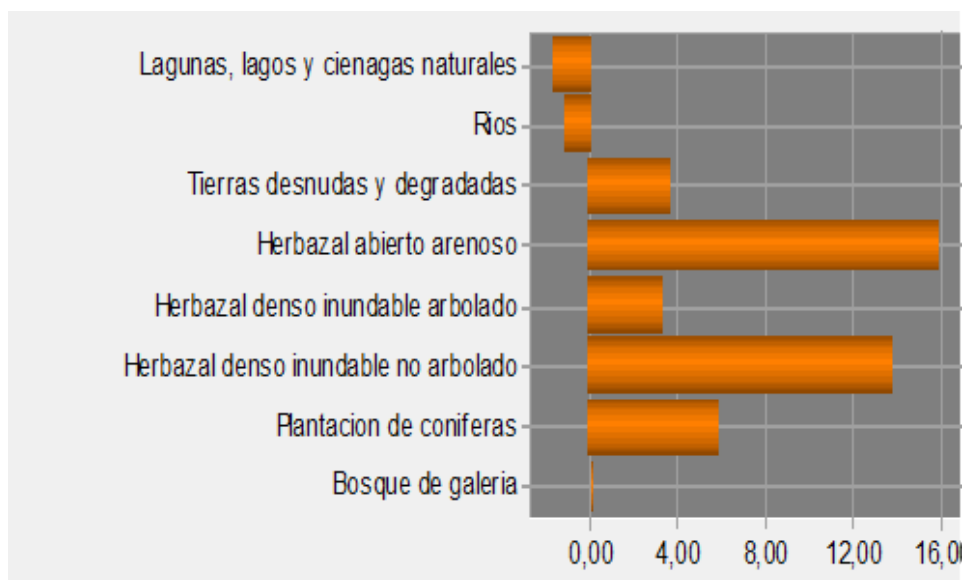
Asimismo, el contraste entre las dos épocas permite concluir que los bosques de galería (paralelos a los cursos de agua) se han mantenido a lo largo de los ríos y caños principales (NW), pero han disminuido en los caños más pequeños.

El proceso de la información con el software Idrisi posibilita estimar diferentes situaciones de transformación durante el lapso de tiempo del análisis. Los contribuyentes son los efectos sufridos o generados por las diferentes coberteras con relación a una cobertera en particular.

El resultado positivo indica que las otras coberteras invadieron el área de la cobertera específica; por el contrario, un resultado negativo indica que la cobertera en particular es invasora de las otras coberteras. Los valores están dados en km². La Figura 44 presenta las unidades de cobertera que contribuyeron a la transformación neta para la galería bosque-sabana entre 1986 y 2016. Obsérvese cómo los pastizales arenosos abiertos y los pastizales inundados densos no arbolados crecieron a expensas del bosque de galería.

Figura 44

Listado de los contribuyentes al cambio de los bosques de galería-sabana en %



Nota. Chaparro (2017)

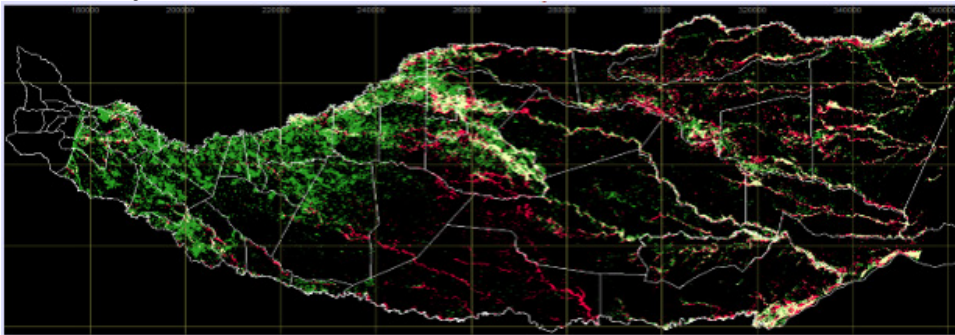
Los mapas que representan las pérdidas y ganancias de cobertura resaltan cómo cambia cada cobertura del suelo a lo largo del tiempo, ya sea porque los pastizales ganan superficie y se expande, o porque las plantaciones de bosques se reducen o no se modifican.

La herramienta Land Change Modeler Gains and Losses representa estos tres tipos de cambios que sufre cada una de las coberturas. Los resultados de este estudio son de gran ayuda por el detalle que presentan en las zonas con intervención antrópica.

La Figura 45 presenta las ganancias (verde) y pérdidas (rojo) de los bosques de galería. A partir de lo anterior, se puede observar que las pérdidas de bosques de galería se han dado, principalmente, hacia los sectores sur y oriente del municipio, entre los caños Chiquito y El Venado donde las sequías han sido más intensas.

Figura 45

Ganancias (verde) y pérdidas (rojo) de los bosques de galería en Paz de Ariporo entre 1986 y 2016



Nota. Chaparro (2017)

Análisis de resultados. En la sabana media, hay una transformación entre pastizales, pastos naturales y cultivos de arroz durante el periodo del estudio, y es evidente el aumento de los cultivos y la ganadería, esta situación generó cambios en los drenajes, afectando los flujos naturales del agua, esta, al no poder llegar a su destino termina por evaporarse.

Hacia el piedemonte, la transición más significativa es la de bosques fragmentados a mosaicos de cultivos y pastos, por lo que se observa que debe mejorarse la conservación de los bosques ya que allí se originan las corrientes que riegan las zonas medias y bajas de la sabana (Chaparro, 2016).

Para las tres partes de la sabana estudiadas, los mapas de análisis multitemporal evidencian un problema deforestación sistemática, allí se aprecia el énfasis en producción y no en preservación. La disminución de los bosques no solamente tiene impacto en la preservación del agua, sino también en la afectación del hábitat de muchas especies.

En ese sentido, la Tabla 2 muestra que los escenarios más desfavorables en los últimos 30 años son el incremento del herbazal abierto a arenoso por la remisión de la cubierta vegetal, lo que permite el afloramiento de las dunas (médanos), que son frecuentes en la zona; la disminución del bosque fragmentado y el incremento de los cultivos y pastos, y en general, la deforestación de gran parte del área de estudio.

Tabla 2

Principales escenarios de cambio entre 1986 y 2016

Escenarios favorables	Escenarios desfavorables
Permanencia de herbazal denso inundable arbolado en área de la reserva indígena NE).	Paso de herbazal abierto arenoso a tierras desnudas (este).
Incremento de bosque de galería en alrededores del hato La Aurora (NW).	Detrimiento de bosque fragmentado y paso a cultivos y pastos, en el piedemonte
Permanencia de herbazales arbolados.	Sectores de cambio entre pastos y áreas naturales y cultivos y pastos
Permanencia de bosque de galería en los ríos Meta y Ariporo.	Disminución del bosque en buena parte del área de estudio

Nota. Tomada textualmente de Chaparro (2017)

Las sabanas, los bosques y los esteros se deben considerar como ecosistemas estratégicos que requieren urgencia para su protección y mantenimiento debido a sus valores ecológicos, culturales y por los aportes directos que generan para la población y el progreso municipal.

Adicionalmente a estos ecosistemas, las tierras desnudas y degradadas se encuentran asociadas a las áreas que han experimentado procesos intensos de degradación o deterioro, ya sea por procesos naturales o intervención humana (vías, trochas y caminos, por ejemplo).

Al respecto, La zona NW es el área que más ha ganado en bosques en los últimos años y coincide con la reserva natural La Aurora, y la zona que más ha perdido bosques es la zona centro-sur del área que coincide con las veredas más azotadas por la sequía de 2013-2014 (Centro Gaitán y Caño Chiquito); seguramente, la pérdida de cobertura vegetal está asociada con la intensa intervención antrópica de los últimos años en infraestructura, cultivos agroindustriales y exploración de hidrocarburos.

7.2 Análisis multitemporal de la cuenca de aporte del río Cravo Sur

Yopal está localizado en el costado occidental de Casanare, su altitud oscila entre los 2.000 m.s.n.m. hacia la parte de Cordillera y hasta unos 150 m.s.n.m. en la planicie. Este municipio hace parte de la zona de drenaje del río Cravo Sur que nace en los páramos de Mongua (Boyacá), pasa por Labranzagrande, Yopal y Orocué antes de llegar al río Meta.

Como Yopal ha venido experimentando grandes cambios en los pasados 40 años, el enfoque primordial del estudio de Parra y Guío fue interpretar la dinámica fluvial analizando imágenes de satélite y fotografías aéreas desde 1985 a 2009, con una periodicidad de análisis de diez (10) años. También se analizó la relación entre la geomorfología, cobertura y dinámica fluvial del río Cravo Sur en dicho período.

Finalmente, se quería obtener un mapa generalizado de susceptibilidad a inundación partiendo de los diferentes análisis realizados en cada periodo de tiempo (Parra y Guío, 2018).

Metodología. Análisis del comportamiento del río a través del tiempo mediante la comparación de imágenes Landsat de la NASA tomadas en diferentes fechas, durante un periodo de 24 años; comprendidos desde el año 1985 a 2009, realizando una cualificación y cuantificación de los cambios geomorfológicos del río en su planicie de inundación (Parra y Guío, 2018).

Análisis de cobertura vegetal de la zona de drenaje del río Cravo Sur. El análisis de la cobertura vegetal en la cuenca de aporte considera la gran cantidad de agua y sedimentos transportados por el río desde las zonas de la parte alta hasta la parte baja de piedemonte; también se relaciona la cantidad de vegetación que se encuentra debido a la importancia de su variación a través de los años, causada por la intervención antrópica.

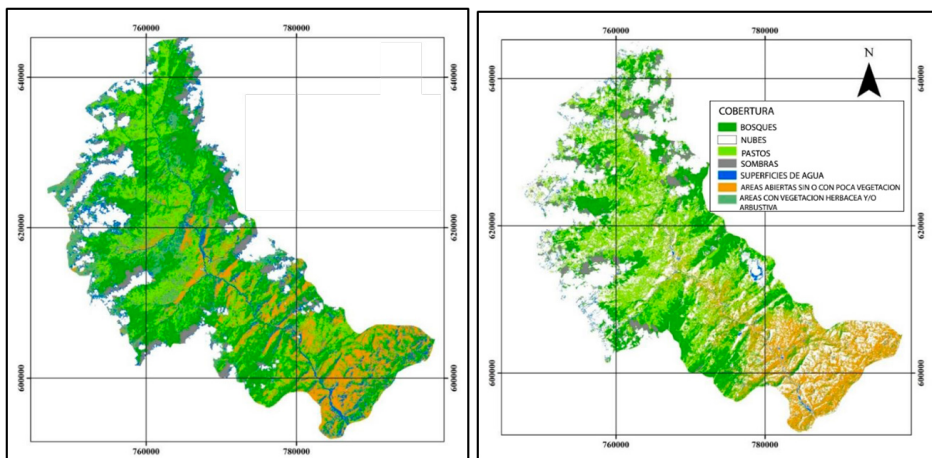
Se compararon las imágenes de 1985 y 2009 con una diferencia de 24 años, teniendo en cuenta el área de cada tipo de vegetación presente en la cuenca de aporte y el cambio que se dio a través de los años. Al tener imágenes de la misma zona en diferentes fechas y comparando la cobertura con el fin de hacer un seguimiento temporal del cambio estacional, se evidencian zonas en las cuales habrá una evidente correlación, y como es en este caso, situaciones que muestren una ausencia de correlación, ya que representan cambios importantes.

En el año 1985 se pudo observar una gran cantidad de vegetación, con un área calculada de 569,83 Km² para zonas de bosques, pastos, herbáceo o arbustiva, y un área de 110,01 Km² para zonas con poca vegetación. En el 2009 se puede evidenciar una disminución considerable de las zonas donde hay presencia de vegetación como los bosques, pastos y zonas arbustivas o herbáceas, representando la misma cantidad de área que en el año 1985, lo que cambia es el tipo de vegetación.

Se advierte una disminución en los bosques y arbustos, con un pequeño incremento en los pastos. En lo que tiene que ver con zonas abiertas sin vegetación, es notorio que estas zonas aumentaron en gran medida, lo que conlleva a tener afectaciones serias en la cuenca aguas abajo (Figura 46).

Figura 46

Contraste de la cobertura vegetal en la cuenca del río Cravo Sur entre 1985 y 2009

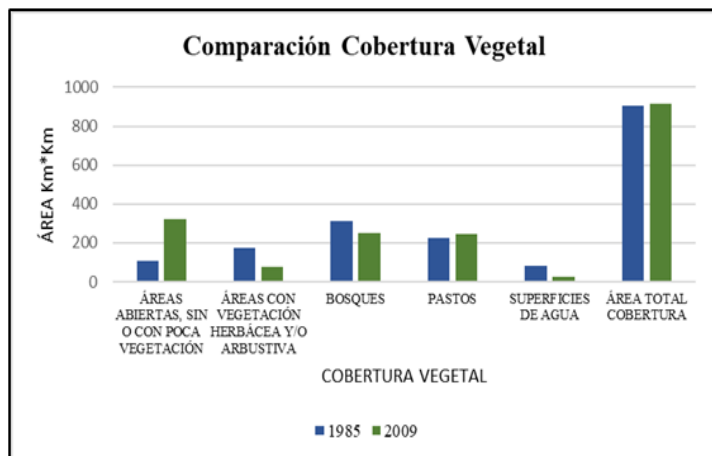


Nota. Parra y Guío (2018)

La Figura 47 presenta la relación gráfica de la cubierta vegetal entre 1985 y 2009. Se aprecia un cambio considerable, principalmente, en la cobertura de áreas con poca o ninguna vegetación, por lo que se concluye que en esta zona ha habido cambios importantes en la cobertura vegetal por intervención antrópica, aumentando la deforestación a través del tiempo en las zonas altas y reemplazándolas por pasto; lo que facilita la afectación por agentes erosivos; que no solamente causan erosión sino que permiten que las fuerzas actuantes lo hagan con mayor velocidad, esto genera que la escorrentía sea mayor y con un aporte considerable de agua-sedimento en zonas donde tienen salida hacia la parte baja de piedemonte por el cauce del río Cravo Sur.

Figura 47

Relación gráfica por Km² de la cobertura vegetal ente 1985 y 2009



Los aumentos en las áreas abiertas, con escasa o ninguna vegetación para el año 2009, se puede correlacionar con el incremento en el aporte de sedimentos hacia la corriente del río Cravo Sur, que hace más dinámica su migración hacia la llanura, ya que al existir mayor carga de sedimentos se hace más efectiva la erosión en el lado cóncavo de los meandros; adicionalmente, el nivel base del río subirá con mayor rapidez aumentando las zonas susceptibles a inundación, y la pendiente del río cambiará de forma significativa.

Conclusiones. Se determinó que las transformaciones en la cubierta vegetal en la cuenca de aporte tienen relación directa con el aumento de desplazamientos del cauce a través de los años, produciéndose un aumento en el material de carga, lo que resulta en mayor erosión, más sedimentos en el cauce del río, y mayores posibilidades de desbordes e inundaciones.

En consecuencia, se deben apoyar las iniciativas que promuevan la conservación y restablecimiento forestal en las áreas adyacentes al río Cravo Sur para mejorar su régimen hídrico. Por lo tanto se concluye que el cauce del río Cravo Sur ha permanecido estable

y sin mayor erosión en la margen derecha que limita con la parte urbana de Yopal, es decir, es vital para la planeación de la expansión urbana.

Sin embargo, se recomienda que el desarrollo de la ciudad sea hacia las zonas distales del abanico. Finalmente, se aprecia un aumento considerable en la cobertura de áreas abiertas sin vegetación, y por esto se puede afirmar que en esta zona ha habido cambios importantes en la cobertura vegetal por intervención antrópica.

7.3 Análisis multitemporal de la isla del Charo (Saravena, Arauca)

La isla del Charo es el reflejo de cómo una parte de los bosques del departamento de Arauca se convirtieron en potreros para ganado. La isla está ubicada en Saravena y está delimitada por el río Arauca y una madre vieja o antiguo cauce del mismo río (Figura 48), el nombre de Charo se debe a que la isla estaba llena de árboles de Charo.

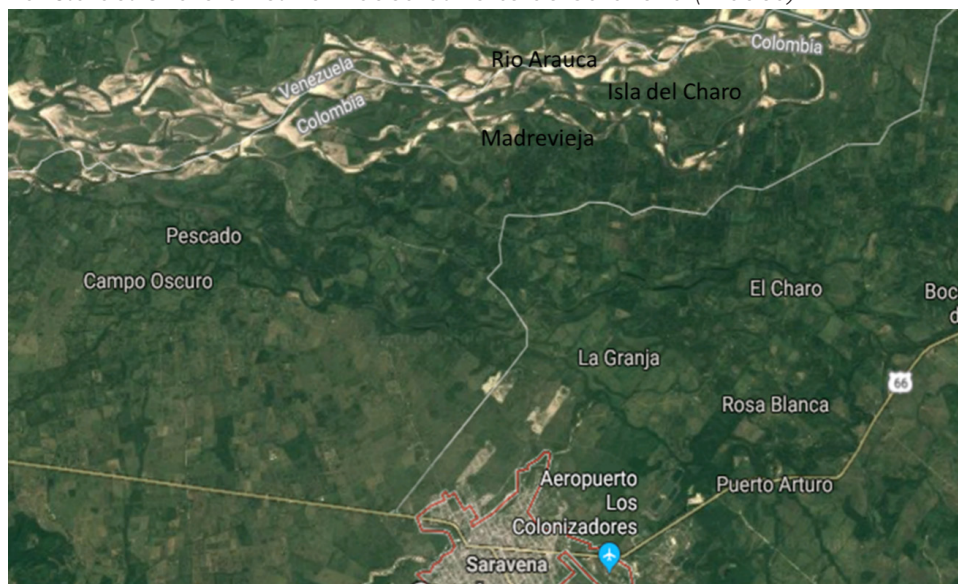
Al respecto, Moncayo (2017) reporta que en 1947 las 16.000 hectáreas de la isla estaban colmas de bosques de Charo, sin embargo en su estudio multitemporal de 2005 encontró que sobrevivían solo 607 hectáreas, por esta razón, en 58 años, la isla perdió el 96,3 % de su bosque.

El estudio multitemporal del profesor Moncayo de 2017 titulado “El territorio como poder y potencia, relatos del piedemonte araucano” en la región del Sarare incluyó 4 sectores, entre estos, la isla del Charo.

Dicho estudio cubrió 6 épocas desde 1947 a 2005, utilizando fotografías del IGAC e imágenes satelitales de la NASA, y la misma metodología utilizada en Paz de Ariporo (Corine Land Cover) para identificar la cobertura de la isla del Charo. No se detalla la metodología porque es similar a la utilizada en el estudio multitemporal de la cobertera de Paz de Ariporo.

Figura 48

La isla del Charo en el río Arauca al norte de Saravena (Arauca)



Resultados. Como en los estudios multitemporales de más de 50 años, se utilizó la técnica basada en el procesamiento y deducción de imágenes satelitales (Landsat). En la fase siguiente, la información obtenida se dispuso en forma jerárquica de acuerdo con las categorías establecidas por CLC (Corine Land Cover), para finalmente caracterizar las coberturas en los diferentes períodos y así poder ver cómo cambiaron en el tiempo los pastizales, bosques, humedales, etc. (IDEAM, 2010).

Los resultados de la deforestación en las 19.851 hectáreas de la isla del Charo entre el cauce principal del río Arauca y el cauce principal conocido como Madrevieja en Saravena, fueron desoladores. En 1947 la zona contaba con aproximadamente 16.763 hectáreas de árboles de Charo (el 84,4% de su superficie), cifra que se redujo drásticamente en 2005, cuando solo se registraron 607 hectáreas. El Charo es originario de América y se extiende desde Perú hasta México, y está en peligro por el exceso de explotación.

Las estadísticas de la deforestación se reducen así: Entre 1947 y 2005, la isla perdió un 96,3% de bosque denso constituido por grandes árboles que alcanzaban los 40 metros de alto y un diámetro de 1 m.

Ese porcentaje de pérdida significó que miles de hectáreas desaparecieron en 58 años; sin embargo, la mayor parte de la deforestación se dio en 10 años a partir de 1960 cuando se talaron 15.725 hectáreas. De manera que, lo que antes era un frondoso e impresionante bosque, hoy ha sido reemplazado por potreros.

La investigación de Moncayo también registra que el torrentoso río Arauca fue afectado porque los diversos meandros que tenía en los años 40 fueron desapareciendo con el tiempo hasta tornarse recto como lo es en la actualidad.

Como resultado de la tala de bosques, los meandros del río Arauca fueron afectados, tanto así que, al punto que algunos desaparecieron y aumentó la intervención antrópica en el área, entre estas las construcciones; y como resultado, cambio la dinámica del río, aumentó la erosión del cauce y afectó la frontera misma con Venezuela Moncayo (2017).

Implicaciones. Al mismo tiempo que los bosques de la isla del Charo iban desapareciendo, las zonas de pasto iban aumentando precipitadamente. En 1947 no se tenía ganadería en la zona, para 1960 albergaba 32 hectáreas, y para 2005 las hectáreas convertidas en potreros ya superaban las 10.891 hectáreas con pastos.

Así también, y según el investigador Moncayo, la tala masiva de bosques de Charo fue incentivada por el Estado ya que la legalización de las tierras dependía de si las mismas estaban taladas. Una vez que los árboles eran talados, estos se descomponían in-situ ya que no había forma de sacarlos o comercializarlos.

Adicional a esto, el banco estatal (Caja Agraria) solo prestaba dinero para la compra de ganado vacuno. Como resultado, se presentó una deforestación masiva del Sarare en un período de tiempo corto.

Esto ayudaría a explicar el aumento de cabezas de ganado por hectárea en el área y la afectación de las especies silvestres en este municipio como lo ha reportado el Instituto Alexander von Humboldt (2016).

7.4 Conclusiones y recomendaciones

Es necesario recuperar áreas de espacios naturales en el piedemonte, porque esta zona es la más importante en el flujo del agua para las sabanas. Para lograrlo, se pueden incentivar actividades locales de preservación.

En la sabana también es vital aumentar la cobertera vegetal, no solamente en las sabanas abiertas, sino también en los bosques de galería. Igualmente, se deben considerar actividades silvopastoriles con aumento de la densidad de los árboles en los potreros. La cobertura vegetal podría mejorarse si se utilizan pastos para suelos ácidos y baja capa orgánica.

Las sabanas inundables han disminuido por drenaje y otras actividades antrópicas. Por lo tanto, los esteros y demás humedales se deben preservar por ser retenedores de agua y por favorecer la recarga de los acuíferos. Muchos herbazales abiertos se han tornado arenosos por la remoción de la cubierta vegetal, dichas situación causa por el posible afloramiento y crecimiento de las dunas (médanos) que subyacen en gran parte de las sabanas bajas.

Se deben evaluar los mapas de tendencias de cambio con el fin de hacer predicción de zonas susceptibles a modificaciones desfavorables de cobertura de acuerdo con los modelos de cambio climático. Además, es importante delimitar e intervenir las zonas que han sido más afectadas, y sensibilizar a los pobladores de estas áreas, para que sean ellos quienes promuevan la preservación.

De manera que, si no se preservan los bosques, el efecto combinado del cambio climático y la actividad antrópica terminarán afectando la disponibilidad de agua, y aún el mismo rendimiento agropecuario. Porque los bosques no solamente inyectan agua a la atmósfera en forma de vapor, sino que también disminuyen la temperatura de las zonas adyacentes.

Los tres estudios multitemporales presentados anteriormente, muestran cómo en tres áreas específicas, la pérdida de las zonas boscosas ha afectado la conservación del agua, la biodiversidad, el cauce de los ríos, y en últimas, estarán afectando la sostenibilidad ambiental. Si a la deforestación e intervención antrópica, le sumamos el cambio climático, los tonos de verde típicos de la Orinoquía serían remplazados lenta e imperceptiblemente por tonos marrón.

8. EL AGUA Y LA AGRICULTURA

En los últimos 20 años, en la extensa cuenca de la Orinoquía se han desarrollado cultivos agroindustriales como palma, arroz y caña de azúcar porque Colombia siempre ha querido expandir la frontera agrícola para mejorar las condiciones del campo y para aumentar las exportaciones (Figura 49).

Desde las altas esferas del gobierno colombiano se quiere convertir a la región de la Orinoquía en una despensa mundial de alimentos, no solo con los cultivos anteriormente mencionados sino también con caucho, soya, maíz, algodón y bosques maderables como eucalipto. Por esta razón, la importancia de esta región y sus posibilidades se refleja en el CONPES 3797 (2014), en el que el gobierno nacional propone líneas de acción para su desarrollo, especialmente, toda aquella que cubre la altillanura a través de la infraestructura, el ordenamiento del territorio y la inversión privada en agroindustria; con esos nuevos desarrollos se espera generar 300.000 empleos directos, promoviendo que aporte el 0,4 % del PIB colombiano.

Figura 49

Monocultivos de arroz en la Orinoquía



El clima de la cuenca del Orinoco concuerda con un ambiente tropical lluvioso de sabana. Geográficamente, el área presenta relieves suaves con pequeñas ondulaciones y pendientes bajas. Los suelos no tienen buen drenaje y se clasifican como ácidos, con poca a muy baja fertilidad por no tener altos niveles de materia orgánica. La red hidrológica está compuesta por ríos grandes con cauces meandriformes y migratorios, además presenta desbordamientos estacionales desde hace miles de años, y un dominio regional de los ríos Meta y Orinoco.

El resultado de la dinámica fluvial es un abundante depósito aluvial con presencia de depósitos arenosos, limosos y arcillosos, con espesores cambiantes. El tamaño de los sedimentos depende de la cercanía del río, es decir: sedimentos arenosos cerca de los lechos de los ríos, y los sedimentos más finos distantes de ellos, llevados por las inundaciones de los ríos (Capítulo 6).

La interdigitación de los diferentes depósitos cuaternarios, actúa como un extenso acuífero libre que se recarga anualmente por ocho o siete meses, tiempo en el que la sabana está inundada de agua. Asimismo, la disposición geomorfológica y de suelos bajo un ambiente de llanura aluvial, en ocasiones favorece la retención del agua superficial durante los períodos de verano (noviembre a marzo).

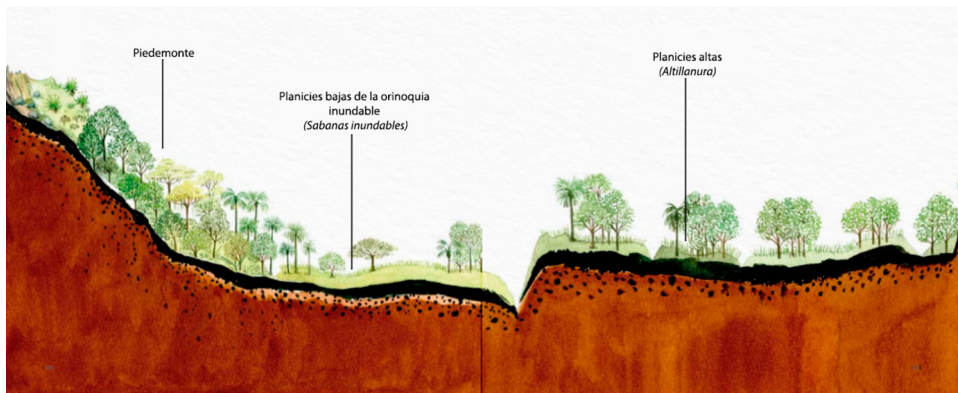
En las zonas deprimidas con sustratos arcillosos denominados bajos o esteros que pueden retener espejos de agua, su permanencia en el tiempo está sujeta a los niveles de evaporación de los humedales estancados en noviembre o diciembre cuando termina la temporada de lluvia. Por otro lado, los suelos de textura arenosa, aunque reciben buena recarga, también enfrentan una rápida y continua disminución del agua acumulada en la superficie por infiltración y por evaporación, hasta que las condiciones de filtración debido a la lluvia y el desbordamiento se repiten.

La parte plana de la Orinoquía se divide en dos grandes subregiones, la inundable y la altillanura. Por un lado, la Orinoquía inundable está comprendida entre el río Meta y la Cordillera Oriental en límites con Boyacá, además, está encajonada entre la cordillera y la altillanura (Figura 51). Sus suelos son poco evolucionados.

Presentan guijarros y gravas entre arenas y arcillas sedimentadas de origen andino. Las zonas influenciadas por el viento (llanura eólica) se encuentran al este y están conformadas por arenas y limos finos. Por el otro, se encuentran las altillanuras, que son planicies altas ubicadas entre el sureste del río Meta y el Escudo Guayanés (Figura 50).

Figura 50

Perfil de la Orinoquía que muestra: la cordillera a la izquierda desde los páramos hasta el piedemonte, la llanura inundable entre el piedemonte y el río Meta en el centro, y la altillanura a la derecha



Nota. Instituto Humboldt (2018)

En el CONPES 3797 (2014) mencionado anteriormente, se proponen estrategias para lograr el desarrollo de la región orinoquense a través de obras de infraestructura, el ordenamiento territorial y las facilidades para la inversión privada.

El CONPES reconoce que la Orinoquía es un lugar altamente heterogéneo y que requiere un plan de desarrollo diferenciado para cada una de las regiones.

En general, se habla de 5 zonas o ecosistemas: 1) de montaña, 2) piedemonte, 3) sabanas inundables, 4) altillanura y 5) zona de transición hacia la Amazonía. El Estado colombiano se quiere enfocar en la altillanura que cubre los departamentos de Meta y Vichada para aumentar en 10 años de 80.000 a 780.000 hectáreas sembradas con diferentes cultivos, pero en el mismo CONPES no solo se nombra la altillanura, sino también las sabanas inundables como zonas donde se van a priorizar los proyectos agroindustriales.

Un referente para el desarrollo de la agricultura en la región es el Cerrado Brasileño, que es una extensa área pantanosa en el centro de Brasil donde se ha producido un milagro agrícola. A pesar de que hace unas décadas, el Cerrado era inadecuado para la agricultura, hoy produce una parte importante de los granos que exporta Brasil.

8.1 La agricultura de la Orinoquía en cifras

Desde hace más o menos 20 años la Orinoquía es la tierra prometida de Colombia, especialmente para la agricultura por la existencia de tierras amplias y fértiles en las planicies y en el piedemonte. Ese inmenso lienzo de todas las tonalidades de verde está cambiando de color con los monocultivos.

Por años, la pequeña agricultura de pan coger no podía competir con el más lucrativo negocio de la ganadería, pero con los cultivos industriales fue diferente y estos ya compiten con la ganadería, por está razón en algunos municipios hay menos reses y más cultivos industriales.

La altillanura ha venido transformándose lentamente en una planicie agroindustrial en aquellas zonas donde es factible el mejoramiento y mecanización de suelos para cultivo de maíz o soya y producción de alimento para cerdos. También ha sido escenario desde hace

algunas décadas de ensayos forestales para el cultivo de eucalipto y pino caribe para la extracción de colofonia (un importante disolvente orgánico) y otros productos como briquetas o posterío de cercas.

Los cultivos agroindustriales se encuentran concentrados en Meta y Vichada. En el Meta, Puerto López y Puerto Gaitán representan el 82% del área cultivada. Otros municipios con cultivos importantes en la altillanura son Cumaribo, Mapiripán, Santa Rosalía, Puerto Carreño y La Primavera.

Los ecosistemas de altillanura han coexistido con la ganadería extensiva tradicional desde el siglo XVI, pero en las últimas décadas se ha reemplazado su cobertura vegetal nativa por pastos introducidos para la ganadería semi-intensiva, plantaciones agroindustriales de maíz, frijol o soya, y cultivos forestales de especies foráneas o frutales nativos.

En las actuales sabanas de la altillanura aparecen nuevos ecosistemas más o menos diversos, como los cultivos de palma utilizada para la producción de aceite que ha tenido un importante incremento en la región, ayudando a que Colombia produzca cerca del 2% de la producción y que ocupe el cuarto lugar a nivel mundial.

Los departamentos de la Orinoquía que contribuyen en esta producción son Meta con 30,4% y Casanare con el 6% del total nacional, aunque también se encuentran en más de 120 municipios y 17 departamentos.

De acuerdo con información de Fedepalma, existe un importante potencial para este cultivo, particularmente en Casanare, Meta y Arauca. Este potencial está impulsado por el crecimiento de los mercados de aceites y se fortalece por la creciente promoción de los biocombustibles. Una buena parte del paisaje de sabana se ve ahora transformado por inmensas zonas de palma (Figura 51) (Mesa, 2014).

Figura 51

Cultivos de palma en la Orinoquía



En la Orinoquía algunos cultivos crecen de forma acelerada como el arroz y la palma, y no son los únicos, ya que les siguen otros como bosques, caña, café, plátano, cacao, caucho, piña, y aguacate.

Todo este crecimiento se debe a las bajas pendientes del terreno, al precio bajo de la tierra, y a la manejable adaptación de la zona para diversos propósitos agrícolas al tener diferentes pisos térmicos. Sin embargo, la gran ventaja competitiva de esta región, se constituye en la alta posibilidad de establecer cultivos a gran escala, por la disponibilidad de la tierra y abundante agua en la región (Tabla 3).

Tabla 3*Número de hectáreas de cultivos industriales en la Orinoquía de 2009 a 2019*

Cultivo	Número de hectáreas 2009	Número de hectáreas 2019	Metros cúbicos de agua para cultivar una hectárea
Arroz	169.054	240.000	10.000
Palma africana	104.000	204.000	8.000
Plátano	42.740	34.000	-
Soya	24.609	36.000	-
Caña de azúcar	10.500	22.000	-
Cacao	10.920	20.918	-
Yuca	19.313	8.500	-

Nota. DANE-ENA (2019) Encuesta Nacional de Agricultura

8.2 El agua y la agricultura

Los grandes desafíos de los monocultivos en la Orinoquía son: la utilización del agua, la deforestación, y la intervención de las sabanas inundables. Como se mencionó en los capítulos previos, aunque la Orinoquía cuenta con mucha agua por la intensa precipitación durante los cuatro a cinco meses del verano de noviembre hasta abril, se viven fuertes sequías durante las cuales la sabana inundable adquiere aspectos semidesérticos.

Esto significa que cualquier actividad que se desarrolle, incluyendo las aguas subterráneas, debe tener como prioridad la preservación del agua con conocimiento y cuidado. Además, se debe velar por no contaminar ni agotar las fuentes de agua. Ya hay evidencia de deterioro de las aguas por exceso de fertilizantes y químicos en algunos cultivos como el arroz (Veloza y Morales, 2009).

La agricultura, durante el invierno utiliza el agua lluvia construyendo drenajes para acumularla, pero durante el verano al faltar la lluvia, se utilizan los ríos y el agua subterránea. Esto ha propiciado que en la región haya una gran cantidad de pozos subterráneos, tantos que en cada finca hay varios construidos por las diferentes entidades gubernamentales.

En opinión de un experto en la región, lo que hasta el momento se ha hecho, es que el medio se adapte a la agricultura y no, que la agricultura se adapte al medio. Muchas de las actividades relacionadas con la agricultura se adelantan sin contar con suficientes investigaciones para conocer su impacto y sin rotación de cultivos lo que disminuirá el uso de químicos (Semana, 2014). Lo que desencadena, que, al realizar dichas labores, sin el conocimiento respectivo, se estaría transformando de manera insostenible o perjudicial los ecosistemas.

La publicación Semana (2014) agrega que la perseveración de las aguas debe comenzar con el cuidado de las cuencas altas de sus ríos en los páramos y el piedemonte, e investigar el mejor aprovechamiento de las sabanas inundables con la mínima transformación posible.

Además de entender el tema hídrico y conocer cómo se mueven las aguas superficiales en la sabana, se necesita comprender cómo se mueven las aguas subterráneas, cómo se mueven los ríos y qué impacto tienen las diferentes actividades agrícolas o mineras en la cantidad, calidad y disponibilidad de agua, tanto para las necesidades de los habitantes, como de los ecosistemas.

Como en la agricultura cada vez se está utilizando más el agua subterránea, especialmente durante el verano, se debe conocer sus orígenes, volúmenes y calidad; especialmente, se debe entender cómo interaccionan las aguas de los cultivos con la precipitación de las aguas lluvia y con las aguas de superficie de los ríos y las

zonas inundables, porque siempre hay una conexión de las aguas superficiales con las subterráneas, y tras esas conexiones se mueven los contaminantes (Capítulo 6).

Respecto de la calidad del agua, es bien conocido que las aguas subterráneas de la Orinoquía tienen altos contenidos de hierro que, en la generalidad de los casos, sobrepasan el estándar permisible para aguas potables (0.3 ppm); esto se debe a que muchas de las rocas y sedimentos de la sabana son de origen fluvial y pantanoso y como resultado se forman costras de hierro en las rocas cuaternarias.

Algunas de las zonas con intensos monocultivos ya han reportado altos contenidos de fósforo como es el caso del municipio de Maní (Veloza y Morales, 2009). En algunos pozos subterráneos se han encontrado nitritos, que supone contaminación por aguas negras y por establos. El fenómeno de la contaminación del agua por excretas del ganado es ampliamente conocido en el mundo por la posible contaminación bacteriana, por esta razón ya hay legislación al respecto (Capítulo 9).

Siempre se sospechó que las sabanas de esta región son de origen fluvial y que estaban recubiertas por materiales finos arcillosos producto de las inundaciones periódicas, lo que protegería las aguas subterráneas de la contaminación, pero al mismo tiempo impediría la penetración del agua y la invasión de los acuíferos superficiales.

Sin embargo, estudios adelantados por la UPTC y Colciencias (2018) encontraron que los suelos y los sedimentos superficiales de algunas partes de la sabana son preferencialmente arenosos, atestiguado por la presencia frecuente de geofomas como médanos (paleo dunas) que parecen ser más frecuentes de lo que siempre se pensó. Esto favorecería la infiltración de las aguas superficiales y de precipitación, pero al mismo tiempo, aumentaría la posibilidad de contaminación de los acuíferos freáticos (Capítulo 6).

8.3 Oportunidades

Los cultivos agroindustriales diversificados son de gran envergadura ya que fortalecen cadenas productivas distintas a los monocultivos. Si se comparan los empleos generados por la agricultura versus la ganadería, los monocultivos producen más empleos por hectárea, pues mientras un hatillo ocupa aproximadamente tres o cuatro personas, un cultivo de palma requiere de unas 15 personas.

El aumento en las hectáreas cultivadas ha sido sorprendente en los últimos años en varios cultivos, especialmente en arroz, lo que significa que Colombia es casi autosuficiente y la producción de Meta y Casanare suman más del 50% de la producción nacional; en el aceite de palma africana se ubica como el cuarto productor mundial, y al igual que el arroz, la producción casi se ha doblado en la última década.

El aumento en los cultivos representa inversión y empleos directos e indirectos que permean y dinamizan la actividad económica de la región. La palma africana es un buen ejemplo, ya que, por 8 hectáreas de siembra, se genera 1 empleo directo formal y casi 3 indirectos.

También, cabe resaltar que, no todos los cultivos son industriales, y aun en el arroz y la palma, hay muchos arroceros y cultivadores de palma a pequeña escala, haciendo que estos dos sectores sean de mayor penetración social y financiera en la agricultura colombiana.

Hablando de la comparación entre la agroindustria colombiana respecto de la brasileña, el investigador brasileño Elcio Guimarães (2014) argumenta que, aunque se tienen algunas similitudes como el trópico y el uso de humedales para la agricultura, también existen diferencias; en Brasil el desarrollo de la agricultura partió de decisiones políticas, mientras que en la Orinoquía las iniciativas y las inversiones han sido privadas.

8.4 Retos

Aunque se tienen instituciones de orden nacional dedicadas a la investigación en agricultura como CORPOICA y el CIAT, se requiere

un centro de investigación enfocado en la región que permita desarrollar variedades para dicho ecosistema.

Igualmente, se necesitan Universidades y Centros de Investigación enfocados en las llanuras. También es preciso la creación de políticas públicas centradas en cultivos específicos, un ejemplo de ello fue el incremento de los cultivos de soya en Brasil.

Las capacidades productivas de la llanura son reconocidas, pero como el desarrollo agropecuario apenas se inicia, se pueden desarrollar desde ya sistemas agrícolas sostenibles y evitar las consecuencias ambientales que se ven en el Cerrado brasileño como son la disminución del agua de los drenajes superficiales y el deterioro de sus aguas por restos agroquímicos, entre otros (Guimarães, 2014).

Generalmente, los monocultivos requieren deforestación a fin de ocupar grandes campos, adicionalmente, necesitan mucha agua como en el caso del arroz; esto hace que se consuma gran parte de este líquido y que se ocupe la sabana inundable, de tal manera que se pueda evitar lo descrito, se debe utilizar la variedad de arroz seco que no requiere riego. También es vital establecer concesiones de agua para controlar su flujo, especialmente en épocas de sequía.

En el caso de la palma africana, uno de los problemas es que se debe horadar el suelo para formar surcos profundos, lo que destruye la capa fértil y el hábitat de los animales; ante esto se debe pensar en variedades nuevas con un menor impacto.

Con la intervención de las sabanas inundables, algo que preocupa es la transformación de las condiciones naturales, esencialmente en los esteros; para esto se requiere un trabajo conjunto entre las entidades gubernamentales, la comunidad y tal vez las ONG para trazar un plan de conservación mediante proyectos de manejo. Los cuales deben partir de las zonas que requieren una administración específica por su valor ambiental y social.

Como parte de la investigación participativa se deben zonificar de acuerdo con las necesidades en bloques de conservación, uso sostenible y restauración, tal como se hizo con algunos humedales en Tauramena con apoyo de la Fundación Omacha (Revista Semana, 2014). Para un mejor aprovechamiento de las sabanas inundables, se deben cuidar las cuencas altas para que se disminuya la tala de los bosques y no se afecte el caudal de los ríos.

Parece que la disminución de la fauna silvestre ha sido proporcional al aumento de los monocultivos por la pérdida de hábitat, al calentamiento global, a la fumigación aérea, etc. Algunos sugieren que las especies de la zona se están adaptando a las condiciones de inundación, pero surge el interrogante ¿qué pasa cada vez que se le cambian las condiciones de hábitat a las especies?

Una de las condiciones para el desarrollo sano de un departamento, es que las actividades económicas sean variadas, por lo que la Orinoquía debe diversificar su economía de manera sostenible para no repetir el colapso económico visto en 2014-2015 con la disminución de los precios de los hidrocarburos. En los proyectos agroindustriales se deben incorporar el costo ambiental a las actividades realizadas. Como consecuencia, debemos preguntarnos si ¿estamos incorporando los costos por contaminación a los proyectos de desarrollo de infraestructura?

Así como, si ¿los proyectos de desarrollo están considerando la variable de cambio climático en sus ecuaciones? Se ha mencionado que esta región cuenta con cerca de un 30 % del agua del país, pero para darle paso a la agricultura se tendrá necesariamente que adecuar los suelos, drenar zonas inundables, afectar la dinámica hídrica y disminuir los bosques; No obstante lo anterior, desestabilizaría el ciclo del agua afectando los ecosistemas y la biodiversidad.

Hay otros aspectos que debemos considerar, como: 1) para el desarrollo se requieren vías, pero su construcción, como en el caso de la zona

plana de Paz de Ariporo, disparó la deforestación y los monocultivos, y perturbó el drenaje del área; Fue afectada proporcionalmente con la construcción de las vías. 2) qué actitud se quiere tener ante el desarrollo de la sísmica, y en general, ante la exploración de hidrocarburos, elemento que hasta ahora ha liderado el desarrollo de la región.

8.5 Conclusiones

En lo referente a las aguas, los dos principales desafíos relacionados con la agricultura extensiva podrían ser la reducción de los niveles de los ríos y la reducción del nivel de los acuíferos por su utilización intensiva y la contaminación de dichas aguas por residuos de agroquímicos, plantas agroindustriales y aguas servidas urbanas.

Adicionalmente, si se le suma el cambio climático, en un sistema frágil como el ya descrito, se tendrían cambios en los patrones climáticos, menos agua en la estación seca, y como resultado consecuencias propias de sequías y regiones semiáridas.

Aunque seguramente el desarrollo de la agroindustria en la Orinoquía seguirá su curso, porque la necesidad de proveedores de alimentos a gran escala está aumentando, y solo en algunos pocos países como Colombia se podrá incorporar nueva tierra a la producción agrícola mundial. Eso no significa que se deba repetir errores de otros lugares, sacrificando el ambiente a costa del desarrollo.

En lo relacionado con la agricultura y el agua hay 4 iniciativas fundamentales que se deben implementar: 1) crear y monitorear las concesiones de agua, 2) hacer uso eficiente de los fertilizantes y demás químicos utilizados en la agroindustria, 3) desde ya desarrollar nuevas variedades de cereales tolerantes a las temperaturas esperadas con el aumento de la temperatura, y 4) que el uso del suelo se ajuste a los PBOT (Planes Básicos de Ordenamiento Territorial) adicionando zonas de reserva que sirvan de colchón ambiental y de corredores para la fauna.

9. EL AGUA, LA GANADERÍA Y LA CULTURA LLANERA

La ganadería no es solo la actividad económica más importante de la Orinoquía, sino también es la actividad básica sobre la cual se forjó la cultura llanera. Por lo tanto, dicha labor va más allá del bienestar económico que produce, y mantiene vivas las tradiciones e idiosincrasia de sus pobladores.

Por esta razón, en la cuenca se ha desarrollado la ganadería en casi todos sus pisos térmicos: desde los páramos de la cordillera como Cocuy y Chingaza, hasta el extremo oriente de la gran cuenca conformada por los poderosos ríos Meta y Orinoco.

Los departamentos que conforman la región hacen parte de los mayores productores de ganado del país y es una de las pocas áreas que han aumentado el hato ganadero como producto del mejoramiento de los pastos. Además de las mejoras de los pastizales, la utilización de nuevas técnicas como el cruce y mejoramiento de las razas, el regadío, la construcción de pozos de agua subterránea, el uso de forrajes, etc., Dichos elementos están extendiendo la producción de leche y carne, y harán de Colombia una potencia en la exportación de carne bovina (Figura 52).

Figura 52

Llanero y ganado en el corazón de la cultura llanera



Los números de cabezas de ganado en Colombia deben estar cerca a los 25 millones y aproximadamente una tercera parte de esa producción está en la Orinoquía, con un potencial de crecimiento mayor a ninguna otra región. El total de hectáreas con pastizales debe estar entre 7 y 9 millones con solo una cuarta parte con pastos mejorados y el resto con pastos naturales.

Gran parte de las zonas con pastos naturales, conocidos como sabana, son planicies inundables. Y aún no se sabe la mejor forma de aprovecharlas y las implicaciones que tendría el desecarlas. Dicha información se desconoce porque no se han hecho los estudios respectivos.

La forma más común de ganadería tradicional es la posesión de una buena cantidad de reses, que se recogen una vez al año mediante los llamados trabajos de llano en la época seca, y la saca a mitad de año. En las haciendas y hatos clásicos, se realizan dos trabajos de llano al año, el primero al inicio de las lluvias y el segundo al final. El espacio utilizado para ganadería en la Orinoquía se divide en sabanas naturales y pastos introducidos en terrenos cultivados para la alimentación bovina.

Por otra parte, en las sabanas nativas se aprovecha la oferta natural del medio que no genera presiones de transformación y favorece la conservación de la biodiversidad, estas últimas son menos rentables y productivas, por lo que la transformación de las sabanas en potreros con pastos foráneos se está generando de manera rápida. En Arauca, Casanare y Meta la actividad ganadera es tan importante que entre el 80 y el 90 % de la tierra se utiliza para ganadería extensiva.

En la franja de superpáramo, por encima de los 4.000 m.s.n.m. también se realiza pastoreo trashumante de ovejas y cabras que son movidas de un valle a otro. En los páramos, a partir de los 3.000 m.s.n.m., la tierra es utilizada para cultivos. Luego de la cosecha, las

parcelas se dejan descansar para recuperar la fertilidad y durante este receso se aprovecha la tierra para el pastoreo de ganado de doble propósito, realizando quemas para obtener el rebrote, lo que provee mejor alimento para el ganado.

La zona entre los 2.000 y 3.000 m. s. n. m. es altamente utilizada para la explotación de maderas y el cultivo de café, plátano, caña y maíz, pero también allí se tiene ganado. En el piedemonte por la abundancia de agua, se hace ganadería de ceba, es decir, engorde de ganado para producir carne, y también la ganadería de doble propósito.

Los paisajes del piedemonte son los que han recibido mayor intervención para potrerización. El piedemonte sufre un proceso de sabanización por el paso de ganado desde la zona andina hacia la sabana y viceversa, y por el establecimiento de pastizales que no solo desaparecen la vegetación nativa, sino que empobrecen los suelos por el exceso de agua, haciendo muy difícil la recuperación de estos hábitats.

En los llanos tradicionales, gran parte de la ocupación económica está apoyada en la ganadería, la cual está articulada con la tierra, ya que son las sabanas, sus pasturas y sus caños de agua lo que permite la crianza de los animales. En la actualidad esto está cambiando y, por ende, la forma de trabajar. Sin embargo, la relación del llanero con los animales se mantiene intacta.

Uno de los aspectos que más ha cambiado con el tiempo es el valor de la tierra. En épocas anteriores, la tierra no tenía valor por sí misma sino por el número de reses que podría mantener. Como las opiniones son variadas respecto de la ganadería, a continuación se presenta una reflexión de las implicaciones de la ganadería en las aguas, seguido por los diferentes puntos de vista agrupados en pro y contra la ganadería. Posteriormente, se presentan unas reflexiones sobre la cultura llanera.

9.1 El agua y la ganadería

Las llanuras inundables de la Orinoquía técnicamente se les conoce como humedales. Dichos humedales están compuestos por lagos, esteros, pantanos, ciénagas, ríos, caños, llanuras y bosques inundados.

Según la oficina de Cooperación Global para la Preservación de los Humedales (RAMSAR), ratificada por el gobierno nacional, los humedales son zonas de la extensión terrestre que están permanente o temporalmente anegadas y que proveen funciones ecológicas esenciales y son regularizadores de los sistemas hídricos, así como fuente de biodiversidad en términos de especies, diversidades genéticas y ecosistémicas.

Además, juegan un papel clave en el ajuste a los cambios climáticos y en la atenuación de sus consecuencias. También proveen recursos para las comunidades locales, como: agua, leña, pesca, bebederos, sabanas de pastoreo y aire puro. Aún pueden proveer beneficios económicos adicionales si se utilizan como sitios de ecoturismo.

Las sabanas de pastoreo se dividen en sabanas secas y sabanas húmedas o inundables. En la altillanura el ecosistema predominante es la sabana seca o estacional, aunque, según el micro relieve, en zonas de drenaje lento prosperan las sabanas húmedas, zurales y esteros. Según los analistas consultados por la publicación Semana (2018), describen que en la región la convivencia de la biodiversidad y las fuentes de agua, especialmente los humedales, se han mantenido en equilibrio con la ganadería por generaciones.

Para otros, actualmente esto se está transformando por la introducción de cercados y linderos, al introducir pastos artificiales y al aumentar el número de reses por hectárea. Para dichos investigadores, por cientos de años la ganadería ha desplazado los bosques, humedales y fauna, y ha restablecido un nuevo equilibrio que ambientalmente no es el ideal. Si se rompe ese equilibrio, se

rompen los ciclos de agua de los humedales y se ponen en riesgo no solamente la biodiversidad, sino también los recursos de las comunidades locales.

Ahora veamos la ganadería en un contexto más global. Los científicos sobre el cambio climático sostienen que desistir de comer carne o leche de vacuno es una gran contribución en la lucha para controlar los desajustes climáticos. De los muchos bienes estudiados por los investigadores, la carne de las vacas y las ovejas ejerce el alcance más perjudicial en el medioambiente y su impacto es más marcado en Sudamérica.

De acuerdo a National Geographic (2021), producir carne en Suramérica genera 3 veces más GEI, y necesita 10 veces más terreno que la producción vacuna en Europa. Adicionan que, la carne y la leche de vaca suministran poco menos del 18% de las calorías y el 37% de la proteína a nivel global, al mismo tiempo utilizan gran parte (83%) de la tierra utilizable para agroindustria y generan cerca del 60 % de los gases de efecto invernadero originarios de la agricultura (IDEAM, 2021).

¿Por qué el impacto es tan fuerte en Sudamérica? Porque muchos de los potreros son tierra deforestada, y cebar ganado en tierra deforestada produce más de 10 veces las emisiones de gases de efecto invernadero que hacerlo en pastos nativos.

Esto podría llevarnos a pensar que la solución está en dejar de comer carne, pero algunos investigadores como el brasileño André Mazzetto citado en Semana (2018), quien impugna que si se quiere impactar positivamente el ambiente se debe utilizar menos los aviones, tener autos ecológicos, y utilizar el transporte público, además, mejorar los sistemas de control de temperatura en los hogares. Agrega que la suma de estos elementos impactaría más que abstenerse de consumir carne.

Gracias a los argumentos señalados, Mazzetto sustenta su discurso con argumentos de tipo geográfico, tales como: 1) En los países del norte están obligados a usar concentrados de maíz y soya por causa del invierno, mientras que en Latinoamérica es posible producir carne a partir de pastos naturales todo el año. 2) En algunas sabanas y praderas de países como Uruguay, Argentina, Brasil y Colombia, los pastos naturales son nutritivos, y en muchas de esas zonas no crecerían bosques, y por lo tanto la ganadería tendría menos impacto que en zonas más boscosas como en la Amazonía donde para crear potreros se debe talar el bosque (Semana, 2018).

Otros investigadores como Mitloehner soportan las ideas de Mazzetto, y sostiene que abstenerse de consumir carne no amparará el planeta porque de acuerdo con la EPA los mayores generadores de GEI son la producción de electricidad, el transporte y la industria, y que la agricultura y la ganadería sumarían menos del 13%. Agrega que, si todos los norteamericanos dejaran de comer carne, la disminución en GEI sería entre 2 y 3% (Semana, 2018).

Gracias a los argumentos anteriores, referentes a las llanuras de esta región, habría que cuestionarse si ¿los pastos naturales siempre han estado ahí, o si estos fueron precedidos por bosques que fueron talados? Parte de la respuesta está en que los bosques no crecen en pantanos a menos que sean morichales o árboles especiales. Estudios adelantados por la UPTC encontraron que efectivamente en el pasado, en algunos sectores, contaban con más árboles que los actuales y que ha habido una disminución de los mismos por tala y potrerización (Capítulo 7).

Con base en los datos de la FAO (oficina de las Naciones Unidas relacionada con agricultura y alimentación), la cría del ganado podría ser uno de los grandes emisores de GEI sobrepasando a los autos, y sostiene que cerca del 40% del metano y más del 60% del óxido nítrico provienen de las vacas (FAO, 2021).

Los investigadores de National Geographic sostienen que la ganadería degrada el suelo y contamina el agua, y que cerca de la tercera parte del área del planeta se utiliza para sostener ganadería, además de la mucha tierra que se utiliza para cultivar cereales que a su vez alimentan a las vacas. Por el contrario, a lo sostenido por Mazzetto, afirman que el efecto ecológico de la ganadería es multiplicado por el hecho de que es la principal causa de la deforestación.

En cuanto a producción de calorías, sostiene que, para producir mil calorías de carne, se requieren más de 30.000 calorías procedentes de cereales y pastos. Al contrastar la producción de carne de res vs. carne de aves de corral y de cerdos, la primera requiere entre 3 y 4 veces más calorías; en cuanto a agua, para producir mil calorías de carne vacuna se necesitarían más de 1,6 metros cúbicos de agua, mientras la industria avícola y de cerdos juntas, consumirían mucho menos (National Geographic, 2021).

El pastoreo del ganado provoca mucho daño en el suelo por su efecto erosivo y es una de las raíces de la desertificación. El excesivo uso de agua, se podría utilizar para otras actividades más urgentes, y los desechos del ganado contamina las aguas por el exceso de nutrientes al adicionar biomasa en un proceso conocido como eutrofización que afecta los sistemas marinos (El Espectador, 2015).

Tal y como se mencionó, la ganadería produce poco empleo ya que pocas personas pueden manejar miles de reses, dicho fenómeno se observa en la Orinoquía, donde hatos tan grandes como municipios son administrados por un par de vaqueros. Además, el pago de impuestos prediales por la tierra rural en Colombia es bajo comparado con otros países, esto permite que la tenencia de la tierra se quede en las manos de los terratenientes que han ejercido labores de pastoreo y ganadería entre sucesiones y heredades.

9.2 Oportunidades

Para los defensores de la ganadería, esta es la actividad básica sobre la cual se forjó la cultura llanera y a pesar de la explotación petrolera y los cultivos agroindustriales, la ganadería ha seguido creciendo a diferencia del resto del país donde en total ha disminuido en cerca de 700.000 cabezas. Este crecimiento ha sido posible gracias a que las cerca de 32 mil fincas ganaderas que trabajan cada vez más como empresas, así como, a la introducción de mejores razas, al incremento de la nutrición y a la mejoría de la sanidad.

Si además de la carne se aumentara la producción láctea, si se mejorara la infraestructura vial y las cadenas productivas y de comercialización, si se contara con un frigorífico local para exportación junto con una cadena de frío, el crecimiento sería mayor.

Además, si a todo esto se le suma: la cultura ganadera existente, grandes extensiones de tierra con posibilidades de crecimiento, tierra relativamente barata comparada con el resto del país, cercanía relativa a Bogotá el mayor mercado del país, así como Venezuela con el probable perfeccionamiento de la navegabilidad del río Meta; todo lo anterior aumentaría la producción disponible hacia los nuevos mercados como África y Asia, en exportaciones de carne que ya están al alza.

En este sentido, se enfatiza la necesidad de crear empresas comercializadoras y de procesamiento asentadas en la Orinoquía, lo que beneficiaría al productor y al consumidor.

No obstante, no todos los expertos en el área están hablando de acabar las ganaderías y reemplazarlas por agricultura intensiva o por bosques; por el contrario, algunos están planteando la opción de implementar proyectos de ganadería extensiva siguiendo el modelo de Nueva Zelanda de grandes lecherías de producción usando pasto como alimento, y utilizando hasta el último centímetro cuadrado de tierra para sembrarlo, y, es justamente en esta región donde es factible adelantar dichos proyectos.

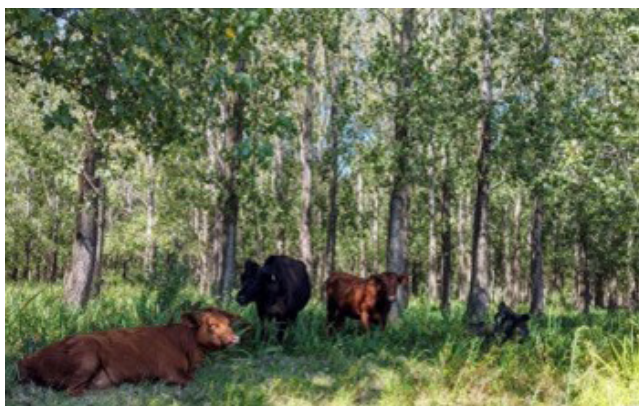
Por ejemplo, en Puerto Gaitán (Meta) se está considerando un proyecto que albergaría 50.000 vacas de ordeño en solo 6.500 hectáreas lo que significaría alrededor de 7 a 8 vacas por hectárea, este proyecto cambiaría la mentalidad de los modelos lecheros de producción.

De otro lado, otros investigadores pretenden impulsar el proyecto de sistemas silvopastoriles en fincas ganaderas, que consiste en incorporar bosques, pastos, forraje y concentrados de cereales de una manera integrada.

Los sistemas silvopastoriles bien operados pueden incrementar la productividad y las ganancias de los finqueros gracias a la producción coexistente de cultivos de árboles, pastos artificiales, cereales y vacas; adicionalmente, se pueden generar ganancias (bonos) ambientales por la captura del CO₂ y por producir carne carbono neutral (Figura 53).

Figura 53

Sistema Silvopastoril, bosques y ganadería combinados



Uno de esos árboles que permite pastos y bosque naturalmente es el Saladillo, que forma lo que en la Orinoquía se conoce como Saladillales, que son un tipo de sabana con árboles de 8 metros,

en donde, además de pastos, aparecen árboles, preferencialmente autóctonos ubicados con suficiente distancia para que estos prosperen. Algunos de los árboles pueden ser eucalipto, caucho, comino y yopo.

Igualmente, hay que admitir que, desde una perspectiva social, si las grandes fincas y también las pequeñas, se privaran del ganado vacuno, difícilmente podrían sostenerse económicamente. Generalmente, los cultivos son de pan coger, inclusive la leche se utiliza para el gasto diario, pero el ganado es lo que sustenta los gastos grandes como el pago del vehículo, los impuestos, las matrículas, etc.

Adicionalmente, representa un seguro y un ahorro, porque ante cualquier eventualidad se pueden comercializar rápidamente, además, es una actividad menos riesgosa que la agricultura. Según el representante de los ganaderos, el ganadero no pastorea su ganado por hobby, sino porque decide utilizar la tierra como una variable productiva y el ganado es su mayor fuente de ingreso, con el menor riesgo (Semana, 2014).

9.3 Retos

En algunas zonas de la región, las áreas disponibles para el crecimiento de los hatos son sabanas inundables donde se realiza ganadería extensiva de baja producción. Muchos se encuentran dispuestos, y ya se ha hecho, a desecar esas zonas para aumentar la producción sin saber de las implicaciones en una zona que parece estar cada vez más seca coincidiendo con las predicciones de cambio climático, y sin tener los estudios de investigación como soporte técnico respectivo.

Al desecar los humedales, se estaría eliminando una solución fundamental al principal reto al que se enfrenta el mundo: afrontar el cambio climático y, al mismo tiempo, controlar el incremento de la temperatura a un límite que no debe sobrepasar los 1,5°C. En Colombia, más de 2 millones de hectáreas de esos humedales son temporales (espejos de agua que se forman en la Orinoquía o en La Guajira y que duran solo varios meses) y ya han sido intervenidos.

A partir de los estudios adelantados por el Instituto Humboldt su transformación se debe en gran parte a la actividad ganadera (63,7 %).

Se le suman los aspectos ambientales relacionados con el aire y con el agua. Con el **aire**, el impacto ambiental está ligado a la generación de gases causantes del calentamiento global porque del estiércol y de las flatulencias de los bovinos se emana gran parte del óxido nitroso, metano y amoníaco que se encuentra en la precipitación ácida. La utilización de pastos con mejor captura de CO₂, como el *Brachiaria Urochloa Humidicola*, no solamente disminuiría las emisiones, sino que también mejoraría la calidad de los suelos.

Referente al **agua**, existen riesgos de contaminación y enfermedades para la población humana asociadas con contagios conexos a actividades pecuarias, especialmente, por contaminación del agua por la orina y el estiércol del ganado por escurrimientos y recarga en las haciendas, tales como: 1) excretas que contengan bacterias patógenas como *E. coli* que origina dolor de estómago y diarrea; 2) aumento en los contenidos de nitratos que disminuyen el aporte de oxígeno en la sangre; 3) hormonas asociadas con un descenso de esperma en humanos; 4) excretas de ganado y de nutrientes relacionados con los pastos que generan eutrofización o aumento de orgánicos en las reservas de agua y exceso de nutrientes en los cultivos.

Los niveles de riesgo dependerán principalmente del tipo de alimentación, de las regulaciones sobre el estiércol y del tipo de suelo. En las llanuras inundables los suelos son arenosos y con baja pendiente, lo que favorecería la percolación de los contaminantes.

Como el manejo del estiércol del ganado se está convirtiendo en un problema, algunos países se han comprometido a redactar y dar a conocer guías de buenas prácticas. En Colombia, esas guías sobre el manejo de las excretas en actividades ganaderas no existen, tampoco existen estímulos por el buen manejo del estiércol en las actividades ganaderas.

Análisis. Ante la presión del crecimiento de la agroindustria, y con esto el mayor consumo de agua, surge el interrogante de si la Orinoquía tiene la capacidad de recibir más cargas sin saturar los sistemas y producir colapso o daños irreversibles.

La respuesta no es precisa, porque aún no se han realizado los estudios; se conoce que esta región es frágil por la pobreza de los suelos, por su acidez y por tener un clima con extremos muy lluviosos y otros muy secos, en consecuencia, dicha fragilidad se incrementará a la par con las temperaturas producto del trastorno climático que estamos experimentando. Al respecto, se podría considerar la reintroducción de razas criollas más adaptadas al medio por ser más tolerables al calor.

Con un clima cada vez más impredecible, la ganadería se enfrentará a olas de calor más fuerte en los veranos y a mayores inundaciones en los inviernos, para lo que se debe desarrollar resiliencia o capacidad de adaptación. Como las actividades económicas no se pueden detener, la clave estará en producir-conservando y conservar-produciendo. De esta manera, es necesario racionalizar el agua, sembrar más bosques y conocer mejor los límites de los ecosistemas que conforman la región.

Así también, se debe reflexionar sobre el desafío de Allan Savory quien invita al mundo a hacer un manejo holístico o integral de la tierra y actuar como administradores de la misma, observando cuidadosamente la cobertura, la humedad, la fertilidad, la variedad de organismos y qué tan bien están captando las plantas la energía del sol, reciclando los nutrientes y devolviéndolos al suelo. En síntesis, nos invita a hacer un manejo ecológico regenerativo, económicamente viable y socialmente racional de los pastizales del mundo (Savory Institute, 2021).

9.4 Implicaciones (reflexiones) sobre la cultura llanera

Aunque mi abuelo Luis Martínez no nació en el llano, fue llevado de Sogamoso a Orocué a los 6 años y desde entonces, hasta que murió

a los 102 años, el llano fue parte de su vida como: peón de llano, amansador de caballos, vendedor de cachivaches, quien, finalmente, levantó un rancho en una esquina de un hato e inició una familia entre los caños Guirripa y Maremare siempre cerca del río Meta.

Vivir cerca del gran río, le aseguraba el transporte por curiara (canoa) hasta Orocué que era el lugar más cercano a la civilización; pero, todo esto se derrumbó con la llegada de la violencia y el terror de los años 50, del siglo pasado, que le arrebataron sus sueños y lo echaron del llano. Cuando se animaba a sus tonadas llaneras, se llenaba de nostalgia y se quejaba: ¡Mijo, el llano ya no es el llano!

Me pregunto qué pensaría el abuelo ahora si fuese testigo de las transformaciones que se están presentando últimamente, con un desarrollo del llano tan acelerado que no ha tenido en cuenta la cultura llanera y esta ha venido desapareciendo lenta y casi imperceptiblemente.

No solamente ha cambiado culturalmente, sino que también la propiedad ha cambiado de manos, con ello, se va la vida de siempre, como lo lamenta el investigador y gestor cultural Cachi Ortigón (Revista Semana, 2014).

Es así que, los defensores de la cultura llanera como Cachi reconocen que el encanto de la biodiversidad y del paisaje no es solo obra de la naturaleza, sino de la decisión cultural de un pueblo de conservarla a través de siglos de convivencia, conocimiento y manejo de los recursos de su territorio; esa convivencia que permitió el hábitat conjunto del chigüiro con el toro. Por lo tanto, al quebrantarse dicha convivencia, no solamente se está yendo una cultura, sino también un equilibrio y una biodiversidad de siglos, entre estos el manejo del agua.

9.5 Conclusiones

En la Orinoquía es posible que la ganadería tal vez ya no sea la principal actividad económica, pero sí es la que ocupa más personas

y espacio, ya que hay más de 32.000 predios dedicados a criar ganado; y así como se está procurando buscar tecnologías para monocultivos, también se debería desarrollar pasturas para suelos ácidos y baja capa orgánica, e igualmente considerar la crianza de rebaños a gran escala para poder competir globalmente.

La ganadería pastoril utiliza menos agua que la ganadería europeo-americana basada en concentrados de cereales como soya y maíz. Es importante tener en cuenta la reintroducción de especies tolerantes al calor como el ganado Criollo Casanareño, y el proveerse de suplemento alimenticio para las épocas de sequía.

Así mismo, se debe considerar aumentar la densidad de los bosques en las zonas ganaderas como una manera de regular el clima y preservar el agua y la fauna. Una opción atractiva es desarrollar ganadería sostenible en bosques heterogéneos con huecos en el dosel (silvopastoril) con árboles de la zona como Yopo y Comino. Esos bosques no muy densos serían una manera de compensar las emisiones de metano y dióxido de carbono asociadas al ganado vacuno (CIAT, 2014).

Las emisiones también disminuirían al utilizar pastos de raíces más profundas y con mayor captura de CO₂. No obstante, otro aspecto que debe ser tenido en cuenta, es la legislación de las excretas de ganado por su efecto contaminante sobre las aguas de superficie y los acuíferos. En lo que tiene que ver con las actividades ganaderas, se deben usar las tierras que tengan esa vocación de acuerdo con los PBOT de cada municipio para generar un desarrollo sostenible.

A pesar de la tradición ganadera de la región, nuevas actividades económicas alejarían al llanero de su actividad tradicional y ofreciendo oportunidades alternas como: nuevas formas de hacer ganadería, cultivos industriales, hidrocarburos y minería, preservación y agroturismo; ante esos nuevos horizontes, se debe estar abierto a las diferentes posibilidades de producción, al tiempo que se preserva la magia de la Orinoquía.

10. EL AGUA Y LA MINERÍA (PETRÓLEO, GAS Y OTROS MINERALES)

Hoy la Orinoquía se ha transformado en el motor de la producción petrolera en Colombia a través de los grandes descubrimientos de hidrocarburos en Arauca (Caño Limón), Casanare (Cusiana y Cupiagua) y Meta (Rubiales y Castilla), entre otros.

Esta vasta región que, hasta hace poco tiempo hacía parte de los territorios nacionales, se ha incorporado a la economía desde el boom petrolero de Arauca en los años sesenta, luego vino el auge en los años noventa en Casanare y, ahora Meta ha tomado el liderazgo en el petróleo, aunque Casanare lo mantiene en el tema del gas.

Como el petróleo y el gas son los motores económicos más dinámicos de la economía en términos de regalías, impuestos e ingreso per-cápita; bien vale la pena reflexionar sobre el impacto de estas actividades en el agua y en la salud.

Ahora bien, en las primeras fases de la exploración de hidrocarburos, las empresas petroleras planean el uso de técnicas de detección a distancia y cartografía satelital con ensayos sísmicos para prospeccionar potenciales almacenamientos de petróleo.

Un proyecto promedio de prospección sísmica suele impactar más de 1.000 km de despeje de caminos y trochas. Una vez se identifican las existencias de hidrocarburos, de manera indirecta, la siguiente fase inicia con la construcción de vías, plataformas y oleoductos para taladrar pozos de prueba. Cuando el petróleo es descubierto, los trabajos de exploración se amplían para la extracción a escala comercial, lo que requiere más pozos y más infraestructuras (Figura 54).

Figura 54

Exploración petrolera en la Orinoquía



Las tecnologías para la exploración y bombeo de petróleo contienen una serie de técnicas de perforación y la utilización de explosivos en profundidad como parte de la sísmica o radiografía del subsuelo. Los cambios físicos del entorno asociados a la exploración, la perforación y la extracción de los hidrocarburos pueden superar a los cambios que se dan durante un derrame grande de petróleo.

Las más importantes afectaciones incluyen destrucción de los bosques, afectación de ecosistemas, contaminación química de los suelos y de las aguas. A mediano y corto término, estas acciones pueden ocasionar perjuicios en los grupos de animales (especialmente en aves nómadas y mamíferos); peligros en la salud y bienestar de las comunidades adyacentes y en los trabajadores mismos de la industria petrolífera; así como el desalojo de las colectividades, especialmente las nativas (Revista semana, 2014).

10.1 Afectación de las aguas por las actividades petroleras

Todas las actividades del negocio del petróleo como son: exploración superficial y del subsuelo, perforación de pozos, producción y transporte (oleoductos, carreteras) de los hidrocarburos pueden generar afectaciones sobre los entornos y los grupos poblacionales de las zonas de influencia del proyecto. Dichos efectos pueden variar dependiendo del seguimiento de las normas ambientales.

Las perforaciones relacionadas con las fases de exploración y explotación consumen grandes cantidades de agua que, por las labores propias de la hechura del pozo y por el contacto con los hidrocarburos, terminan contaminándose; de hecho, el agua de producción resultante de los métodos de succión de petróleo suele ser el mayor residuo. Casi toda el agua de producción es agua prehistórica (agua de formación) que se ha almacenado durante millones de años con los hidrocarburos en las formaciones rocosas.

El agua producto de la producción de petróleo contiene una gran variedad de sustancias químicas derivadas del petróleo y del agua de formación. Igualmente, el agua tiene el potencial de contener químicos combinados que se inyectan para mejorar la recuperación del petróleo y el gas.

Esta agua de producción no siempre se re-inyecta en el subsuelo, sino que también se evacúa en las aguas superficiales; esta agua es varias veces más salina que el agua de mar y, frecuentemente, contiene toxinas como etilbenceno, benceno, xilenos, tolueno, y metales como mercurio, bario, arsénico, cadmio, cromo, etc.

Además, durante el taladrado del pozo se utilizan diversos lodos, fluidos aceitosos, lubricantes y otros derivados químicos para refrigerar la broca, afianzar las paredes del pozo de petróleo o hacer más fluidos los cortes. Estos químicos líquidos se almacenan en enormes cantidades durante la fase de perforación, y a menudo se acumulan o se eliminan en piscinas o estanques de desechos.

Estas balsas de desechos son muy peligrosas, no sólo por la posible infiltración en los acuíferos de las rocas subyacentes, sino también para los seres vivos, especialmente las aves, que pueden confundirlos con fuentes de agua.

Si se relacionan las diferentes actividades de exploración-explotación de los hidrocarburos con los efectos medioambientales, se concluye que hay impactos sobre las aguas de superficie y los acuíferos freáticos, los cuales se listan en la Tabla 4.

Tabla 4

Efectos ambientales relacionados con la producción de hidrocarburos

Etapa	Efectos medioambientales
Exploración	<ul style="list-style-type: none">• Polución de acuíferos.• Modificación del drenaje natural.• Creación de aguas grises (aguas usadas).
Perforación	<ul style="list-style-type: none">• Polución de suelos y aguas por mal conducción de los desechos de perforación.• Polución de acuíferos.
Producción	<ul style="list-style-type: none">• Formación de desechos sólidos y aguas grises.• Polución de acuíferos.• Polución de riquezas terrestres e hídricas por mal manejo de los desechos de producción.

Tradicionalmente, los llaneros han sido receptivos a las actividades petroleras por el impacto positivo que ha tenido sobre la economía; pero, en los últimos años se han cuestionado varias actividades relacionadas como: el uso de la sísmica por el fracturamiento de las rocas con el uso de los explosivos que distorsionan o desvían la corriente superficial y los flujos subterráneos, sus métodos intensivos para usar el agua, y la polución de las aguas de superficie.

El uso de explosivos en la sísmica ha sido excesivo; por ejemplo, para cuatro municipios de Casanare se aplicaron aproximadamente 500 toneladas de sismigel en una exploración sísmica de 16.700 kilómetros²; por lo anterior, se debería considerar hacer exploración sin explosivos como se hace en EE. UU. y en algunos países europeos.

En su lugar se debería considerar los vehículos vibradores (vibroseis) y la exploración satelital no invasiva (Tecnología OFT) (Ardila, 2014).

Es importante enfatizar: 1) Que las labores subterráneas de prospección y explotación de hidrocarburos pueden contaminar los acuíferos, y que estos una vez contaminados, no se pueden corregir. 2) Que los consumos de agua en esa industria son altos. 3) Que en los llanos la producción de agua junto con el petróleo es alta, y 4) Que los yacimientos de petróleo de las sabanas estarían hidrodinámicamente conectados con las corrientes superficiales, lo que explicaría la disminución del caudal de muchos de los ríos y las grandes cantidades de agua no salada que se generan en muchos de los campos de petróleo.

Ardila (2014), reporta que, “solamente los campos de Rubiales, Quifa, Pirri, Caño Limón, Castilla y Chichimene generan cerca de 9 millones de barriles diarios de agua de formación”. En general, los efectos medioambientales se pueden resumir en: afectación del drenaje natural, manejo de residuos de perforación, contaminación de recursos terrestres e hídricos y afectación de acuíferos.

Después de sufrir por varias décadas las afectaciones ambientales producto de la exploración, algunos habitantes locales de la zona se preguntan si ciertas áreas se deberían declarar zonas de reserva para mitigar los impactos ambientales y disminuir el avance petrolero.

10.2 Logros

Es innegable la contribución económica de los hidrocarburos en el progreso de la cuenca del Orinoco. Gracias a la construcción de

vías, implementación de tecnologías, edificación de infraestructura, aportes en impuestos-regalías y creación de nuevos impuestos; se permitió el desarrollo de las regiones logrando que pequeños pueblos se convirtieron en ciudades, trochas en autopistas, y los ingresos de jornaleros pasaron a ser los más altos per-cápita de Colombia.

Hay que reconocer que la legislación colombiana ha avanzado y como parte del plan o procedimiento de manejo ambiental exigido por la ANLA (oficina encargada de los permisos ambientales por parte del Ministerio del Medio Ambiente) las compañías de petróleo deben establecer una línea base o patrón de comparación en los estudios de impacto ambiental, compuesta por la descripción minuciosa de la situación del momento (en la fecha del estudio) sin influencia de nuevas participaciones antrópicas.

Por constitución, el Estado debe planear el uso y utilización de los recursos naturales garantizando el desarrollo ecológico, la preservación y restitución ambiental, al mismo tiempo debe prevenir las actividades que generen degradación ambiental. También le corresponde decretar penalidades y restituciones por las afectaciones generadas. El cuidado anteriormente mencionado, debe ser aún mayor en las áreas de sensibilidad o significado ecológico (ANLA, 2018).

Por lo tanto, la autoridad ambiental ha establecido unos parámetros para el reporte de impacto ambiental que incluyen varios aspectos, entre estos:

1. Presentación del proyecto.
2. Delimitación del área.
3. Conocimiento y aporte de las colectividades.
4. Determinación del área de trabajo.
 - 4.1 Aspectos no bióticos: geología, geomorfología, tipos y uso de los suelos, aguas superficiales, aguas subterráneas, aspectos paisajísticos y atmosféricas.
 - 4.2 Aspectos bióticos: ambientes, ambientes acuáticos, zonas

ambientalmente sensibles (AEIA – áreas de especial interés ambiental).

4.3 Actividades socioeconómicas: poblaciones especiales, económico, cultural, arqueológico, posible población a ser desplazada.

5. Estudios de riesgos.

6. Sectorización.

7. Caracterización de impactos reveladores potenciales.

8. Estudios de inversión-ganancia en lo relacionado con el ambiente en las diferentes opciones.

9. Estimación y contrastación de alternativas.

En lo que tiene que ver con la sísmica, el Ministerio del Ambiente ha delegado a las CAR, en este caso Corporinoquía, la integración de los lineamientos ambientales, con un contenido mínimo de los informes, así (Corporinoquía, 2010):

1. Presentación de resultados del estudio de manejo ambiental para las variables bióticas y no bióticas, social, económico. Resaltando las inconsistencias en lo proyectado.

2. Soportes de las socializaciones con las colectividades del área.

3. Calificación de la efectividad de los PMA (Plan de Manejo Ambiental).

4. Observación de los impactos sobre el ambiente identificado anteriormente.

5. Balance de los estudios de monitoreo y seguimiento.

6. Adicionamiento de los cortes ecotopográficos.

7. El progreso en las fases de apertura de vías, estudios topográficos, perforación de pozos, restitución, específicamente en lo relacionado con la sísmica.

8. Registro en imágenes de los avances del punto anterior.

9. Actas de traspaso de desechos sólidos y residuos líquidos a entidades autorizadas.

10. Grado de cumplimiento de los compromisos adquiridos en los aspectos ambientales y sísmicos.

Con base en los elementos anteriormente mencionados, se puede observar que existe legislación al respecto; sin embargo, es necesario ejecutar la respectiva aplicación y seguimiento.

10.3 Retos

Las actividades de exploración petrolera son robustas, y la sísmica, la construcción de pozos, oleoductos e infraestructura asociada requieren de maquinaria pesada y sofisticada, por lo que se necesitan buenas vías. A lo largo de la Orinoquía, la construcción de carreteras o mantenimiento de las mismas por las compañías petroleras ha provocado efectos colaterales como la afectación de la flora, el impacto provocado ha sido la disminución de hábitat y el desalojo de las comunidades aborígenes.

Así también, la apertura de vías y carreteras permite a los colonos con intereses particulares como la explotación maderera y las actividades mineras, tener acceso a los grupos indígenas y colonizar las áreas.

No obstante, los estudios ambientales en zonas petrolíferas, muestran que es posible que las aguas de donde se surten las comunidades adyacentes a zonas petrolíferas (<30 km), presenten altos contenidos de HTP (hidrocarburos totales de petróleo), HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) y metales, en valores que superan lo permitido por las leyes. Las concentraciones reportadas exponen el alto riesgo posible al que estaría expuesta la salud humana (Revista Semana, 2021).

Por lo anterior, es necesario seguir fielmente las medidas ambientales establecidas por la ANLA y Corporinoquía, de tal manera que permitan hacer seguimiento exhaustivo al grado de contaminación del agua de consumo (ríos, caños, pozos y aljibes) de los habitantes que residen en áreas cercanas a las labores de extracción de petróleo.

Adicionalmente, es necesario adelantar estudios prospectivos que ayuden a investigar la evolución de la concentración en el tiempo y,

por tanto, descubrir las fluctuaciones asociadas a fugas puntuales y variaciones estacionales.

La participación de la exploración-explotación petrolera facilita otras intervenciones de monocultivos, ganadería, etc. Lo que puede causar un exceso de carga en el ecosistema. Esta parece ser la conclusión a que llegó la Contraloría por la catástrofe ambiental que afectó Casanare, especialmente Paz de Ariporo, en el verano de 2013-2014 (Contraloría General de la República, 2014).

La Contraloría Delegada del Medio Ambiente (2014) encontró que las sumatoria de actividades como: sísmica, perforación de pozos, construcción de carreteras; más la carga de las crecientes actividades ganaderas y de cultivos de arroz seco, influenciaron la gran sequía que se presentó en Casanare, particularmente en la zona norte. El informe indica que:

La sequía que azotó a Casanare no es solo producto del cambio climático, sino que también es el resultado del creciente estrés antrópico representado por cultivos de arroz, ganadería de vacunos, construcción de carreteras, varios tipos de sísmica, y perforación de pozos de prospección y producción, los que generaron unas afectaciones sinérgicas que afectaron el balance ecosistémico de la zona y causaron el colapso. (Contraloría General de la República, 2014)

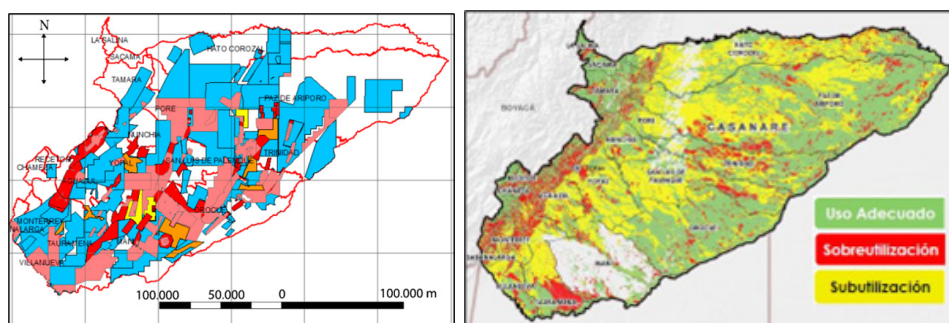
El análisis multitemporal de la cobertura vegetal en la zona de Paz de Ariporo coincide con las conclusiones de la Contraloría, el cual muestra una marcada intervención antrópica en el sur-este de Paz de Ariporo, justamente, entre las veredas de Centro Gaitán y Caño Chiquito (Capítulo 7, Figuras 41 y 44); donde a una deforestación en suelos arenosos, se le sumaron precipitadamente otras actividades antrópicas sin ninguna coordinación gubernamental, como resultado se observó la crisis ambiental tan recordada por el país y representada por la muerte de fauna, principalmente de chigüiros.

La prospección y producción de hidrocarburos en la Orinoquía, concretamente en Casanare, ha tenido en los últimos 30 años un crecimiento exponencial, esto a su vez ha impulsado las transformaciones en la producción industrial de la agricultura de la región; la exploración, asimismo ha disparado las altas tasas de tala de bosque, por está razón el 43,5 % del área de Casanare no se articula con los compromisos de uso de la tierra (Rosero, 2018).

De esta manera, si se contrasta el mapa que muestra los bloques que han sido asignados para estudios de hidrocarburos desde exploración hasta explotación, con el mapa de conflictos del suelo, se notará que hay una relación directa, y que algunas zonas ya están fuertemente intervenidas o sobre utilizadas (Figura 55). Es decir que, las actividades hidrocarburíferas, sumadas a las actividades agroindustriales, podrían estar excediendo las capacidades de carga de la zona, con los resultados ya mencionados. Adicionalmente, el costo de los hidrocarburos no incluye las extarnalidades del costo por la contaminación.

Figura 55

Mapa de bloques de hidrocarburos (exploración-explotación) comparado con el gráfico de compromiso de uso del suelo en Casanare



Nota. Rosero (2018)

10.4 Otros minerales

En la Orinoquía, después del petróleo y el gas, los materiales pétreos tomados de los ríos y utilizados para infraestructura son los más utilizados. Infortunadamente, la explotación de materiales de arrastre es percibida, en general, como un desarrollo no formal que se presenta con los niveles técnicos y empresariales oficiales mínimos.

Lo anterior explicaría las afectaciones ambientales que se le adjudican; entre estas, la turbidez del agua, la erosión y afectación de los cauces y su entorno, y la superposición de la utilización de la tierra con las otras actividades económicas vecinas.

Para permitir la explotación de los materiales de arrastre, se deben hacer estudios que incluyan: la dinámica hidráulica, la geología para cuantificar las reservas, la geomorfología para tener en cuenta el marco geográfico regional, las condiciones regionales de hidrología y su impacto en las dinámicas del curso de agua.

Igualmente, se deben tener en cuenta los aspectos geotécnicos y geomecánicas de las litologías involucradas. Todo esto, para poder entender el marco regional y la capacidad de recuperación del entorno respecto a la cantera.

En las explotaciones de recursos minerales debe ser prioritario implementar los estudios ambientales y de sectorización y el análisis de diferentes alternativas para afianzar la conservación del sistema ecológico principal, mejorar el conocimiento sobre las afectaciones, el impacto de las múltiples acciones sobre la resiliencia del ecosistema, y escoger opciones con conocimiento previo a fin de preservar los valiosos, pero frágiles ecosistemas de la Orinoquía.

11. PROPUESTAS FRENTE A LA ESCASEZ DE AGUA: ÁREAS PROTEGIDAS Y ALMACENAMIENTO DE AGUA

La Orinoquía es una de las zonas de Colombia con mayor pluviosidad, dicha característica ha favorecido la presencia de bosques húmedos que aún cubren gran parte del territorio y permiten una gran diversidad. Las precipitaciones de lluvia varían entre 2.000 y 4.500 milímetros al año, esto representa suficiente agua si se compara con las precipitaciones del altiplano cundiboyacense, que están entre 800 y 900 milímetros al año, esto significa que la región recibe 3 o 4 veces más agua que el centro del país.

A pesar de esas ventajas, ya se están presentando largas y prolongadas sequías en la región, sumado al hecho de que esta es una de las zonas más pobres en abastecimiento de agua potable; dichas sequías podrían afectar no solamente las aguas superficiales y las industrias que dependen de estas, sino también, las aguas subterráneas. Los locales perciben la disminución de las aguas al notar que muchos ríos que eran navegables ya no lo son (Instituto Humboldt, 2018).

El profesor Avellaneda (2014) sostiene que los conflictos ambientales y las sequías están relacionados con cuatro factores: “1) Tres décadas de explotación petrolera, incluyendo no solamente la explotación del petróleo, sino también la sísmica que causa profundización de las aguas y la construcción de oleoductos, 2) Distritos de riego sin regulaciones hídricas para los siempre crecientes cultivos de arroz y palma africana, 3) Tala de bosques en la llanura y en el piedemonte para reemplazarlos por cultivos agroindustriales y para la creación de potreros para el ganado, y 4) Obras de infraestructura como vías, campos petroleros, etc. Que causa desestabilización de las vertientes cordilleranas” (Revista Semana, 2014).

Como no es justo presentar solamente los problemas, en las siguientes páginas se plantean algunas posibles soluciones frente a la escasez del agua de la Orinoquía: 1) Aumento de las áreas protegidas, 2) Almacenamiento del agua en el subsuelo y 3) Almacenamiento de agua lluvia en superficie.

11.1 Áreas protegidas

Parte de la solución a los desafíos previamente mencionados está en la creación de áreas protegidas que conectan los páramos con los bosques del piedemonte, con los ríos, y con morichales y esteros hasta los ríos Meta y Orinoco, que cumplen la función de receptores de todas las aguas de la Orinoquía.

Cuando se menciona las áreas protegidas, generalmente se piensa en la preservación de los bosques y la biodiversidad, pero el WWF (Fondo Mundial para la Naturaleza) defiende que con esas zonas no solo se preserva la biodiversidad, sino también, la cultura, en este caso, la cultura llanera que es tan rica e importante en el contexto nacional.

La representante del WWF recuerda que en la Orinoquía colombiana se han identificado 1479 especies de flora, alrededor de 200 mamíferos distintos, 507 tipos de aves, 65 de reptiles, 49 de anfibios y 175 de mariposas (Higgins, 2014). Aún con toda esa riqueza faunística, los ecosistemas de la región se encuentran subrepresentados dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas; y, por el contrario, representa el mayor porcentaje de ecosistemas transformados a nivel nacional con un 19 %.

Como se ha reiterado en los otros capítulos, la sabana inundable tiende a tornarse desértica durante el verano y ocasiona la muerte de muchos animales. Aunque esa sequía de cuatro meses hace parte de un ciclo natural, tiene el potencial de incrementarse con los aumentos de temperatura que se espera con el cambio climático producto de la emisión excesiva de gases de efecto

invernadero, esos aumentos de temperatura se traducirán en mayor evaporación, lo que significará menos agua superficial.

El desafío es que el desarrollo que se lleva a cabo en la Orinoquía no ha cuantificado el cambio climático, ni las áreas que se deberían proteger por su biodiversidad, por su capacidad para proveer bienes ecosistémicos, ni tampoco se han comprendido bien las dinámicas hidro climatológicas.

Se hace necesario armonizar la agroindustria, la explotación de petróleo y gas, con la organización territorial y con la protección de la biodiversidad. Como todo debe partir del ordenamiento territorial, el uso de la tierra se debe ordenar con criterios de sostenibilidad adicionando las nuevas condiciones del cambio climático y los escenarios futuros.

Porque si las actividades productivas, especialmente las empresariales, se hacen sin una estrategia de conservación, podrían no ser sostenibles, además de causar daños irreparables que tendrían que heredar las generaciones futuras. Cualquiera que sea el modelo económico que se adelante en la Orinoquía, este debe propender por valorar la riqueza ambiental y cultural, además de proteger el agua y la biodiversidad (Higgins, 2014).

La creación de áreas protegidas es una manera de resguardar la biodiversidad, y se convierte en una necesidad prioritaria en la que se pueden considerar varias posibilidades, así: 1) Parques Nacionales, como la Sierra de La Macarena, ubicado al suroccidente del departamento del Meta. Todos los parques no tienen que ser nacionales ni de grandes dimensiones, se puede considerar la creación de parques o reservas de orden departamental y municipal. 2) Bosques nacionales, especialmente hacia el piedemonte. 3) Reservas naturales privadas como las reservas naturales La Aurora y Palmarito. 3) Reservas indígenas. 4) Eco hoteles, etc.

Los grandes hatos y haciendas son buenos candidatos a reservas naturales privadas, las que ya suman más de 57.000 hectáreas, y en Casanare se tienen buenos ejemplos en los hatos: La Aurora, Palmarito, La Esperanza, Las Malvinas, San Pablo y El Boral (Figura 56).

Figura 56

Ubicación de áreas protegidas y reservas naturales privadas



Nota. Modificado de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021)

El Hato La Aurora. La reserva natural de La Aurora, es un buen ejemplo de un dueño de hato quien observa y se da cuenta de que las legendarias haciendas ganaderas están desapareciendo, que las sabanas ganaderas se han reemplazado por otras industrias, que esas industrias son principalmente monocultivos que deforestan

y que dejan sin hogar a cientos de especies, y de paso acaba con buena parte de la centenaria sabiduría llanera.

Así nació la idea de Nelson Barragán Plata de formar la reserva natural La Aurora y el eco hotel Juan Solito, ubicados en Paz de Ariporo (Casanare), con el objeto de preservar el llano tradicional de ganadería extensiva, sin destruir los ecosistemas donde convive el ganado vacuno con la fauna silvestre.

La reserva tiene casi 10.000 hectáreas y alberga más de 40.000 chigüiros, miles de venados, cientos de especies de aves, bastantes reptiles, armadillos, osos hormigueros, zorros, saínos, cerdos silvestres y tortugas, todos ellos dispersos en sabanas, bosques, esteros y corrientes en total estado natural (Revista Semana, 2014).

Las visitas turísticas no solamente permiten observar la flora y la fauna llanera en su estado natural, sino también las labores de ganadería conocidos como los trabajos de llano, la sabiduría relacionada con los usos de diferentes especies de flora, y, sobre todo, maravillarse de los llameantes amaneceres y atardeceres únicos en el mundo (Figura 57).

De esta forma, el señor Barragán busca demostrar cómo la ganadería tradicional puede respetar el medioambiente, al mismo tiempo que se aprovecha la biodiversidad y el paisaje para el ecoturismo.

El Hato Palmarito. Cuando el dueño del Hato Palmarito ubicado al borde del extremo sur del río Cravo Sur en la población de Orocué, se dio cuenta de que ese paraíso natural estaba siendo rodeado por grandes plantaciones y por la exploración petrolera, decidió registrarlo ante Parques Nacionales como reserva natural de la sociedad civil (Figura 58).

Figura 57

Trabajos de llano con participación de turistas en el hato-reserva La Aurora



Nota. Revista Semana (2014)

Las más de 2.000 hectáreas de la Fundación Palmarito es una muestra de cómo el sector privado puede ayudar a proteger el patrimonio nacional; pero no solamente preservar, sino también recuperar vastos sectores que han sido degradados.

Este es un buen ejemplo del trabajo conjunto que se debe dar entre los propietarios privados, las comunidades locales y las instituciones públicas. El trabajo de la Fundación se resume en lo que dicen sus encargados: “Nuestro objetivo no es detener el progreso, pero sería un suicidio dejar acabar los ecosistemas” (Revista Semana, 2014).

Otras reservas en Casanare: La Aurora y Palmarito no son los únicos, ya que otros hatos también han tomado la iniciativa de convertirse en reservas de la sociedad civil. Entre estos tenemos: **Las Malvinas**, ubicado en el municipio de Orocué, con una extensión de más de 500 hectáreas. **San Pablo**, también en el municipio en Orocué con

un área de más de 20.000 hectáreas. **El Boral**, ubicado en la vereda Palmarito de Orocué (Casanare) con un área de 9.000 hectáreas.

Figura 58

Paisajes llaneros en el Hato Palmarito



Nota. Revista Semana (2014)

Por su parte Corporinoquía ha declarado como Distrito de Manejo Integrado las áreas de **San Miguel de Farallones** con una extensión de más de 3.000 hectáreas, y el área de la **Laguna del Tinije** con más de 13.000 hectáreas, ambas en el municipio de Aguazul (Casanare). En el departamento del Vichada; en el municipio de La Primavera, se encuentra **La Laguna de la Primavera**, estimada como ecosistema trascendental de inapreciable valía ambiental de los Llanos Orientales.

Entre Casanare y Arauca se encuentra el **sistema de humedales de Paz de Ariporo – Hato Corozal**, dicho complejo hace parte del gran sistema de humedales del norte de la Orinoquía, representativo de los sistemas de sabanas inundables, claramente, dignos de preservar. **Wisirare** es un humedal cerca de Orocué que encierra dos grandes lagunas de origen antrópico y que forman un importante refugio de aves acuáticas durante el verano.

En el departamento del Meta se resaltan **La Sierra de la Macarena** que es una serranía aislada con alturas de más de 2 km que marcan la transición entre la Orinoquía y la Amazonía. En donde se encuentra el famoso **Caño Cristales** o “río de los siete colores”. La Macarena hace parte de un sistema ambiental especial que incluye el **Parque Nacional Natural Cordillera de los Picachos y el Parque Nacional Natural Tinigua**.

En el departamento de Arauca predomina los **Saladillales**, que son un complejo de sabanas inundables y humedales localizados en la llanura aluvial araucana, entre las municipalidades de Arauca, Puerto Rondón y Cravo Norte. Las pendientes oscilan entre el 1 y 8 % y el paisaje está compuesto por terrazas medias y bajas de origen fluvio-lacustre, planicies de desborde, pequeños bancos con algunos escarceos, zurales disgregados, zonas de drenaje muy pobre y pantanos.

Adicionalmente, se encuentran algunos médanos que constituyen franjas disgregadas y paralelas a las redes de divisoria de aguas de la llanura eólica. De igual forma, sobresale: el Santuario de Flora y Fauna Arauca, Distrito Nacional de Manejo Integrado, y el área protegida con recursos administrados **Cinaruco**.

Las sabanas inundables del Lipa son sistemas de humedales ubicados al norte del departamento de Arauca que están compuestos por esteros, lagunas y otros humedales que forma el río Lipa en crecientes y épocas secas. Los sistemas se conectan en épocas de lluvias con la llanura de inundación del río Arauca y el caño Caranal, lo que hace de la zona un lugar con inundación casi permanente.

En el departamento del Vichada es importante el **Parque Nacional Natural El Tuparro** que es reservorio de aves, orquídeas, monos, serpientes, caimanes llaneros y delfines rosados de agua dulce (toninas). Sobresalen cerros de altura inferior a 900 m, remanentes del antiguo macizo de Guayana, compuestos de composición cuarzosa; en El Tuparro, resaltan los **Raudales de Maipures** sobre el río Orinoco y en la desembocadura del río Tuparro, donde el río Orinoco se estrecha

por 5 Km y su corriente fluye ruidosamente entre rocas gigantescas (Instituto Humboldt, 2018).

En el extremo sur-este de Vichada está la **selva de Matavén**, selva anegada y navegable en la que viven varias tribus indígenas, sobresalen los cerros de piedra que resaltan como islas y que son una ventana a la antiquísima raíz del continente, el Escudo Guayanés.

En Guainía es representativo **la estrella fluvial del Inírida y los cerros de Mavecure** que es uno de los lugares megadiversos de Colombia, en ella confluyen los ríos Guaviare, Atabapo e Inírida, que desembocan luego en el río Orinoco; dicha estrella fluvial se considera como uno de las acumulaciones de agua dulce de mayor envergadura en Colombia y en el mundo, y fue declarada zona Ramsar.

Las serranías del Escudo Guayanés son afloramientos graníticos del Escudo de la Guayana, es decir, montículos de roca ígnea conformados por hierro, cuarzo y otros materiales que aparecen, ya sin suelo, desgastados por la erosión. En el Guainía los más famosos son los **cerros de Mavecure**, estos son tepuyes que han sido meteorizados y redondeados a lo largo del tiempo por la lluvia y el viento.

En Guaviare está la **serranía de La Lindosa**, que es un rosario de salientes rocosas ubicados entre los ríos Guaviare e Inírida, ubicado en la franja que marca la transición entre la Amazonia y la Orinoquía. Las formaciones rocosas de esta serranía se han erosionado parcialmente y han formado una enmarañada red de cárcavas y escarpes como la **Puerta de Orión**, que tienen como fondo las sabanas naturales. Los escarpes fueron utilizados durante siglos por las tribus indígenas de la zona como refugio rocoso, y sobre las rocas trazaron cientos de pinturas rupestres.

Conclusiones. Se espera que los parques y bosques nacionales sigan creciendo, a la par de las iniciativas privadas de preservación. Las reservas existentes se han agrupado en la “Red de Reservas Privadas

de la Orinoquía” que pretende unir las iniciativas privadas impulsando el registro de más reservas, y conciliando el desarrollo y la conservación de la ganadería extensiva y sostenible con el ecoturismo.

Cualquiera que sea el modelo de propiedad o administración de las áreas protegidas, o parques nacionales, estas deben propender por: la preservación de animales en riesgo de desaparecer, la iniciativa de la conservación privada, el esfuerzo en combatir el tráfico de especies silvestres, la investigación básica, el monitoreo de especies invasoras, el fortalecimiento y concientización ambiental entre habitantes rurales y urbanos de la Orinoquía, el promover el ecoturismo comunitario en los parques nacionales y reservas privadas, y el brindar la asesoría para el desarrollo de modelos productivos con menor impacto ambiental, que promueva la mejora de la calidad de vida de las poblaciones de la zona (*Ver Anexo: Las maravillas de la Orinoquía*).

11.2 Almacenamiento del agua en el subsuelo – recarga artificial de acuíferos

Como se mencionó en el Capítulo 4, los altos niveles de evapotranspiración en la Orinoquía producto de las altas temperaturas, particularmente en el verano, hacen que el almacenamiento artificial en presas y jagüeyes durante este período, no sea la mejor opción, por lo que se deben considerar otras alternativas. Una de ellas es almacenar el agua en el subsuelo, también conocida como recarga artificial de los acuíferos.

Definición. La recarga artificial es una serie de sistemas que posibilitan, mediante esfuerzo antrópico, la infiltración de agua en un acuífero. La recarga del acuífero puede ser directa o inducida. Su implementación incrementa la disponibilidad del recurso acuático y puede mejorar su calidad.

En el caso particular de la Orinoquía, se puede utilizar la recarga artificial para: almacenar agua subterránea a partir de escorrentía, reducir el descenso de los niveles de los acuíferos en lugares con excesivo

bombeo, mantener los niveles ecológicos de agua en humedales estratégicos como esteros y lagos, reducir los costos de transporte, almacenamiento y bombeo de agua, aprovechar las propiedades del subsuelo para filtrar aguas residuales y para diluir altos contenidos de contaminantes como nitratos, fosfatos, cloruros y otros.

Articulado a lo anterior, el origen del agua para la recarga artificial podría ser: 1) agua de las corrientes y caños o agua de escorrentía de campos y ciudades, 2) agua residual doméstica, 3) agua procedente de otro acuífero o de manantiales. Dependiendo del origen, se puede considerar cierto grado de tratamiento.

Información básica. Para que un proyecto de recarga sea exitoso se debe contar con suficiente información acerca de:

- Litología y aspectos geológicos del acuífero.
- Geometría del acuífero.
- Niveles piezométricos.
- Análisis químicos y de calidad del agua.
- Conocimiento de las constantes o parámetros hidráulicos (permeabilidad, transmisividad, conductividad hidráulica, porosidad efectiva, coeficiente de almacenamiento).
- Conocimiento sobre el flujo regional.
- Ubicación de zonas de recarga y descarga.
- Usos y consumos de agua.
- Balance hídrico.

Métodos de recarga. El siguiente paso es determinar los métodos de recarga más apropiados desde la perspectiva técnica y el punto de vista económico (viabilidad). No solamente se deben considerar distintas alternativas de posibilidades de infiltración, sino también, examinar las instalaciones auxiliares, los sistemas de monitoreo, seguimiento y los sistemas de transporte de agua de infiltración. La Tabla 5 presenta los diferentes métodos y sistemas de recarga artificial que se pueden considerar dependiendo del acuífero y de la recarga.

Tabla 5*Diferentes métodos y sistemas de recarga artificial de acuíferos*

Superficiales	En cauces	Serpenteos y represas	Se trata de aumentar el tiempo y la superficie de contacto entre el agua de escorrentía y el terreno, mediante la construcción de diques o muros de tierra.
		Escarificación	Escarificar o rastrillar la base del río eliminando lodos y mejorando la infiltración.
		Vasos permeables	Son embalses superficiales cuyo piso no es totalmente impermeable.
	Fuera de cauces	Balsas	Son excavaciones alargadas poco profundas y de gran área donde la infiltración se da por el fondo principalmente.
		Fosas	Son similares a las balsas, pero la infiltración es por los flancos.
		Canales	Son excavaciones o conductos de agua profundos que siguen las curvas de nivel del terreno. La infiltración se produce por el piso y por los lados.
		Campos de extensión	Consisten en aspersar agua sobre la superficie del terreno, normalmente mediante riego con grandes aspersores.

En profundidad Simas y dolinas Drenes y galerías Zanjas y pozos	Pozos de inyección	Son pozos de inyección para inyectar agua en el acuífero.
	En los terrenos calcáreos, se pueden utilizar las simas y dolinas para infiltrar agua en el acuífero.	
	En el fondo de un pozo tipo aljibe se hacen drenes y galerías para introducir el agua.	
	Gran excavación de infiltración de poca hondura que se rellena de grava y en la cual se ubican pozos de recarga.	

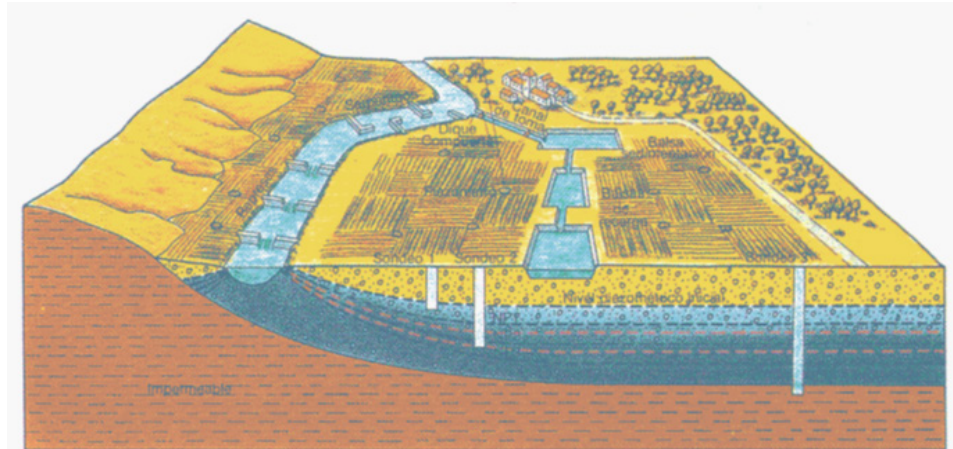
Nota. Tomada textualmente de IGME (2021)

Los métodos de recarga y almacenamiento superficial de agua en el subsuelo son los más prácticos y presentan menos problemas técnicos de recarga profunda.

La Figura 59 presenta un esquema de recarga de acuíferos libres superficiales utilizando canales y balsas donde la infiltración se produce por los lados, y particularmente por el fondo.

Figura 59

Esquema de recarga de acuíferos libres superficiales utilizando canales y balsas



Nota. IGME (2021)

La recarga superficial sería el método óptimo para los acuíferos superficiales de las sabanas de la Orinoquía que son arenosos y freáticos. De esta forma, el agua se almacenaría para épocas de sequía evitando la evaporación del agua, el proceso de filtración también podría ayudar a descontaminar los acuíferos con bajos costos.

La recarga ya se está dando en muchos de los humedales que existen en la región de la Orinoquía, pero esta se podría mejorar e implementar en diferentes áreas, considerando algunas de las opciones presentadas en la Tabla 5.

11.3 La cosecha de agua – almacenamiento de agua en superficie

Cosechar agua es utilizar, acumular o represar toda la cantidad de agua posible producida en tiempos de lluvia, para así tener almacenamiento para proveer las necesidades en los períodos de verano o secos. La cosecha de agua es la acumulación de agua lluvia para usarse en la vida diaria.

Este tipo de obtención de este recurso ayuda a reducir la explotación de los acuíferos superficiales o libres, ya que deja de usar el agua que se obtiene de manera convencional y en cambio utiliza la que proviene de las lluvias en actividades como regar las plantas, o limpiar los baños, entre otros. En la actualidad esta forma de obtener agua es cada vez más común en climas áridos y secos que es donde más escasea el agua.

El cosechar el agua lluvia podría disminuir en cerca de un 50% el agua potable que se usa en una casa diariamente. La recolección del líquido puede ser muy básica o más complicada en función de los recursos disponibles. La transformación que subyace a estas prácticas, comienza desde colocar contenedores o canaletas en los tejados o jardines para recogerla y poder utilizarla posteriormente.

También se puede organizar un sistema de recolección que consiste en canales y bajantes que recogen el agua de lluvia que viene del techo y pasa por un filtro para eliminar parte de los sedimentos que contiene y posteriormente almacenarla en un tanque (Figura 60).

Figura 60

Recolección del agua lluvia que cae al techo y es conducida hasta un tanque de almacenamiento



Ventajas

1. Permite que los hogares que no tienen una fuente de agua confiable puedan tener una.
2. Disminuye el uso diario de agua en los hogares.
3. Reduce el consumo de agua potable en actividades diarias.
4. Reduce el impacto ambiental y la huella hidrogeológica que generan los humanos.
5. Disminuye el uso de los acuíferos superficiales o libres.
6. Aunque generalmente no es potable, se puede utilizar en otras cosas como jardines y baños.

Desventajas

1. En algunos lugares puede resultar costoso instalar los sistemas de recolectar y almacenar el agua lluvia.
2. Si solo llueve en una o dos épocas del año; por lo tanto, se reduce la posibilidad de almacenar agua.
3. En lo posible, el agua lluvia cosechada no se debe utilizar como agua potable por los contaminantes en la atmósfera y en el techo, por lo tanto, sus usos deben ser limitados.
4. No es fácil sobrevivir solamente con el agua cosechada de la lluvia, ya que se requerirían grandes contenedores para almacenar toda el agua que consumiría un individuo.

La cantidad de agua lluvia puede parecer muy poca para almacenar, pero se ha encontrado que un (1) milímetro (mm) de lluvia caída en 1 metro cuadrado (m²) de captación (techo) produce un litro de agua acumulada; por lo tanto, si caen 100 mm en un techo que tiene 30 m² producirá 3.000 litros de agua que se pueden almacenar y utilizar.

Finalmente, el total de agua que se podría acopiar, dependería del área del techo de la casa y de la precipitación en esa zona. Para conocer la precipitación del sector se puede consultar a la oficina meteorológica. En el caso de Colombia se puede revisar la página web del IDEAM donde se obtiene de forma gratuita dichos valores de las estaciones meteorológicas más cercanas al sitio de

interés. En la Orinoquía, la precipitación promedio durante el año es de 2.000 a 2.500 mm; pero en la época seca (diciembre-marzo), puede reducirse a cerca de 200 mm. En el Capítulo 4 se explica los cambios de precipitación a través del año en la región.

Es pertinente aclarar que, por razones de higiene, se acostumbra a no utilizar la primera lluvia y dejar que esta limpie la suciedad y polvo acumulado en el techo; por lo tanto, la captación se haría a partir de la segunda lluvia. En algunos países como Chile, no solo se recolecta la lluvia que cae al techo, sino también la niebla y la lluvia utilizando redes atrapa nieblas y atrapa lluvias.

Si se decide cosechar el agua lluvia, es porque la región es realmente seca y el agua se considera escasa y vital; por está razón, las otras opciones de conseguir agua están descartadas. La mejor utilización de la cosecha del agua es para regadío que se puede maximizar cultivando en invernaderos e irrigando las plantas con sistemas de goteo.

El costo de estos sistemas de captura de agua está limitado a los tanques colectores, los tubos, canales de captación y transporte del líquido vital. Si el agua recolectada se utiliza para riego no habría necesidad de filtrarla, pero si se usa para lavar ropa, sería necesario hacerlo; y si se emplea para el consumo humano, es necesario potabilizarla mediante filtros de arena y adición de cloro.

Los métodos más prácticos y económicos para la recolección de agua lluvia son aquellos en los que se utiliza la gravedad para la conducción del agua, y así, evitar los costos extras de tener una motobomba (Figura 60).

Para finalizar, es importante referir que entre las personas que han utilizado exitosamente este método de captación, se hace evidente el sentimiento de autosuficiencia al obtener resultados e ingresos extra, gracias al uso de un recurso que de otra manera se habría perdido.

12. ALMACENAMIENTO DE CO₂ POR SILVICULTURA Y POR CAPTURA DE CO₂ (CCS)

En el Capítulo 8 se presentaron tres estudios de caso en Casanare y Arauca donde la pérdida de cobertura vegetal está teniendo repercusiones sobre la biodiversidad y el agua. En las últimas décadas, esos cambios han sido significativos en varios sectores, lo que hace que la Orinoquía sea una de las principales zonas con más pérdida de bosque.

Esa carencia de cobertura vegetal ha incrementado la erosión de los suelos y ha afectado los lechos de los ríos y los flujos del agua, tanto superficial como subterránea, por lo que se hace necesario la delimitación y recuperación de los mismos.

Se dice que el país deforesta 611 hectáreas de bosque por día y con ellos, la flora y la fauna que estos hospedan. Aunque ese detrimento de bosques es algo que como país se sospecha o se sabe, siempre se plantea la pregunta de cómo detenerlo (Revista Semana, 2021). A nivel global, se refleja en el aumento de las emisiones del CO₂ por descomposición o quema de la madera y en la disminución del oxígeno que genera ese bosque.

A continuación, se presentan algunos argumentos y acciones concretas sobre cómo podríamos almacenar los gases de efecto invernadero (GEI), y la importancia de las mismas con relación a: la preservación del agua, la generación de oxígeno para balancear la generación de CO₂, y el control del cambio climático mediante la preservación de los bosques.

De otro lado, en la segunda parte se presenta una síntesis de argumentos de cómo la Orinoquía es el lugar ideal en Colombia para almacenar o capturar CO₂ en el subsuelo y evitar que se vaya a la atmósfera como GEI.

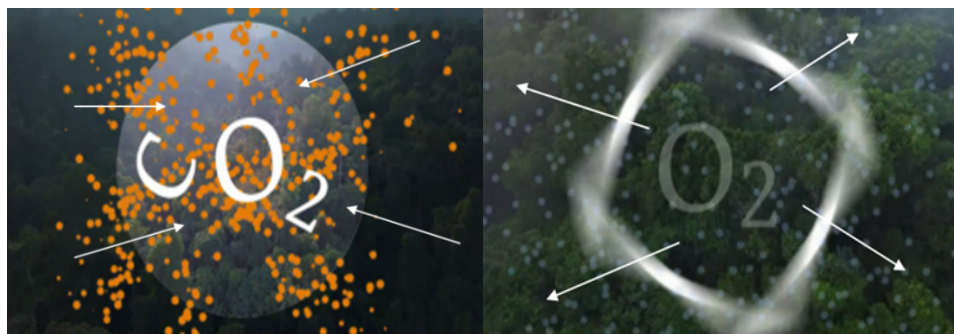
12.1 Almacenamiento de CO₂ y agua por los bosques (silvicultura)

Según la FAO que es la oficina de Naciones Unidas encargada de la alimentación y la agricultura, un bosque es un terreno de más de 1 hectárea donde más del 10% es cobertura arbórea (FAO, 2021).

El bosque provee sombra por las partes superiores y en las partes inferiores protege al terreno de la erosión eólica e hídrica. Cada hectárea de bosque almacena en promedio 10 toneladas de CO₂ y produce mucho oxígeno y agua en forma de vapor que después se incorpora a las nubes (Figura 61).

Figura 61

Los árboles almacenan CO₂ y producen oxígeno (O₂)



En relación con el agua, el bosque almacena y filtra este recurso dependiendo de las especies y del tamaño de los árboles. En general, mientras más grande sea el árbol, más agua almacena para liberarla posteriormente por las raíces y por la hojas; a los árboles que almacenan más agua, los campesinos los conocen como nacederos (Figura 62).

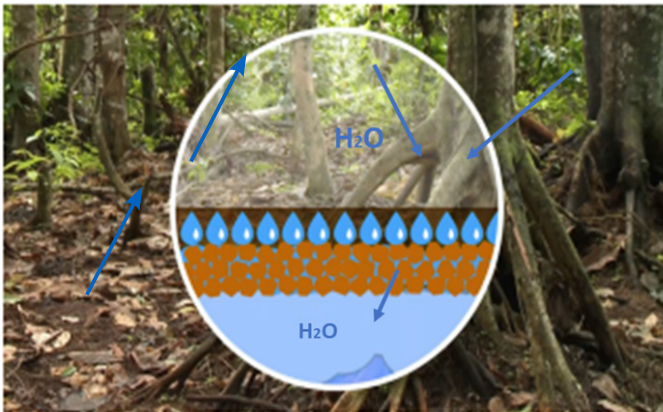
Económicamente muchas personas viven de los servicios ecosistémicos del bosque, de la madera y de muchos otros productos que proveen como alimentos, medicinas y compuestos químicos.

Adicionalmente, los bosques, particularmente, los antiguos, proveen gran biodiversidad y almacenamiento de gases de efecto invernadero.

Por lo anterior, es mucho lo que está en juego con la preservación de los mismos. Si son tan importantes, ¿Por qué nos estamos ensañando contra ellos?

Figura 62

Los bosques almacenan y filtran al agua, para luego liberarla en épocas secas



Para responder dicha pregunta vamos a examinar diferentes perspectivas. Según Manuel Rodríguez, exministro del medio ambiente “se requiere voluntad política”, ya que la deforestación es de complejidad global y es posible frenarla con institucionalidad. El profesor Rodríguez culpa a grandes empresas criminales que buscan deforestar grandes áreas y crear grandes predios.

El país no solamente debe tomar conciencia de las consecuencias de la pérdida del bosque y del impacto para la economía del país, sino también, movilizarse y generar más diálogo entre las instituciones y la comunidad.

Parece que nos limitamos a dar la voz de alerta con la cantidad de hectáreas arrasadas, pero no profundizamos en la fauna y el suelo que se pierde, en las relaciones ecosistémicas que quedan destruidas, al igual que la cultura acumulada de las colectividades que se pierde. Es obligación de las universidades y de las instituciones científicas recolectar y presentar dicha información.

Otro argumento es que nos detenemos en la retórica y no asignamos los recursos necesarios, para que junto con la institucionalidad se tenga dinero suficiente. La creación y aumento de los parques nacionales y de áreas de reserva son una buena señal en Colombia y con esto la asignación de guarda parques y guardabosques, quienes no solo protegen los bosques, sino también ayudan a crear conciencia ambiental. A lo anterior es necesario sumarles nuevas tecnologías como cámaras, drones e imágenes satelitales que nos pueden ayudar a hacerle el seguimiento a la salud y desarrollo de los bosques.

Otro de los desafíos de los bosques más antiguos y densos del país es la lejanía, por lo tanto, vemos a los bosques como algo remoto y salvaje, y en ocasiones hostil. El Estado mismo no ejerce la presencia debida en dichas regiones y, por lo tanto, están fuera del alcance de la ley.

Los planes de las instituciones del Estado y las diferentes instituciones no son coordinados y en ocasiones contradictorios. Por ejemplo, en el pasado se prestaba dinero solo para ganadería y eso si el terreno estaba despejado (bosque talado) (Figura 63).

Figura 63

Tala de bosques para ganadería (creación de potreros)



Nota. Revista Semana (2021)

Para algunos ambientalistas, la deforestación es el primer problema del país y el mayor generador de GEI (gases de efecto invernadero) que causan el calentamiento global. Insisten que se necesita que los pequeños productores desarrollen proyectos productivos silvopastoriles y que comprendan que reforestar puede ser productivo.

Para otros, el problema también puede ser institucional, ya que es evidente la relación entre construcciones viales, presencia militar y compras de tierras por tenedores o terceros. Una manera de contrarrestar este efecto es lograr un trabajo mancomunado con las federaciones de cultivadores de palma, arroz, etc., y con los ganaderos para que entiendan la problemática de la pérdida del bosque y puedan ayudar a identificar los desarrollos ilegales que están arrasando los bosques.

En los últimos años se han creado parques nacionales en zonas boscosas de la Amazonía y la Orinoquía como una manera de preservar el bosque, pero no se tienen metas específicas para cada parque, además de decir que no se va a permitir la deforestación. Así que, visto desde el exterior, la pérdida incontrolada de los bosques no es otra cosa que un síntoma de ausencia de soberanía del Estado, por lo que se debe promover la afinidad y el acompañamiento de la ciudadanía local y nacional sobre los desafíos de la deforestación y las iniciativas para refrenarla y reducirla (Semana, 2021).

A nivel mundial, el ser humano está devastando los bosques aceleradamente, al hacerlo, se libera todavía más CO₂ a la atmósfera del planeta, lo cual afecta los regímenes de lluvia, se disminuye la biodiversidad, dicha situación obliga y arrincona a los pueblos nativos que han habitado esos territorios durante siglos y, simultáneamente, se elimina para siempre especies de animales y plantas que la ciencia no ha podido siquiera conocer.

El ser humano, como especie dominante, destruye animales y árboles antes de haber sido descubiertos por primera vez y asombrarse

con ellos. Los artrópodos o insectos, específicamente las abejas, principio de la cadena alimentaria de casi todos los seres vivos, están desapareciendo con consecuencias pavorosas y complejas de predecir.

Una manera de mitigar la devastación que el mismo hombre ha causado por su ambición desmedida, y en el caso específico de la Orinoquía que tiene una vocación ganadera tan marcada, consiste en sembrar más árboles en los potreros; y a pesar de la disminución del número de reses por hectárea, se ganaría en preservación del agua, en adición de materia orgánica al suelo por el aporte de las hojas, así como, en sombrío y reducción de la temperatura que en época seca puede llegar a estresar al ganado mismo.

Este método de criar hatos en zonas semiboscosas también conocido como ganadería silvopastoril podría tener múltiples beneficios, particularmente en la reducción de temperatura y en la captación de carbono que serán de los mayores desafíos de la región frente a los cambios climáticos (en el Capítulo 9 se amplía el tema de la ganadería silvopastoril).

Existen dos tipos de bosques asociados con la sabana que sirven de referencia: 1) **el Saladillal** que es un tipo de sabana con altos árboles (ver Capítulos 9 y 11) 2) **Las matas de monte** que son pequeñas islas de bosque, casi perfectamente circulares, que se forman gracias al trabajo constante de las hormigas arrieras en las sabanas, y al proceso ecológico de sucesión y adición de nutrientes con el que se inicia la conformación de bosques incipientes. El mantenimiento y restitución de los bosques, en el piedemonte, sería parte de corredores biológicos que ayudarán a la preservación de la fauna silvestre.

12.2 Captura y almacenamiento de CO₂ en el subsuelo (CCS)

A lo largo del libro, se ha recordado que las cantidades de CO₂ (dióxido de carbono) emitidos a la atmósfera están incrementándose exageradamente, y si esas emisiones no se reducen, el planeta seguirá sintiendo las crecientes consecuencias del cambio climático (Mariño y Chanci, 2020).

La captura y almacenamiento en trampas geológicas de CO₂ previene que enormes cantidades de este gas se escapen a engrosar la atmósfera y, por lo tanto, a aumentar el calentamiento global. En el subcapítulo anterior se recordó lo fundamental de los bosques en el almacenamiento de CO₂ de manera segura y natural.

A continuación se presentan los principios básicos de la tecnología para la captura del CO₂ en el subsuelo o CCS (Carbón Capture and Storage) generado por carboeléctricas fábricas industriales, y la compresión del gas para su conducción e inyección en formaciones rocosas profundas en el subsuelo en un lugar que previamente ha sido catalogado como seguro, donde el GEI se almacenaría de manera permanente (Consoli et al., 2017).

En este Capítulo, además de presentar el estado del arte sobre CCS, también se sustenta porque las rocas sedimentarias horizontalizadas que yacen debajo de las sabanas de la Orinoquía presentan condiciones favorables para capturar y almacenar el CO₂.

Según Mariño y Moreno (2018), el CCS es un procedimiento que se enfoca en separar el CO₂ emitido por la industria manufacturera y la energética, su posterior envío a un sitio de almacenamiento y su reclusión de la atmósfera a un largo tiempo. El CO₂ subsiste en la atmósfera por varias décadas y es asimilado poco a poco por los sumideros de la naturaleza que almacenan el CO₂ por un período indeterminado (Bennaceur et al., 2004).

La captura y almacenamiento incluye el uso de *know-how*, en primera instancia, para capturar el CO₂ generado en las generadoras industriales y afines con la energía; después, trasladarlo a un lugar de almacenamiento adecuado, y finalmente, acumularlo y aislarlo de la atmósfera por un largo tiempo. En esta forma, la captura y almacenamiento permitiría que se usen los combustibles fósiles generando mínimas o nulas emisiones de gases de efecto invernadero (Bachu, 2000).

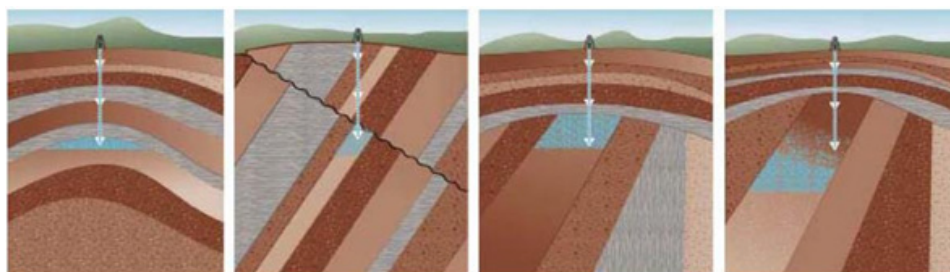
De todas las posibilidades de almacenamiento geológico consideradas en su investigación, Mariño y Moreno reconocen que: “las trampas geológicas estructurales y estratigráficas muestra las mejores condiciones por el porcentaje de captación y por el breve tiempo de introducción en las rocas. Para que se forme una trampa geológica hace falta un sistema geométrico que capture y mantenga el CO₂ impidiendo su posterior escape”.

Esas estructuras geológicas se les llama trampas (Figura 64). Para calcular el volumen poroso de las trampas o roca con posibilidades para almacenar el CO₂, se hace el cómputo recordando las variables mencionadas con anterioridad, a través de la siguiente ecuación:

“Volumen poroso total = Área * Espesor * Porosidad de la roca”

Figura 64

Cuatro formas diferentes de entrapamiento geológico



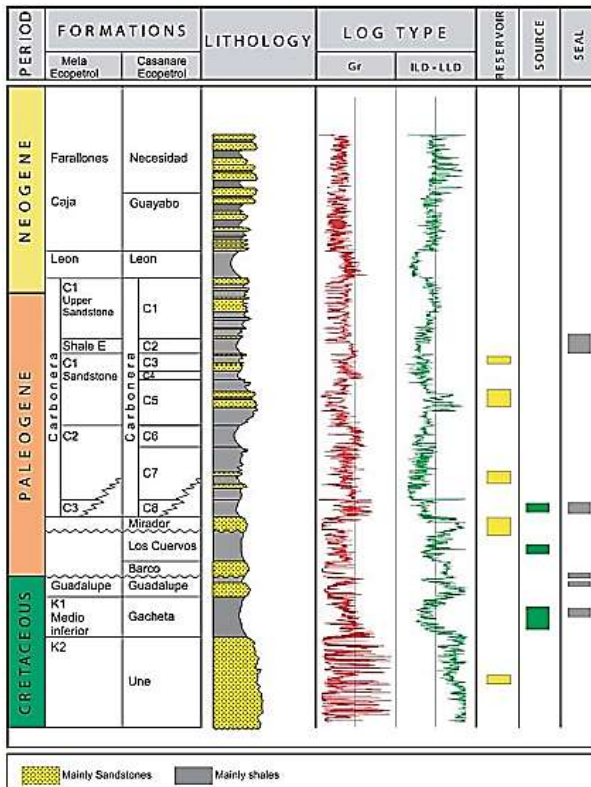
Nota. A. Estructural (a través del eje de un anticlinal); B. Estructural (aislado por una falla); C. Estratigráfico (aislado por una discordancia); D. Estratigráfico (aislado por el cambio lateral de tipo de roca y de permeabilidad). Mariño y Moreno (2018)

Después de examinar las diferentes cuencas de Colombia, se concluyó que la Cuenca Llanos Orientales ofrece las condiciones más favorables por su baja complejidad y fracturamiento tectónico comparado con otras como la Cordillera Oriental.

Al respecto Mariño y Moreno (2018) expresan que, de todas las formaciones en la cuenca Llanos, la Formación Carbonera es la más propicia para CCS porque posee intercalaciones arenosas que no están siendo manipuladas (niveles C1, C3, C5 y C7) y que podrían ser propicias como formación almacén por su volumen de almacenamiento en un proyecto en ciernes de captura de CO₂ (Figura 65). Lo sugerido, debe desarrollarse a partir de investigaciones minuciosas de caracterización de la Formación Carbonera, o de otras formaciones con características similares.

Figura 65

Columna estratigráfica que muestra las rocas a profundidad de la Cuenca Llanos



Nota. Adaptada de ANH (2012)

Adicionalmente, la Formación Carbonera está localizada a profundidades mayores que los acuíferos con potencial y que los miembros arenosos donde se almacenaría los GEI están supra yacidos por formaciones rocosas de carácter arcilloso que formarían aislantes hidráulicos o sellos (niveles C2, C4, C6 y C7); adicionalmente, toda la formación está recubierta por el sello regional de la Formación León.

Las rocas arcillosas mencionadas, soportarían el aislamiento natural de la zona de disposición de los gases de efecto invernadero y evitarían su fuga; de esta forma, se garantizaría la no afectación a los acuíferos más cercanos a la superficie en las formaciones Guayabo (Caja) y Necesidad y en los acuíferos libres cuaternarios (Figura 65).

En los miembros arenosos de la Formación Carbonera, se encontró que las porosidades y las permeabilidades se observan más o menos constantes y que están dentro de los límites de las formaciones rocosas en el que se han adelantado proyectos de captación y almacenamiento de CO₂; por lo tanto, se llega a la conclusión que los miembros de dicha formación presentan las características petrofísicas adecuadas para que los GEI penetren y se almacenen en la roca sin causar daño en la formación (Mariño y Moreno, 2018).

12.3 Conclusiones

La captura y almacenamiento de CO₂ es una de las mejores opciones de sacar de la atmósfera los GEI producto de la quema de hidrocarburos. La opción más económica y práctica es la preservación y siembra de bosques, en este sentido, la Orinoquía cuenta con abundantes tierras y generosas lluvias para restaurar e incrementar los bosques existentes.

Otra manera de capturar el CO₂ es mediante el método CCS que capta y almacena GEI en el subsuelo; aunque, se sabe que en Colombia aún no existe una reglamentación del estado acerca de las normas sobre las tecnologías utilizadas para su captación, seguramente en un futuro cercano las tendremos a medida que esas investigaciones y desarrollos se experimentan y refinan a nivel

global con proyectos pioneros; por lo que espera que, finalmente dichos hallazgos serán implementadas con técnicas confiables.

A pesar de que en Colombia aún no existe una amplia investigación en progreso sobre las posibilidades de captura y almacenamiento de GEI. En América Latina, es uno de los países con mayor factibilidad de aplicación del CCS; en primer lugar, por las grandes reservas de carbón, petróleo y gas, que son los hidrocarburos donde más se han considerado posibilidades de almacenamiento, y donde más se han desarrollado las tecnologías actuales sobre captura de gases. En segundo lugar, por los progresos que se han tenido en el país en las metodologías de reinyección.

La madurez de la Cuenca Llanos y su tranquila evolución tectónica, así como las características estratigráficas y petrofísicas, llevan a concluir que la Formación Carbonera presenta las características para captar monóxido de carbono (CO₂) y otros GEI. Los miembros arenosos impares de esta formación y más concretamente C1 y C7, son las areniscas más apropiadas para la investigación del método CCS.

Un proyecto con posibilidades, contendría la acertada combinación tecnológica de la captura de CO₂, el transporte del gas, la trampa geológica adecuada de almacenamiento, el conjunto de técnicas de acopio y la proximidad a una fuente emisora de CO₂, que puede ser una central eléctrica de carbón productora de energía.

En los últimos años el método CCS ha evolucionado a CCUS o captura almacenamiento y uso del CO₂, ya que este se inyecta en el subsuelo, no solamente se almacena parcialmente, sino también se puede utilizar para “empujar” los hidrocarburos que no se han podido sacar por métodos convencionales, como parte de una técnica conocida como recuperación secundaria (EOR). En esta forma, el CO₂ se atrapa en el subsuelo y se usa para sacar petróleo y gas que de otra forma permanecerían enterrados en campos agotados.

13. ESCENARIOS FUTUROS DEL AGUA DE LA ORINOQUÍA – AÑO 2040

La Orinoquía siempre se ha relacionado con la abundancia del agua, pero en las últimas décadas se han estado presentando algunos desafíos como: el incremento de los monocultivos, de la exploración de hidrocarburos y el cambio climático con aumentos de temperatura y olas de calor, que, sumados conjuntamente, están teniendo un gran impacto en las aguas de las llanuras del Orinoco.

Para tener un mejor panorama y poder visualizar el futuro del agua en la región, se presentan dos posibles escenarios futuros a 2040. En primer lugar, se ilustran detalles del plan PRICCO para la Orinoquía (Plan Regional Integral de Cambio Climático), en el que se contrasta la situación actual del clima y los escenarios, proyecciones y tendencias para toda la región al año 2040. En segundo lugar, y de manera más específica, se presenta una aproximación a la modelación del escenario de las aguas subterráneas del municipio de Yopal a 2040.

13.1 Escenarios, proyecciones y tendencias climáticas de la Orinoquía a 2040

Con el liderazgo del CIAT (Centro Interamericano de Agricultura Tropical) y el apoyo de las CAR de la Orinoquía, Cormacarena, Corporinoquía y la empresa de petróleo Ecopetrol se hizo un plan regional completo sobre la perspectiva en el cambio del clima para esta región, en el que participaron más de 1.000 representantes decisorios de 170 establecimientos de orden público y privado. En dicho estudio se comparó el escenario de la temperatura actual con el escenario futuro a 2040 (CIAT et al., 2017).

Escenario actual. Como parte del modelamiento del clima actual se hizo una zonificación climática en la que se incluyeron las probabilidades de eventos extremos de sequía y de exceso hídrico severo. La región de la Orinoquía fue dividida en ocho (8) zonas así: (1) Sabana inundable 21,2 %, (2) altillanura plana 11,9 %, (3)

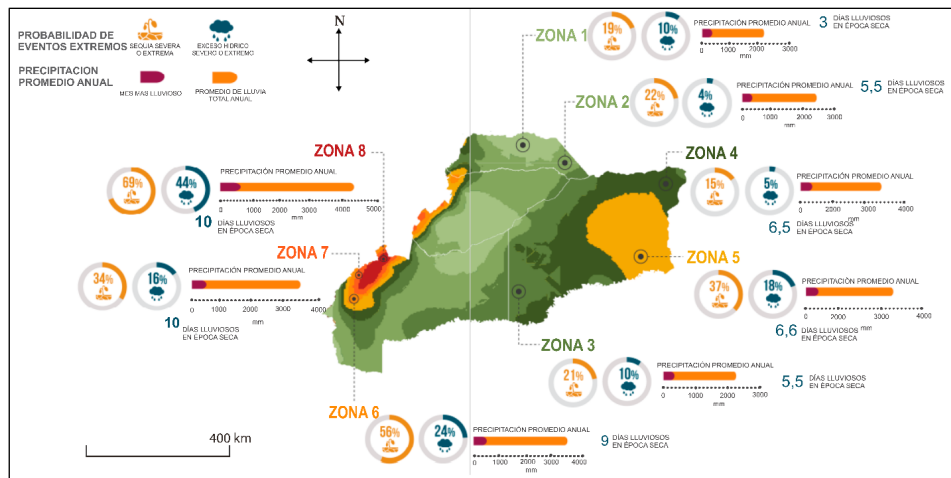
altillanura disectada 27,7 %, (4) áreas protegidas 8 %, (5) transición Orinoco-Amazonas 17,1 %, (6) transición andino-Orinoco-Amazonas 1,9 %, (7) piedemonte 7,6 % y (8) cordillera 2,6 %.

La Figura 66 muestra que bajo las condiciones climáticas actuales y de temperatura, las sabanas inundables (Zona 1, Casanare y Arauca) presentan una probabilidad de 19 % de extremos de sequía severa y un 10% de posible riesgo de exceso hídrico severo, con una precipitación promedio de 2.000 mm/año; mientras que la altillanura (zonas 2 y 3, partes de Meta y Vichada) exhibe entre 20 y 21 % de extremos de sequía severa, y un 4 a 10 % de potencial de exceso hídrico, con una precipitación de cerca de 2.500 mm/año.

La llanura inundable presenta solo tres días lluviosos en época seca, mientras que la altillanura presenta alrededor de 5,5 días lluviosos en época seca, lo que suaviza esta temporada (CIAT et al., 2017).

Figura 66

Probabilidad de eventos extremos en la Orinoquía bajo las condiciones climáticas actuales



Nota. El círculo amarillo corresponde al % de posibilidad que se presenten sequías, el círculo azul a las inundaciones. CIAT et al. (2017)

Escenario a 2040. La modelación de los escenarios, proyecciones y tendencias a 2040 se hicieron con cambios proyectados en dos variables: la temperatura máxima y mínima para tres trayectorias diferentes: optimista, realista y pesimista.

La Figura 67 presenta los tres escenarios de cambios o anomalías proyectadas con la temperatura máxima y los cambios proyectados en la precipitación con una trayectoria de concentración representativa (RCP), con énfasis en la RCP de 4,5. Las RCP son escenarios de la trayectoria de concentración de GEI adoptados por la oficina de cambio climático de las naciones unidas o IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, (ver Capítulo 2) para la modelación del clima.

La RCP 4,5 (realista) es una de las tres trayectorias que describen diferentes futuros climáticos, dependiendo del volumen de GEI en la atmósfera a ser irradiados en los próximos años. Un RCP de 4,5 indica la cantidad de irradiación (vatios) por metro² (W/m²). La RCP 4.5 en particular indica que las emisiones alcanzan su punto máximo alrededor de 2040, luego disminuyen.

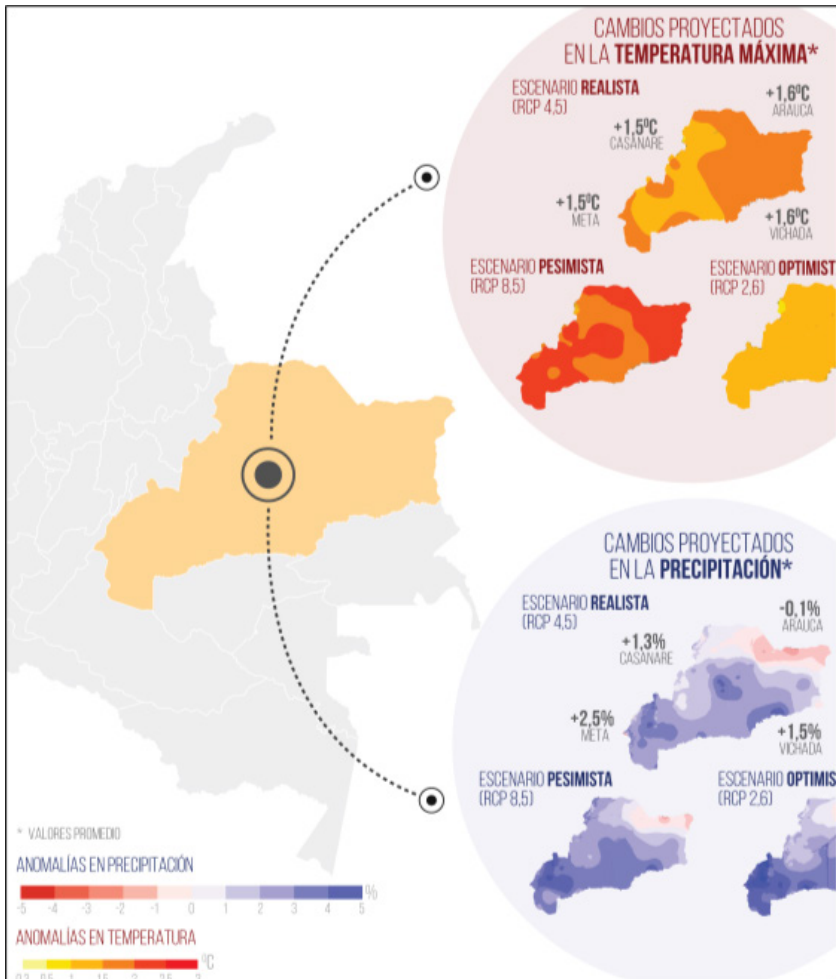
Proyecciones. En la Orinoquía colombiana se pronóstica que a 2040 la temperatura máxima actual se incremente entre 0,8 a 1,9 °C y la mínima entre 0,3 a 1,8 °C. Se suponen temperaturas extremas más calientes y más frecuentes, así como, temperaturas frías menos frecuentes.

Se prevé aumentos de la probabilidad de días con temperaturas superiores a 38°C en la zona oriental, la probabilidad de días con estas temperaturas puede aumentar en más del 20%. Nótese que, bajo un escenario realista, a 2040 los incrementos para Meta y Casanare podrían alcanzar los 1,5°C, mientras que los cambios proyectados en la precipitación podrían incluso aumentar entre 1,3 y 2,5 % (Figura 67). La Temperatura de 38°C es el umbral a partir de la cual el calor es extremo y se presenta estrés calorífico que puede estar acompañado por dolores de cabeza, deshidratación,

problemas respiratorios y posibilidades de paro cardíaco, afecta de la misma manera a seres humanos y animales, pero particularmente a los niños y ancianos.

Figura 67

Cambios o anomalías proyectadas con la temperatura máxima y la precipitación



Nota. CIAT et al. (2017)

La Figura 67 indica que las anomalías proyectadas para la Orinoquía en las precipitaciones son ligeras, y fluctuarían entre -0,1 y 2,5 % con mayores incrementos hacia el sur de la región y decreciendo hacia el norte en la cercanía al río Arauca. Con el aumento de la temperatura, la probabilidad de sequías también crecerá, acompañada del crecimiento del número consecutivo de días sin lluvia. Los excesos de lluvia serán más frecuentes y los eventos lluviosos por encima de 90 mm.

De acuerdo con la (Figura 66) los períodos de sequía se estarían presentando cada 5 años en promedio, y podrían ser más severos y repetitivos. Dichos períodos de sequía coinciden con los de recurrencia advertidos en el norte de la región (Capítulo 4, Figura 18).

Tendencias e impactos. En cuanto a la biodiversidad, la mayoría de especies se verán afectadas y algunas tendrán que desplazarse a zonas más favorables que, en su mayoría, serán hacia el piedemonte y la cordillera. En cuanto al recurso hídrico, las zonas de sabanas inundables tendrán que sortear los cambios en el régimen de precipitación con épocas de lluvia y sequía más fuertes y frecuentes.

En algunos de los ríos, el aporte al caudal será positivo, pero en la mayoría, tendrá efectos negativos. En cultivos de cereales, las pérdidas en rendimiento estarán entre el 15 y el 60 %, el café se desplazará hacia zonas más altas. La ganadería tendrá mayor riesgo de pérdida por estrés calorífico. En cuanto a la salud, puede verse mayormente afectada por el aumento de la población de mosquitos transmisores de malaria, dengue, zika y Chikunguña (CIAT et al., 2017).

En lo referente al agua subterránea, se deben establecer más estaciones hidrometeorológicas de monitoreo y también adelantar más estudios, de tal manera que haya información suficiente para modelar los acuíferos y niveles, y definir contextos de planificación y decisión de hojas de ruta sobre las mejores opciones a tomar.

La presencia de los páramos de la Cordillera Oriental hace que la Orinoquía tenga una gran riqueza hídrica; A pesar de esa abundancia de agua, no todas las corrientes mantienen flujos constantes por todo el año debido a que la época seca es tan intensa y prolongada.

Como resultado, el acceso al agua será limitada para ciertas áreas, particularmente para los ríos que nacen en la sabana. Se hace necesario más rigurosidad en las concesiones de agua, de igual manera, el seguimiento y verificación de las condiciones de las mismas. También es urgente preservar los bosques en la cordillera y en la sabana.

13.2 Modelación del escenario de las aguas subterráneas de Yopal a 2040

En el año 2011 una fuerte temporada de lluvia generó crecientes en los cauces y deslizamientos, dañó la bocatoma y la planta de procesamiento del agua para el consumo de la ciudad de Yopal.

Ante dicha catástrofe la ciudad poco a poco fue proveyéndose de agua subterránea, primero con pozos que construyeron las empresas petroleras, y luego con los adicionales construidos y mantenidos por la ciudad con apoyo del gobierno nacional.

El agua subterránea siempre se vende como la panacea para solucionar la escasez de este líquido, especialmente en ciudades con situaciones casi óptimas para este tipo de aguas como es el caso de Yopal que descansa sobre un gran abanico aluvial depositado por el río Cravo Sur y con una precipitación que sobrepasa los 2.000 mm de lluvia por año, lo que provee una buena recarga de los acuíferos (Figura 68). No obstante, ¡hay un desafío que se torna inmanejable con el tiempo, el costo!

Figura 68

Abanico aluvial de la ciudad de Yopal y pozo de agua subterránea



Los varios pozos subterráneos para proveer de agua a una ciudad como Yopal, requieren: construcción, mantenimiento, bombeo del agua hasta la superficie y del agua hacia la parte alta de la ciudad donde están las plantas de tratamiento, para luego dejarla caer por gravedad a los diferentes barrios de la ciudad. Los costos mencionados anteriormente son muy altos, porque la energía eléctrica en Colombia es muy costosa.

Los costos excesivos han hecho que Yopal esté considerando regresar al antiguo sistema de proveerse de agua superficial. ¿Y por qué no?, si cerca de Yopal bajan varios ríos y arroyos, provenientes de las frías montañas de la cordillera, que pueden proveer de agua a la ciudad. Mientras se da el cambio de la fuente, la ciudad seguirá utilizando las aguas subterráneas.

En los últimos años la ciudad de Yopal ha tenido una de las más grandes tasas de crecimiento poblacional no solamente en Colombia, sino también en Latinoamérica.

Por un lado, debido al boom económico del petróleo y la agroindustria, por el otro, con el modelo perverso empleado por los líderes políticos locales de construir urbanizaciones para ganar votantes. Lo anterior ha llevado a un crecimiento poblacional desmedido, y surgen interrogantes de cómo se sostiene el presente ritmo de incremento demográfico y de consumo de agua: ¿cómo serán las condiciones de recarga y temperatura a 2040? ¿El acuífero de Yopal tendrá capacidad para sostener una demanda superior en 20 años?

Para responder a estas preguntas se comparan las condiciones de Yopal con la modelación adelantada en la ciudad de Santa Cruz (Bolivia) bajo un escenario de cambio climático. Para cuantificar la información en zonas urbanas se utilizó el modelo propuesto por el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) en 2012, así mismo, para proyectar temperatura y precipitación se utilizó el software PRECIS propuesto por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático).

De tal manera que se viera a futuro, se utilizó el Modelo Climático Global ECHAMA del Instituto de investigación Max-Planck de Alemania (Peláez y Pasig, 2018). Se trata de integrar tres aspectos actuales como: agua, cambio climático y escenarios futuros. En la actualidad, la ciudad de Yopal tiene 170.000 habitantes con un consumo aproximado de 150 litros/habitante/día con una cobertura del 90 % y que depende en un 100 % de agua subterránea. La cantidad de recarga en el acuífero está condicionada por la infiltración profunda, y esta depende del tipo de cobertera de la superficie.

En el año 2012, la Oficina Ambiental de Estados Unidos (EPA), examinó la infiltración de aguas pluviales desde diferentes densidades de superficie impermeable, proponiendo un modelo de influencia de la urbanización en el ciclo hidrológico, el cual será aplicado en el presente trabajo como herramienta de evaluación para estimación de la infiltración de recarga al acuífero.

La ciudad de Yopal se encuentra cubierta por las gravas del abanico aluvial depositado por el río Cravo Sur, sobre el que se ha construido la ciudad, lo que facilita la infiltración para la recarga del acuífero y al mismo tiempo permite el paso de contaminantes; por lo tanto, corresponde efectuar medidas de protección de recurso hídrico.

Los actuales 170.000 habitantes de la ciudad a 2020, para 2040 se proyectan en 267.000, los que a futuro demandarán mayor cantidad de agua, especialmente agua potable. En la actualidad, el consumo de Yopal es de 260 litros/segundo, con el incremento poblacional del 2,3 %, a 2040, el consumo podría alcanzar los 410 litros/segundo (Tabla 6).

Tabla 6

Proyección del aumento del consumo de agua subterránea en Yopal 2020 a 2040

Año	Población	Consumo de agua (litros/segundo)
2020	170.000	260
2025	190.470	291
2030	213.405	326
2035	239.102	365
2040	267.893	410

En todo municipio se proveen pérdidas físicas que corresponden al deterioro de la infraestructura (fisuras, roturas y filtraciones) de las redes de agua potable que pueden constituir en aporte indirecto a la recarga del acuífero. Para la ciudad capital se proyecta un desarrollo económico local altamente heterogéneo y un incremento de industria con poca implementación de medidas ecológicas y sostenibles, lo que sugiere un aumento de los GEI que generan el cambio climático.

Para la proyección de precipitación y temperatura se analizó datos obtenidos del servicio nacional de meteorología e hidrología, desde 1990 a 2015 en 60 estaciones meteorológicas que están distribuidas en Yopal y sus alrededores, los resultados fueron los siguientes:

1) Variaciones de temperatura. Hacia futuro se identificó un incremento de temperatura entre 0,5 °C a 2 °C dependiendo de las características de cada lugar respectivamente. Para proyecciones a 2040 se calculó con el sistema de modelamiento global ECHAM4 del Instituto Max-Planck de Alemania y para la diferencia de cambios de temperatura se utilizó sistema climático territorial PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies) aplicando datos de WordClim.

Como resultado, se identificaron los cambios de temperatura en época de húmeda (abril a diciembre) aumentará entre 0,96 °C y 1,93 °C y época seca (diciembre a marzo) se evidencia un mayor aumento de temperatura entre 1,10 °C y 1,84 °C.

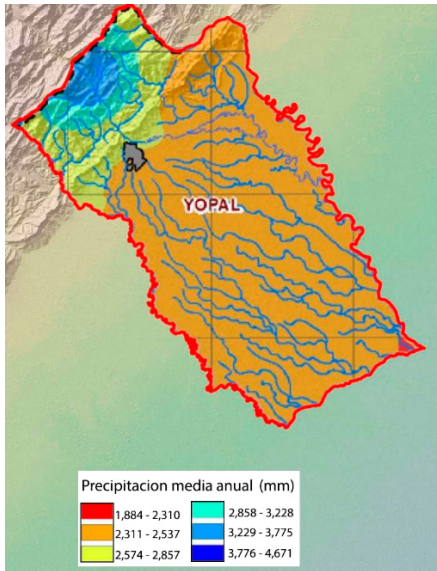
También se tuvo en cuenta las variaciones de temperatura y precipitación a 2040 planteadas por el CIAT donde los cambios de temperatura son de +1,5 °C, mientras que los cambios de precipitación son mínimos, pero con sequías más frecuentes al igual que los eventos lluviosos (CIAT et al., 2017).

2) Variaciones de precipitación. Se estima que, en la época seca, que va de diciembre a marzo, se tendrá un descenso en la precipitación; y en la época húmeda (noviembre a marzo), habrá un incremento de la misma. Los datos históricos de estaciones meteorológicas utilizadas fueron ajustados con el modelo climático regional PRECIS.

Los cambios más radicales se prevén hacia la zona de la sabana, donde la precipitación en época seca (diciembre a marzo) al 2040 disminuirá 15%, y en época húmeda (noviembre a marzo) incrementará al +10 % (Peláez y Pasig, 2018). A pesar de los cambios estacionales, parece que los valores netos de precipitación cercanos a los 2500 mm/año en la ciudad de Yopal se mantendrán sin mayores cambios (Figura 69).

Figura 69

Precipitación media anual en Yopal



Nota. SGC (2018)

3) Superficies de infiltración en el área de recarga de los acuíferos.

Un porcentaje del agua que entra en contacto con el suelo se evapora nuevamente a la atmósfera, el otro se desplaza sobre la superficie dependiendo de la cobertura, y otro se infiltra en el subsuelo. El Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) en 2012, identificó cuatro escenarios a futuro con distintas características de escurrimiento, evapotranspiración, infiltración profunda e infiltración superficial (Peláez y Pasig, 2018), así:

- Cobertura vegetal: no existe influencia humana, ni cobertura impermeable.
- Superficie impermeable de 10–20%: poca presencia humana, 1 casa por 0,40 ha.
- Superficie impermeable de 35-50%: presencia humana, 4 casas por 0,04 ha.

-
- Superficie impermeable de 75-100%: urbanizado, 8 casas por 0,04 ha.

De los estudios del MIT se concluye que a menor cobertura vegetal y mayor impermeabilización del suelo por las construcciones y carreteras, la infiltración del agua o recarga de los acuíferos de los que se provee el agua de la ciudad disminuye.

4) Volumen de infiltración. Una vez calculado los componentes hidrológicos para la superficie periférica (rural) y superficie metropolitana (urbana), se estima el volumen de infiltración superficial y profunda, el cual será el aporte de recarga al acuífero (Tabla 7).

En la superficie periférica (rural) se prevé que la infiltración superficial y profunda disminuirá hasta 2040 como resultado de la baja extensión por hectáreas y el cambio de uso de suelo que será afectado por la impermeabilización producto de las construcciones con poca o nula zona verde.

Sumando los valores de infiltración profunda en la superficie periférica (rural) y metropolitana (urbana) se tiene como resultado una baja en el volumen total de infiltración profunda a consecuencia del cambio del uso de la cobertura y del suelo afectando la recarga del acuífero.

5) Balance hídrico estimado de agua subterránea. En la Tabla 7, se calculan las entradas y salidas de agua. Las entradas corresponden a la precipitación, las salidas a la evapotranspiración, la escorrentía y la infiltración; en este caso hay que considerar las pérdidas de la red (que se incrementan con el tiempo) y el bombeo de los pozos.

Para el caso de Yopal el agua subterránea disponible anualmente debe ser igual a la infiltración por el área del municipio (urbana + rural adyacente o periférica); es decir que, si el bombeo excede a la recarga, bajan los niveles de los acuíferos y se puede producir subsidencia.

Tabla 7

Balance hídrico de agua subterránea en Yopal en milímetros/año

Precipitación (mm/año)	2500
Evapotranspiración (mm/año)	1736
Esorrentía (mm/año)	564
Infiltración (mm/año)	200
Pérdidas de la red (mm/año)	20 %

Nota. SGC (2018)

Como resultado del balance se estima que la recarga del acuífero no disminuirá por la disminución de la precipitación, sino por la disminución de la infiltración debido al aumento de las construcciones y la infraestructura; la cual podría ser del 25 %, que es consecuencia a su vez, de la baja de la infiltración de la precipitación en el escenario de cambio climático.

Por otro lado, habrá un incremento de aportes de los ductos de agua potable (por fugas) y del sistema de alcantarillado. Así también, habrá un incremento de explotación del recurso hídrico subterráneo para consumo humano.

Conclusiones. De acuerdo con el aumento poblacional y la velocidad de expansión de la superficie construida, se espera que la superficie urbana de Yopal crezca en más del 50% en el 2040. La disminución de la recarga se deberá no tanto al decrecimiento de la precipitación, sino al aumento de la cobertura por infraestructura y la consecuente impermeabilización de la misma.

Con el incremento del número de habitantes se espera un alza en los requerimientos de agua y, por lo tanto, en la utilización de los acuíferos del subsuelo con un posible descenso de la saturación de los pozos de agua.

El descenso de la recarga también se verá perjudicada por el cambio en la temporalidad de la distribución de la precipitación y temperatura que inciden en la escorrentía que está relacionada con el cambio del uso del suelo; lo que significa que, si las condiciones actuales se mantienen, los bosques disminuirán hacia la parte elevada de la cuenca del río Cravo Sur (ver numeral 7.2).

A pesar de los desafíos, los cálculos indican que a 2040 el acuífero de Yopal aún podría proveer de agua al número de habitantes que se esperan para entonces, debido a la buena recarga directa por infiltración y a la infiltración proveniente del río; en últimas, los requerimientos de agua dependerán de las transformaciones socioeconómicas y de la infraestructura de los sistemas hidráulicos.

14. DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES

Como ya se ha ilustrado suficientemente a lo largo de este libro, definitivamente, la Orinoquía es tan grande que concentra alrededor del 25% de América del Sur y está alimentada por cientos de ríos, miles de arroyos, caños y quebradas. Es así que, es considerada como un lugar mágico que contiene riqueza, belleza, biodiversidad y ha sido catalogada como la región del futuro porque produce gran parte de los hidrocarburos, cereales, palma y carne que Colombia necesita.

La diversidad de paisajes y de ecosistemas se encuentra directamente relacionada con el encuentro de tres grandes formaciones geológicas, biológicas y ecosistémicas: la Cordillera de los Andes, los llanos o mega cuenca de sedimentación y el Escudo Guayanés o raíz del subcontinente sudamericano. Su belleza, su exuberante vegetación con múltiples tonos de verde y su exótica fauna están relacionadas con la abundante lluvia y variadas subregiones de esta inmensa cuenca de cerca de un millón de km², con altitudes entre los 5.000 m.s.n.m. del Nevado del Cocuy hasta las llanuras inundables a 50 m.s.n.m.

Sin embargo, toda esa belleza y riqueza se encuentra amenazada por las acciones antrópicas relacionadas con el incremento de la población, la ganadería, la agricultura intensiva, la explotación de recursos minero-energéticos, y, recientemente, por el cambio climático. Desde esa perspectiva, y a la luz de los capítulos anteriores, a continuación, se analizan los desafíos y oportunidades que enfrenta y que enfrentará la Orinoquía en los años venideros.

14.1 Desafíos

En la actualidad, la Orinoquía, desde los páramos hasta la llanura, experimenta grandes transformaciones económicas y culturales; por ejemplo: la explotación de hidrocarburos, la siembra de arroz, los cultivos de palma de aceite, plátano, frutas, etc., el crecimiento de la ganadería y la construcción de infraestructura vial.

Los grandes cultivos de arroz, palma africana para aceite, otros cereales y frutas están extendiéndose por la sabana, transformando el paisaje, afectando los cursos de agua y la fauna existente. La ganadería ha crecido significativamente y aunque se cree típica de la región, no siempre ha sido así; al respecto, el IGAC ha demostrado que no todos los suelos de esta área tienen vocación ganadera y que se deben considerar otras posibilidades frente al modelo ganadero actual. Las explotaciones de hidrocarburos se han disparado en los últimos años con intensas actividades de exploración (sísmica) y explotación que incluye perforaciones e infraestructura, especialmente enfocadas en la construcción de carreteras.

El efecto de la sísmica sobre los acuíferos superficiales puede ser considerable, las perforaciones pueden poner en contacto diferentes acuíferos y pueden contaminar las aguas subterráneas y superficiales por los químicos utilizados en los lodos de las perforaciones, así también, las carreteras y los terraplenes pueden romper el ciclo natural de las aguas. En algunos casos el alcance de los monocultivos ha estado dinamizado con el avance de las carreteras vinculadas con la exploración de hidrocarburos (Capítulo 10).

Particularmente, el clima de esta región es considerado como una ventaja porque se ubica en la zona ecuatorial, de allí, por la directa exposición de los rayos del sol, el cual se calienta más, ocasionando que las masas de aire asciendan formando nubes y, luego lluvia. Aunque es una lluvia abundante que en la mayoría de los casos sobrepasa los 2.000 mm/año, la cuenca del Orinoco tiene un régimen monomodal con una época de lluvias entre junio y septiembre, así como una época seca entre diciembre y marzo.

Conforme a lo expuesto, una época seca, en una sabana neotropical, es un período del año en el que la evaporación de agua del suelo o de las plantas es más alta que la cuantía de agua que logra infiltrarse en la tierra, y hace que periódicamente se presente sequías y algunos sectores se tornen semidesérticos.

Hacia la parte alta de la región, los páramos asociados con la Cordillera de los Andes deben ser preservados no solo porque son como grandes esponjas que almacenan gran cantidad de agua que después baja a la cuenca de la Orinoquía, sino también, porque a causa del frío, los procesos de descomposición son lentos, así que son buenos retenedores de carbono, esencialmente en los suelos negros típicos de páramo.

Los páramos están asociados al bosque alto andino o bosques de niebla que también son buenos retenedores de agua. Debajo de los páramos se encuentran las selvas o bosques andinos con diversos climas y biodiversidad. Varios bosques han sido talados para formar potreros y es necesario preservarlos como reguladores de agua, controladores de erosión y hábitat de biodiversidad.

Los bosques húmedos del piedemonte ofrecen frutos y agua durante la época seca de los llanos. Gracias a esa abundante agua, el piedemonte se mantiene fértil y húmedo; por esa abundancia de humedad, la diversidad de plantas y animales es mayor que la de los bosques que se adentran en la sabana acompañando los lechos de ríos pequeños y quebradas. Los espesos bosques del piedemonte se extienden hacia la planicie de los llanos y las vegas de los grandes ríos, dichos bosques fueron extensos en el pasado y deben restaurarse.

Los bosques de la sabana se dividen en: 1) bosques de vega que son zonas cultivables adyacentes a los grandes ríos y utilizados como zonas de cultivo temporal por sus suelos fértiles, que se desarrollan sobre llanuras de inundación en los valles aluviales de los ríos provenientes de los Andes. 2) bosques o montes de galería que crecen en las orillas de ríos, arroyos y caños que nacen en las llanuras y se diferencian en dos tipos: bosques de galería inundables y de galería no inundables.

Los paisajes ribereños son algunos de los más transformados, pues son zonas predilectas para asentamientos humanos, en algunos casos en zonas inapropiadas por riesgos de inundación, con el fin de constituir puertos para mover el comercio.

La ocupación de los cauces a menudo da como resultado deforestación, lo que incrementa la inestabilidad del cauce; además, amplía la evaporación a lo largo del río y causa contaminación por la desaparición de la función filtradora que las franjas de bosque ejercen en la escorrentía de las sabanas.

Según la Contraloría, la vulnerabilidad de la Orinoquía quedó demostrada durante la sequía de 2013-2014. La sumatoria del incremento de la ganadería más los intensos cultivos de arroz en la parte norte de Casanare, causaron grandes modificaciones en los humedales al afectar la cubierta vegetal y el sistema de drenaje de acuerdo con las necesidades agroindustriales, dichas prácticas también afectaron la flora y fauna local; por consiguiente, el uso del agua fue excesivo, lo que conllevó a que la recarga de los acuíferos freáticos disminuyeran sus niveles.

Por otro lado, otra acción antrópica que afectó drenajes naturales de la zona fue la técnica de construcción de carreteras que consiste en prestar materiales de los lados de la vía para elevar el terraplén sin dejar conexiones entre los humedales. Según los previos antecedentes, las alertas tempranas del IDEAM no fueron tenidas en cuenta y la carga ambiental de las actividades agropecuarias, de infraestructura y de exploración de hidrocarburos, continuaron a ritmo acelerado hasta que se produjo el colapso (Figura 70). Además otras quejas previas tampoco fueron atendidas.

Es así que, las intensas actividades relacionadas con la prospección y explotación de petróleo y gas, especialmente, las actividades relacionadas con la sísmica; llevó a la Contraloría a concluir que la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), no siguió sus propios

manuales que rigen la exploración (Contraloría General de la República, 2014).

Figura 70

Resultados de la sequía del Casanare, 2013-2014



Nota. Contraloría General de la República (2014)

La controversia que se desató sobre la sequía del Casanare demuestra que hay un claro desconocimiento de las características ecológicas de la zona y que se requieren más estudios sobre las dinámicas presentes para determinar su capacidad de carga, y que en los desarrollos de infraestructura se debe considerar las dinámicas hidráulicas de las zonas.

14.2 Oportunidades

El carácter generalmente plano de la Orinoquía, en especial, en las sabanas adyacentes a los ríos Meta, Arauca, Vichada permiten los cultivos agroindustriales y extensivos de palma africana, arroz, maíz, plátano, yuca, soya, sorgo, bosques y frutas; igualmente, el desarrollo de extensos hatos ganaderos. El crecimiento de la agroindustria ha sido tal que se prevé que la región se convertirá en la despensa de Colombia (Figura 71).

Figura 71

Ampliación de la frontera agropecuaria en la Orinoquía



Además de su geografía, principalmente plana, el más importante activo de la región es la abundancia de agua producto de las intensas precipitaciones que, ayudadas por la imponente ubicación de la Cordillera Oriental, que actúa como una barrera natural de las masas de nubes repletas de agua (ríos de la atmósfera) provenientes del océano Atlántico y de la Amazonía y de agua evaporadas en los Llanos.

Dichas aguas son forzadas por los vientos alisios, chocan en las altas montañas, se precipitan y vuelven desde allí a las planicies por ríos andinos que terminan inundando las sabanas y convirtiéndose en los grandes aportantes de los ríos Meta y Orinoco, así como de sus numerosos afluentes (Figura 72).

Por la falta de vías de acceso, el turismo no ha sido una de las fortalezas de la Orinoquía, no obstante, con el desarrollo ha venido el mejoramiento de las vías y con esto la oportunidad de visitar muchos de los sitios exóticos y de descanso en la extensa región, con diversos planes ofrecidos por las agencias de turismo.

Además, no solo el turismo tradicional, sino también el asociado con reservas naturales gracias a los hatos ganaderos ofrecen

posibilidades de conocer la sabana y de ser parte de los trabajos del llano de manera natural, lo que permite un encuentro personal con la cultura llanera en un entorno nativo.

El doble aspecto de producción-conservación de algunas fincas ganaderas son ejemplos auténticos de relación positiva entre el paisaje y la ganadería. La biodiversidad, extensión y belleza de la Orinoquía también se pueden apreciar en cualquier recorrido por carretera, en los hermosos atardeceres, en las llanuras interminables, en el avistamiento de muchas aves, chigüiros y demás fauna exótica, es algo que los colombianos apenas comienzan a descubrir (*Ver Anexo: Las maravillas de la Orinoquía*).

Figura 72

...aguas que lloviendo vienen...aguas que lloviendo van...en la Orinoquía



Por su abundante agua, esta región es catalogada como una de las zonas silvestres con más humedales en el mundo; además, por los ecosistemas variados gracias a los diferentes pisos térmicos, la Orinoquía es reconocida como un área estratégica para la humanidad gracias a su biodiversidad, es decir, la variedad de ecosistemas naturales y transformados, con diferentes especies de flora, fauna y microorganismos, así como la variedad genética y cultural de la región.

14.3 Análisis final

En esta reciente avalancha de progreso, los Llanos Orientales, con sus particularidades únicas, se están viendo afectados. La destrucción de los ecosistemas naturales como la tala de bosques, el incremento de la temperatura y las distorsiones climáticas extremas, los cultivos industriales y el crecimiento de la producción agropecuaria con distritos de riego sin regulación, las diferentes actividades con la extracción de hidrocarburos y la intervención artificial del sistema hidrológico por las obras de infraestructura, exigen precaución, ya que pueden generar efectos inesperados.

Por lo tanto, es apremiante preservar la conservación de la estructura ecológica principal, refinar el conocimiento sobre el impacto de las diferentes actividades sobre la interacción ambiental y decidir por las mejores opciones basadas en el conocimiento previo. Por ejemplo, grandes extensiones de arrozales pueden tener impactos negativos al sustituir bosques de galerías, morichales e incluso humedales silvestres.

A pesar de lo que se dice de la pobreza de los suelos de las sabanas de la Orinoquía, estos tienen características físicas positivas para un buen desarrollo vegetal (en el caso de los llanos inundables y los terrenos de piedemonte), en las altillanuras disectadas los suelos tienen menor capacidad de almacenamiento de agua, condición que los hace susceptibles a la erosión causada por la escorrentía y la acción del viento.

La mayoría de la llanura inundable presenta vocación ganadera, mientras que la altillanura al sur del río Meta presenta una variedad de zonas con vocación de preservación, forestal y agroforestal. Igualmente, se han identificado destacadas zonas de disposición agrícola en el piedemonte del departamento del Meta y la región del Ariari.

En el análisis de las aguas subterráneas se concluye que los acuíferos presentes en la zona cambian vertical y lateralmente por

tratarse de cuaternarios de extensión limitadas, aunque también se incorporan algunos acuíferos confinados más regionales en la formación Guayabo (Caja).

En la mayoría de fincas y proyectos, estos abastecen a la escasa población, pero que, en temporada de sequía, se deben considerar pozos de mayores profundidades en acuíferos de la Formación Guayabo (Caja) que no se encuentran tan afectados superficialmente por la evapotranspiración y la descarga lateral, como sí lo están los acuíferos libres de los depósitos cuaternarios (Capítulo 6).

Es evidente que se requieren más estudios y estaciones de monitoreo de las aguas superficiales (caudales en los ríos) y piezómetros (pozos) de observación para las aguas subterráneas. En la agricultura extensiva, que seguramente seguirá siendo, la actividad que más requiere de agua; si se suma toda la actividad agropecuaria, la demanda hídrica estaría cerca del 60 % (Tabla 8). En el caso de los monocultivos, los dos principales desafíos podrían estar relacionados con la reducción del agua de los caños, ríos y acuíferos libres y confinados, por su utilización intensiva y la degradación de dichas aguas por residuos de agroquímicos, plantas agroindustriales y aguas servidas urbanas.

Además, si a lo anterior se le suma el cambio climático, en un sistema frágil como la Orinoquía, tendríamos cambios en los patrones ambientales, aumentos de temperatura y menos agua en la estación seca con consecuencias propias de sequías y regiones semiáridas, que afectarían las actividades agropecuarias en porcentajes significativos.

Por lo tanto, se requieren que los cultivos, sigan la vocación de los suelos de acuerdo con los POT (Planes de Ordenamiento Territorial), que se controlen las concesiones de agua, que los químicos utilizados en la agroindustria sean dosificados y monitoreados, también es vital que se proyecte la utilización de variedades

de cultivos resistentes a las nuevas temperaturas y con menos utilización del agua como el arroz seco que crece solo con el agua de lluvia sin la ayuda de riego artificial.

Tabla 8

Repartición de los requerimientos hídricos por sectores de consumo y por regiones

	Caribe	Magdalena Cauca	Orinoco	Amazonas	Pacífico
Agricultura	52.28%	42.51%	34.77%	11.99%	57.00%
Pecuario	5.75%	8.25%	10.30%	27.71%	4.01%
Piscícola	5.48%	7.76%	13.35%	17.00%	3.54%
Industria	1.69%	3.24%	2.73%	2.03%	1.23%
Construcción	0.43%	1.36%	1.27%	0.02%	0.05%
Minería	1.76%	1.70%	0.08%	0.19%	11.10%
Hidrocarburos	0.05%	0.47%	8.93%	8.25%	0.00%
Energía	24.75%	25.43%	22.93%	0.00%	10.68%
Doméstico	7.07%	7.56%	4.20%	29.65%	11.58%
Servicios	0.75%	1.72%	1.43%	3.16%	0.80%
	100%	100%	100%	100%	100%

Nota. IDEAM (2019)

Al ser la Orinoquía principalmente plana y con pastos, se asume que su vocación es ganadera; sin embargo, recientes estudios adelantados por el IGAC (2016) indican que no todas las tierras tienen esa constitución y que solo el 16 % de las tierras de esta región posee suelos capaces para aguantar la concurrencia del ganado.

El mayor potencial está en Casanare y Arauca con un poco más del 50 % de su área, mientras que Meta y Vichada tiene más capacidad agrícola y de conservación ambiental. Alrededor del 20% de la

Orinoquía tiene vocación para desarrollos agrícolas y forestales, es decir que, en muchas zonas se pueden desarrollar otras actividades con menor impacto ambiental como la silvicultura (bosques).

Los tres estudios multitemporales presentados en este libro (Capítulo 7) muestran cómo a lo largo de la región se ha evidenciado la pérdida de las zonas boscosas, afectando la conservación del agua, la biodiversidad y el cauce de los ríos (Figura 73).

Figura 73

Densidad baja de los bosques en la Orinoquía



El énfasis debe ser en preservar y recuperar lo estratégico que se ha perdido, como resultado, ciertos espacios naturales del piedemonte se deben rescatar, porque esta zona de transición es muy importante para el flujo del agua en la sabana.

En esta zona también se hace necesario aumentar la cobertura vegetal, no solamente en las sabanas abiertas, sino también, en los bosques de galería. En adición, se deben considerar actividades silvopastoriles con aumento de la densidad de los árboles en los potreros.

Las sabanas inundables han disminuido por drenaje y otras actividades antrópicas; por lo tanto, los esteros y demás humedales se deben preservar por ser retenedores de agua y por favorecer la recarga de los acuíferos. Asimismo, muchos herbazales abiertos se

han tornado arenosos por la remoción de la cubierta vegetal, esto es preocupante por el posible afloramiento y crecimiento de las dunas eólicas (médanos) que subyacen en gran parte de las sabanas bajas y que podrían generar fenómenos de desertificación (Figura 39).

En zonas con excesiva actividad antrópica o sobrepastoreo se deben considerar actividades de adaptación y rehabilitación de los suelos con pastos de raíces más profundas que retengan el carbono como el *Brachiaria Urochloa Humidicola*.

Como lo concluyeron los estudios del IGAC, no todos los suelos de la Orinoquía son aptos para actividades agropecuarias; de hecho, algunos tienen una prevalencia arenosa como los suelos de origen eólico del NE de Casanare; por lo tanto, antes de emprender un nuevo proyecto, se debe consultar con los expertos sobre la vocación del suelo para asegurar la continuidad temporal de los proyectos (IGAC, 2016).

La ganadería extensiva está cambiando y se deben considerar diferentes opciones como: desarrollar pasturas para suelos ácidos y baja capa orgánica, ganadería a gran escala que sea competitiva a escala global con el correspondiente incremento en la utilización del agua; por ejemplo, la ganadería europeo-americana basada en concentrados de cereales como soya y maíz.

Aunque tal vez no se tenga que emplear cereales todo el tiempo para alimentar el ganado, se debe considerar la opción de utilizar suplemento alimenticio para las épocas de sequía y evitar la pérdida de peso. De igual manera se debe tener en cuenta el aumento de la densidad de los bosques en las zonas ganaderas como una forma de regular el clima y preservar el agua y la fauna.

Los bosques no muy densos serían una manera de compensar las emisiones de gas metano generadas por las vacas. No obstante, ya es tiempo de considerar una legislación sobre las excretas del

ganado. Lo anteriormente listado, hace parte de la mejor vocación de las tierras y esta en concordancia con los POT (Planes de Ordenamiento Territorial) (ver Capítulo 9).

En cuanto a la minería, particularmente, desde la prospección y explotación de petróleo y gas, es necesario hacer una evaluación real a las medidas ambientales, mediante un seguimiento metódico de la intensidad de contaminación del agua de uso diario (ríos, caños, pozos y aljibes) de las comunidades que residen en áreas cercanas a actividades de extracción de hidrocarburos.

Adicionalmente, es necesario adelantar estudios ambientales que permitan investigar la evolución de la concentración en el tiempo y, en esta forma, revelar las fluctuaciones relacionadas con escapes puntuales y variaciones cíclicas estacionales. Las cargas ambientales de los hidrocarburos se deben contabilizar con otras cargas de cultivos y otras actividades, de tal manera que, no se produzca un colapso ambiental como se produjo en Casanare en el verano de 2013-2014.

Es vital que no se repita la crisis presentada en el Casanare, donde de acuerdo con la Contraloría, no solo fue producto del calentamiento global, sino también a la adición incontrolada de actividades como los cultivos de arroz, el incremento de la ganadería, los terraplenes de las vías, y la exploración de petróleo, especialmente la sísmica. Lo anterior se sumó de manera sinérgica y traspasó el equilibrio del ecosistema (Contraloría General de la República, 2014).

El desarrollo debe ser integrado y que evite sobrecargar el medio natural. Según lo mencionado solo será posible si se hace un trabajo conjunto y sinérgico entre políticos, empresarios y ambientalistas con una visión de futuro. No hay que olvidar que gran parte de la Orinoquía, como lo es la sabana inundable, se encuentra entre los ecosistemas más amenazados de Colombia (Figura 74).

Figura 74

Ecosistemas colombianos que están más bajo amenaza



Nota. Etter et al. (2017)

En la región de la Orinoquía se ha estado presenciando una lucha colosal entre la biodiversidad, la conservación y el desarrollo agroindustrial con resultados que ya son evidentes al estar perdiéndose la práctica agropecuaria tradicional, la cual está siendo reemplazada por monocultivos y campos petrolíferos. Frente a esto, es urgente tomar medidas para evitar problemas asociados con el manejo de residuos, tala de bosques para la agricultura y ganadería, desestabilización de las vertientes por obras de infraestructura relacionadas con los campos petroleros.

Las largas y prolongadas sequías que se están dando y la disminución del volumen de agua de los ríos son un indicador de que es necesario tomar decisiones que incluyan la conservación de ecosistemas con corredores ecológicos que los conecten. Sin embargo, no es un requisito indispensable que haya investigación convencional involucrada, ya que muchas iniciativas pueden ser autogestión ecológica de las comunidades locales, tal como se están gestionando las áreas protegidas por la sociedad civil que han demostrado que, en ocasiones, la mejor recuperación de la sabana es dejar que ella misma lo haga por sí sola (Capítulo 11).

Aunque gran parte del suelo de la Orinoquía tiene vocación económica, un buen porcentaje de la llanura (34,7 %) son ecosistemas estratégicos que deben ser conservados y privilegiados por ser entornos de suma importancia ambiental, estos son: ríos, caños, ciénagas, pantanos, lagunas, lagos y humedales en general. El 32,8 % restante, está constituido por parques nacionales, reservas naturales ambientales, algunas reservas de la sociedad civil y resguardos indígenas.

La cuenca del Orinoco depende de la Cordillera Oriental y de las fuentes de humedad del océano Atlántico y la Amazonía, los cuales contribuyen con el clima y con los ciclos hidrogeológicos. La disponibilidad de agua es distinta en las diferentes zonas de la región causado por la influencia de diversos elementos geológicos, geográficos y climáticos, como el régimen de lluvias, entre otros.

A las sumas y restas de agua en un sistema, natural o no, se le llama balance hídrico, que es la adición de las aguas que ingresan y salen, y de las aguas que se quedan. Cuando ese balance es positivo, puede haber inundaciones; cuando ese balance es negativo, puede haber sequías (Capítulo 4). Con las precipitaciones más acentuadas en períodos cortos o con mayor intensidad, se tendrán mayores inundaciones y deslizamientos; por lo tanto, las obras de ingeniería requerirán mejores diseños. Con más CO₂ en la atmósfera y con inviernos más intensos, crece más la vegetación, que en el siguiente verano intenso se puede convertir en más combustible para los incendios.

Ninguna de las propuestas relacionadas a lo largo de este libro y en los demás estudios citados en la bibliografía, se puede alcanzar, si los habitantes de la Orinoquía no lo tienen claro, particularmente, los funcionarios adscritos a las instituciones públicas y privadas; por lo tanto, se deben tener campañas y programas educativos de capacitación, concienciación e implementación; de tal manera que, todos los miembros de la comunidad comprendan que son parte

de la solución y que desde todos los escenarios, hay que hacer ajustes, como: de transporte individual por urbano o en bicicleta, de vehículo por uno con menores emisiones, de repotenciación de los motores o métodos empleados por la industria, de sistemas de cultivo, sembrando más árboles, etc.

El gran ecosistema de la Orinoquía es complejo y cambiante, y puede comprenderse a través de la acción e interacción de enormes unidades funcionales, en las que se entrelazan o integran una sumatoria de unidades ecológicas que le dan al llano su carácter especial. Para detectar mejor los posibles desafíos, se puede alejar o acercar el lente del observador tanto como se quiera de acuerdo con la escala de la investigación.

En este sentido, se requiere comprender ese funcionamiento, mediante la observación y la investigación, hecha profundamente, es decir, a nivel superior identificar y prever cuál es la sumatoria de las actividades antrópicas y el cambio climático (Instituto von Humboldt, 2018).

Dado que los gases de efecto invernadero son los principales causantes del incremento de la temperatura, es necesario que como país nos mantengamos fieles a los compromisos hechos ante la comunidad internacional de reducir las emisiones de GEI a la mitad para 2030 y ser neutros en la difusión de carbono para 2050, es decir que, no superen la capacidad del planeta de absorber las emisiones de CO₂.

La Contribución Nacional de Colombia (NDC) debe acelerarse en la transición energética a energías renovables, movilidad limpia, disminución de la deforestación, pagos por servicios ambientales; así también, es vital conservar nuestros sistemas estratégicos como los páramos, la Amazonía y la Orinoquía. Los procesos de mitigación y adaptación deben hacerse de manera planeada y ordenada, sin colapsar la actividad económica, porque el costo socioeconómico del alarmismo ambiental podría ser muy alto.

Los ecosistemas están en permanente cambio porque los factores, las relaciones y sus componentes también varían. Por ejemplo, la transformación climática es un constituyente que dinamiza la evolución, y así ha sido siempre, solo que ahora se ha descubierto que algunas actividades humanas lo aceleran fuertemente, lo que está ocasionando muchos perjuicios, sobre todo, a las mismas comunidades humanas.

Aunque el cambio climático no se puede evitar, sí es posible mitigarlo, ya que a medida que los impactos estacionales se hacen más extremos, nuestra resiliencia y capacidad de adaptación debe mejorar. De esta manera, es factible alcanzar el desarrollo sin alterar los ciclos naturales y es viable producir conservando y conservar produciendo (Savory Institute, 2021).

La resiliencia mencionada definida como nuestra capacidad para recuperarnos de la adversidad y de los desafíos, se debe comprender e incorporar a nuestras vidas. Al respecto, el CIAT (2014) describe resiliencia como “La capacidad de un individuo, comunidad, ecosistema o territorio para tolerar o absorber una perturbación sin que se alteren de forma significativa su estructura o funcionalidad”.

La mayoría de personas preocupadas por el estado del planeta, piensan que el clima va a cambiar, no obstante, el planeta ya se transformó y los fenómenos meteorológicos se están intensificando. Aunque la Orinoquía tenga muchos privilegios geográficos y climatológicos, las repercusiones del cambio climático ya son visibles y lo harán más frecuentemente en dos frentes: la falta de agua (por el incremento de las sequías y las oleadas de calor), y el exceso de la misma (fuertes precipitaciones que causan inundaciones y deslizamientos). Las olas de calor, propias del llano, podrían ser más largas, más intensas y más frecuentes.

Se estima que, en los siguientes años, el acrecentamiento de la temperatura será exacerbado por: las emisiones de GEI como el CO₂ y el metano, el incremento poblacional, el aumento del consumo, y por las otras variables que acompañan a estos dos últimos.

Adicionalmente, el clima se está tornando impredecible, lo que afectará muchas actividades, esencialmente la agricultura, que se tornará más difícil y más costosa, ya que será más difícil determinar cuándo es la temporada de lluvia y, por lo tanto, el tiempo de siembra. Como resultado de todos esos desajustes, otras grandes tragedias se podrían disparar: la inflación y los refugiados climáticos.

***.....¡Aguas que lloviendo vienen,
aguas que lloviendo van!.....***

REFERENCIAS

Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH]. (2012). *Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. Cuenca Llanos Orientales*. Ministerio de Minas. Bogotá. Colombia.

Alcaldía municipal de Paz de Ariporo. (2014). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Paz de Ariporo Casanare 2014-2016*, 148.

Angelone, S., Garibay, M. y Cauhape, M. (2006). *Permeabilidad de Suelos*. Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA]. (2005). *Estudio de Impacto Ambiental Bloque Guachiria Cano Chiquito. Solana Petroleum*. Centro de información de Corporinoquía. Yopal, Colombia.

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA]. (2018). *Metodología General para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales*. Bogotá, D.C. <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/13-res%201107%20de%202019.pdf>

Ardila, W. (2014). *Impactos de la industria petrolera en el medio ambiente – Upstream. Universidad Industrial de Santander*. Facultad de Ingeniería Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de petróleos. Bucaramanga, Colombia.

Avellaneda, J. (2014). Lucha de titanes. En: *Casanare donde se entrelazan dos mundos*. Publicaciones Semana. Bogotá 2014. <https://www.semana.com/este-es-el-casanare-que-usted-no-conoce/409511-3/>

Bachu, S. (2000). Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41(9), 953-970. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00149-1)

Benavides, C. y Caro, L. (2019). *Análisis hidrológico de la cuenca del río Guachiría, Casanare, asociado a parámetros hidráulicos*. Proyecto de pregrado. UPTC-Sogamoso. Ingeniería Geológica, 2019.

Benavides, C. y Caro, L. y Mariño (2021). Determinación del comportamiento hidráulico de los acuíferos del norte de la Orinoquía (Colombia). *Revista Ciencia e investigación Neogranadina*. Vol. 31 (1). Enero-junio 2021. Bogotá. <https://doi.org/10.18359/rcin.4680>

Bennaceur, K., Gupta, N., Monea, M., Ramakrishnan, T., Randen, T., Sakurai, S. y Whittaker, S. (2004). Captación y almacenamiento de CO₂. Una solución al alcance de la mano. *Oilfield Review*, 16(4), 48-65.

Betancur, T. (2008). Una aproximación al conocimiento de un sistema acuífero tropical. Caso de estudio: el bajo cauca antioqueño. Medellín. Tesis (*Doctorado en Ingeniería*). Universidad de Antioquia.

Calvo, Y. (2020). Determinación del origen de la recarga de aguas subterráneas en las sabanas de Casanare, Colombia, utilizando trazadores hidrogeoquímicos e isotópicos de ¹⁸O, ²H, Y ³H. Proyecto de maestría. Maestría en Ciencias de la Tierra, UPTC-Sogamoso.

Cámara, A., Navarrete, B., Candil, R., Vilanova, E., Segarra, J., Morán, S., Zapatero, M., Gómez, M., Peña, F., García, A., Gil, J., Pina, J., Chamberlain, J., Martínez, R., Arenillas, A., Cortina, V., Valle, L., Penelas, G., Menéndez, E., Loredo, J. y Llamas, B. (2010). *Captura y almacenamiento de CO₂*. X Congreso Nacional del Medio Ambiente, CONAMA 10, CIEMAT, Madrid.

CAR (2021) Sexto informe de evaluación sobre el cambio climático. CAR-Corporación Autónoma Regional – Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá. Colombia. <https://www.car.gov.co/uploads/files/61438242e0cc4.pdf>

Casagrande, A., & Fadum, R. E. (1940). *Notes on Soil Testing for Engineering Purposes*. Harvard Soil Mechanics, Series No. 8, Cambridge, Mass.

CIAT, Cormacarena, Corporinoquía y Ecopetrol. (2017). *Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía, Visión Regional*. CIAT-Centro Internacional de Agricultura Tropical, Colombia. https://www.researchgate.net/publication/330881683_Libro_Regional_Plan_Integral_de_Cambio_Climatico_para_la_Orinoquia_PRICCO

Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES 3797]. (2014). Planeación Nacional de Planeación. Ministerio de Ambiente. Por LA ORINOQUÍA — 2010-2014 “*Prosperidad para Todos*”. Bogotá. [https://www.google.com/h?q=conpes+3797+de+2014&oq=COMPES+3797+\(2014\)&aqs=chrome:1.69i57j0i22i30.4893j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/h?q=conpes+3797+de+2014&oq=COMPES+3797+(2014)&aqs=chrome:1.69i57j0i22i30.4893j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)

Consoli, C., Havercroft, I., & Irlan, L. (2017). Carbon capture and storage readiness index: comparative review of global progress towards wide-scale deployment. *Energy Procedia*, 114, 7348-7355. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1585>

Contraloría General de la República. (2014). *Contraloría General de la República encuentra presunta responsabilidad en relación con el desastre ambiental presentado en el municipio de Paz de Ariporo, por parte de las entidades ambientales y territoriales competentes*. Bogotá. Colombia. <https://www.wradio.com.co/docs/20140805b25381ca.pdf>

Cooper, M. A., Addison, F. T., & Álvarez, R. (1995). Basin Development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bulletin*, V. 79, No 10 P. 1421-1443.

Corporinoquía (2010). *Integración de los lineamientos ambientales para la ejecución de programas de prospección sísmica terrestre en la jurisdicción de Corporinoquía. Yopal, Colombia.* <https://www.corporinoquia.gov.co/index.php/normas-sobre-licencias-ambientales-hidrocarburos-y-sismica.html>

Chaparro, H. (2017). *Análisis multitemporal de cambios en la cobertura vegetal de Paz de Ariporo, Casanare mediante el uso de sistemas de información geográfica.* Investigación de pregrado, Ingeniería Geológica. UPTC. Sogamoso.

Chaparro, H. y Mariño, J. y Fonseca, H. (2019). Valores de permeabilidad en sabanas susceptibles a sequía en Paz de Ariporo, Casanare (Colombia). *Revista Orinoquía Ciencia y Sociedad, Vol. III, 2019.* <http://revistaorinoquia.unitropico.edu.co/wp-content/uploads/2019/05/Chaparro.pdf>

Deutsche Welle Radio [DW]. (2021). *La lucha mundial por el agua. Documental.* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=zTiu0Q-quak>

El Espectador (2015). Regalo mortal del ganado: <https://www.elespectador.com/opinion/el-regalo-mortal-del-ganado-columna-572983>

Etter A., Andrade, A., Amaya, P. y Arévalo, P. (2017). *Estado de los ecosistemas colombianos. Una aplicación de la metodología de Lista Roja de Ecosistemas (Vers. 2.0).* file:///C:/Users/Juan%20Carlos/Desktop/BrochureLREColombiav20.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2021). *Apoyo a la implementación de la visión de conservación basada en ecosistemas del Amazonas, para el beneficio de las comunidades locales y la preservación de servicios ecosistémicos en la Región del Amazonas.* <http://www.fao.org/colombia/programas-y-proyectos/lista-de-proyectos/es/>

Higgins, M. (2014). *Conservación y Desarrollo p. 46. En: Casanare donde se entrelazan dos mundos*. Publicaciones Semana. Bogotá 2014. <https://www.semana.com/este-es-el-casanare-que-usted-no-conoce/409511-3/>

Faure, G. (1998). *Principles and applications of geochemistry*. Prentice-Hall Inc. New Jersey, USA. 1998.

Guimarães E. (2014). *Casanare donde se enlazan dos mundos*. Publicaciones Semana. <https://www.semana.com/este-es-el-casanare-que-usted-no-conoce/409511-3/>

Herrera, H., Gutiérrez, G. (2012). Contribuciones de los isótopos estables de ^{18}O y ^2H en el conocimiento del acuífero Morrosquillo, Departamento de Sucre, Colombia. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*. Volumen 8, pp. 39-47, julio 2012.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá, D. C., p. 72.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2019). *Estudio Nacional del Agua*. Estudio Nacional del Agua 2018. <https://www.google.com/h?q=estudio+nacional+del+agua+2020&oq=estudio+nacional+del+agua&aqs=chrome.2.69i57j0l9.16358j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2012). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero*. Bogotá. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023421/cartilla_INGEI.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2016). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero - Colombia: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>

IDEAM (2021). Escenario de cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. Bogotá, Colombia <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/escenarios-cambio-climatico>.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (1993). *Suelos Departamento de Casanare*. Bogotá.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (1999). *Casanare características geográficas*. Editorial IGAC. Bogotá, 360 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2016). *El 15,9% de la Orinoquía tiene suelos aptos para soportar la presencia del ganado*. <https://igac.gov.co/es/noticias/el-159-de-la-orinoquia-tiene-suelos-aptos-para-soportar-la-presencia-del-ganado>

Instituto Geológico Minero de España [IGME]. (2021). *Recarga natural de acuíferos*. <https://www.google.com/h?q=recarga+artificial+de+acuíferos%2C+igme&oq=recarga+artificial+de+acuíferos%2C+igme&aqs=chrome.69i57j13075j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2016). *Ganadería y Sabanas inundables*. Biodiversidad 407. Bogotá, Colombia. <http://repository.humboldt.org.co/>

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2018). *El gran libro de la Orinoquía Colombiana*. Bogotá, Colombia <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/35408>

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (1997). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, París: Intergovernmental Panel on Climate Change; J. T. Houghton, L.G. Meiro Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, eds.; Cambridge University Press, Cambridge, U.K. <https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/mtdocs/pdfiles/tdbusum.pdf>

López, C. (2020). Mapas autoorganizados aplicados al análisis de datos hidrogeoquímicos. Caso de estudio: Paz de Ariporo – Casanare. Proyecto de maestría. Maestría en Ciencias de la Tierra, UPTC-Sogamoso.

Mariño, J., Veloza, J. y Martínez, A. (2017). Analysis of precipitation and recharge of aquifers in Tota and Ibagué (Colombia) from stable isotopes (^{18}O and ^2H), *Rev. Fac. Ing.*, vol. 27 (47), pp. 59-69, Jan. 2017.

Mariño, J. y Chanci, R. (2020). *Gases de efecto invernadero: Propuesta de cálculo del factor de emisiones de gas metano procedente de la extracción del carbón colombiano*. Tunja: Editorial UPTC, p. 82.

Mariño, J. y Moreno, L. (2018). Posibilidades de captura y almacenamiento geológico de CO_2 (CCS) en Colombia – caso Tauramena (Casanare). *Boletín de Geología*, 40(1), 109-122. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018007>

Mesa J. (2014). La palma bajo los rayos X. P. 80. En: *Casanare donde se entrelazan dos mundos*. Publicaciones Semana. Bogotá 2014. <https://www.semana.com/este-es-el-casanare-que-usted-no-conoce/409511-3/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020-2021), Áreas protegidas del SIRAP Orinoquía, <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/sirap-orinoquia/areas-protegidas-del-sirap-orinoquia/>

Moncayo, J. (2017). El territorio como poder y potencia, relatos del piedemonte araucano. Tesis de doctorado. Universidad Javeriana.

Bogotá, Colombia. https://issuu.com/pujaveriana/docs/juan_eduardo_moncayo

Mook, W. (2000). *Abundancia natural de los isótopos radioactivos del c y el h*. Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. https://www.researchgate.net/publication/285844235_Environmental_isotopes_in_the_hydrological_cycle_-_principles_and_applications_International_Hydrological_Programme_IHP-V

National Geographic. (2021). *Carnivore's Dilemma*. *National Geographic Magazine*. <https://www.nationalgeographic.com/foodfeatures/meat/>

Parra C. y Guio P. (2018). *Análisis multitemporal de la carencia de aporte del río Cravo Sur*. *Ingeniería Geológica - Trabajo de campo II*. Biblioteca UPTC - Sogamoso.

Peláez D. y Passig, R. (2018). *Aprovechamiento sostenible de agua subterránea para consumo humano en el área metropolitana de Santa Cruz en un escenario de cambio climático*. Congreso Latinoamericano de hidrogeología. Salta, Argentina.

Rivero J. (1736). *Historia de las misiones de los llanos de Casanare y los ríos Orinoco y Meta*. Silvestre y compañía.

Rodríguez, C. (2004). Línea Meteorica Isotópica de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 8, 43–51. http://www.ebtrf.unal.edu.co/unciencias/data-file/user_23/file/Meteorolog%C3%ADa%20Colombiana%20N%C2%BA%208/8-06.pdf

Rosero D. (2018). *Recuperación de áreas ambientalmente degradadas, mediante el establecimiento de sistemas agroforestales como alternativa al cumplimiento de medidas de compensación en el departamento de Casanare*. Universidad de Manizales. *Tesis de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, Facultad

de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas. Manizales, Colombia.

Rozansky, K. (2002). *Hydrodynamics of lake Tota and their effect on pollution (Col 18/02/02) Task hydrogeological balance of the Tota lake*. August 2002. Department of Technical Corporation, International Atomic Energy Agency.

Sarmiento, L. F., Van Wess, J. D., & Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transitional basin history of Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inference from tectonic models. *South American Earth Sciences*, 21, 383-411. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>

Savory Institute. (2021). *Manual de manejo holístico (suelos)*. <https://savory.global/holistic-management-handbook-now-in-spanish/>

Revista Semana. (2014). *Casanare donde se entrelazan dos mundos*. Bogotá, 2014. <https://www.semana.com/este-es-el-casanare-que-usted-no-conoce/409511-3/>

Semana (2018). Medio ambiente: <https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/es-dejar-de-comer-carne-de-vaca-realmente-una-solucion-para-el-cambio-climatico/42442/>

Revista Semana. (2021). *Alerta en la Amazonía: más del 60% de la selva está bajo amenaza*. Bogotá. <https://www.semana.com/sostenibilidad/articulo/mas-del-60-de-la-amazonia-esta-bajo-algun-tipo-de-amenaza/202157/>

SENA (1990). Control de la calidad del agua. https://repositorio.sena.edu.co/sitios/calidad_del_agua/#

Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2012). *Memoria Geológica de La Plancha 196 Río Guachiría*.

Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2015). *Memoria de la plancha de Paz de Ariporo*.

Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2018). *Modelo hidrogeológico conceptual del municipio de Yopal departamento de Casanare, versión 1.0*. Grupo de Exploración de Aguas Subterráneas. Bogotá.

Terzaghi, K. y Peck, R. (1973). *Mecánica de suelos en la Ingeniería práctica*. 2ª Edición. Librería El Ateneo Editorial, Barcelona.

United Nations [UN]. (2015). *¿Qué es el cambio climático?* Naciones Unidas, Nueva York. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC] y Colciencias. (2018). *Modelo hidrogeológico conceptual e isotópico de la sabana estacional de Paz de Ariporo, Casanare, Colombia – informe final*. Contrato 005 de 2016. Bogotá, Colombia.

US Environmental Protection Agency [USEPA]. (2016). *Coal mine methane (CMM) finance guide*. <https://www.epa.gov/cmop/coalmine-methane-cmm-finance-guidance>

Veloza, J. y Morales, C. (2009) Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico en el municipio de Maní departamento de Casanare. *Boletín de Geología UIS Vol. 31, N° 1, enero - junio de 2009*. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/168/533a+y+sabanas+inundables&submit=&rpp=10>

ANEXO: LAS MARAVILLAS DE LA ORINOQUÍA

1. La Sierra de la Macarena y Caño Cristales (Meta).
2. El recorrido en lancha por el río Meta, entre Puerto López-Orocué-Puerto Carreño.
3. La reserva natural-hotel Hato La Aurora en Paz de Ariporo-Hato Corozal (Casanare).
4. La selva de Matavén (Vichada).
5. La Selva del Lipa (Arauca).
6. La Serranía de la Lindosa-La Puerta de Orión (Guaviare).
7. La estrella fluvial del Inírida-Cerro de Mavecure (Guainia).
8. La ruta libertadora entre Socha (Boyacá) y Pore (Casanare).
9. Pore histórico y colonial (Casanare).
10. El cerro de Samaricote (Pore, Paz de Ariporo y Tamara, Casanare).
11. El recorrido de la Marginal de la selva entre: Saravena (Arauca)-Yopal (Casanare)- Villavicencio (Meta)-San José del Guaviare (Guaviare).
12. Parque Nacional Natural El Tuparro-Raudales de Maipures (Vichada).
13. La laguna de La Primavera (La Primavera, Vichada).
14. San Miguel de Farallones (Aguazul, Casanare).

-
15. La laguna del Tinije (Aguazul, Casanare).
 16. El río Güejar (Mesetas, Meta).
 17. Parque natural-reserva de aves Wisirare (Orocué, Casanare).
 18. La explotación de sal en La Salina y Recetor (Casanare) y en Restrepo (Meta).
 19. El mirador de la virgen de Manare y la piscina natural La Aguatoca (Yopal, Casanare).
 20. La represa de Chivor (Macanal, Chivor y Almeida en Boyacá).
 21. La represa de Guavio (Gachalá y Ubalá en Cundinamarca).
 22. El Salto de Candelas - Río Cusiana (Pajarito, Boyacá).
 23. El parque de las Malocas-cultura llanera (Villavicencio, Meta).
 24. Parque-Zoológico Los Ocarros (Villavicencio, Meta).
 25. Llanura inundada y fauna silvestre en 4x4, entre Paz de Ariporo y Bocas de la Hermosa (Río Meta-Casanare).

