



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Zonificación hidrogeológica de Colombia a partir de información existente, incluyendo rocas cristalinas

Deisy Natalia Cárdenas Giraldo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2022

Zonificación hidrogeológica de Colombia a partir de información existente, incluyendo rocas cristalinas

Deisy Natalia Cárdenas Giraldo

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Directora:

MSc Carolina Ortiz Pimienta

Codirector:

MSc José Humberto Caballero

Línea de Investigación:

Hidrogeología

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2022

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Deisy Natalia Cárdenas Giraldo

Fecha: 02/08/2022

Resumen

Zonificación hidrogeológica de Colombia a partir de información existente, incluyendo rocas cristalinas

Se propone una metodología para zonificar hidrogeológicamente el país considerando experiencias en otros países e incluyendo rocas ígneas y metamórficas con base en información existente. Después de revisada la información disponible y evaluar el uso de productos de sensores remotos, los principales insumos consisten en el Atlas Geológico de Colombia (AGC) 1:500.000 versión 2020 que constituye la geología más detallada homologada y homogenizada por el SGC con cobertura nacional completa y la anomalía de almacenamiento de agua subterránea somera (GWS-GLDAS) obtenida de la asimilación de datos de la misión GRACE en el modelo GLDAS versión 2.2. La zonificación propuesta consiste básicamente en la actualización de las provincias definidas en IDEAM (2010) considerando elementos conceptuales tomados de otros países y refinando los límites según las unidades cronoestratigráficas y fallas del AGC, además de divisorias de áreas y zonas hidrográficas. Las rocas cristalinas se incluyeron nombrando las zonas de “basamento” (en IDEAM, 2010) como ocho provincias hidrogeológicas nuevas, la geología usada no cuenta con información suficiente para discretizar su potencial hidrogeológico. El uso de GWS-GLDAS permitió evaluar el comportamiento hidrológico subterráneo en todas las provincias propuestas, mostrando que en las rocas cristalinas y volcánicas también hay cambios importantes y con base en esta variable se plantea una división al interior de seis provincias en regiones hidrogeológicas. El principal aporte de esta propuesta es incluir las rocas cristalinas y volcánicas en la zonificación hidrogeológica con base en aspectos geológicos e hidrológicos asociados a la anomalía de almacenamiento de agua subterránea.

Palabras clave: zonificación hidrogeológica, Colombia, rocas cristalinas, anomalía de almacenamiento de agua subterránea, sensores remotos

Abstract

Hydrogeological zoning of Colombia from existing information, including crystalline rocks

A methodology is proposed to hydrogeological zoning in the country considering experiences in other countries and including igneous and metamorphic rocks based on existing information. After reviewing the available information and evaluating the use of remote sensing products, the main inputs consist of the Geological Atlas of Colombia (AGC) 1:500.000 version 2020, which constitutes the most detailed geology approved and homogenized by the SGC with complete national coverage and the shallow groundwater storage anomaly (GWS-GLDAS) obtained from the assimilation of data from the GRACE mission in the GLDAS model version 2.2. The proposed zoning basically consists of updating the provinces defined in IDEAM (2010) considering conceptual elements taken from other countries and refining the limits according to the chronostratigraphic units and faults of the AGC, in addition to surface water basins. The crystalline rocks were included by naming the "basement" zones (in IDEAM, 2010) as seven new hydrogeological provinces, the geology used does not have enough information to discretize their hydrogeological potential. The use of GWS-GLDAS made it possible to evaluate the subterranean hydrological behavior in all the proposed provinces, showing that there are also important changes in crystalline and volcanic rocks and based on this variable, a division within six provinces into hydrogeological regions is proposed. The main contribution of this proposal is to include crystalline and volcanic rocks in the hydrogeological zoning based on geological and hydrological aspects associated with the groundwater storage anomaly.

Keywords: hydrogeological zoning, Colombia, crystalline rocks, groundwater storage anomaly, remote sensing

Contenido

	Pág.
Contenido	IX
Definiciones	XX
Introducción	1
1. Marco teórico	4
1.1 Zonificación hidrogeológica en otros países	4
1.1.1 Regiones globales de aguas subterráneas	5
1.1.2 Francia	7
1.1.3 Brasil	11
1.1.4 Italia	12
1.1.5 Otros países	14
1.2 Hidrogeología en rocas cristalinas y volcánicas	15
1.2.1 Modelo conceptual de aguas subterráneas en rocas cristalinas	16
1.2.2 Rocas volcánicas	19
1.2.3 Patrones de meteorización	20
1.3 Sensores remotos	22
1.3.1 Espesor del regolito	23
1.3.2 Densidad de drenajes	24
1.3.3 Densidad de lineamientos	25
1.3.4 Cambios en el almacenamiento de agua subterránea poco profunda en GLDAS versión 2.2 - misión GRACE	26
1.4 Antecedentes de zonificación hidrogeológica en Colombia	28
2. Propuesta de zonificación hidrogeológica para Colombia	32
2.1 Aspectos relevantes de la información documentada para la zonificación hidrogeológica en Colombia	32
2.1.1 Zonificación hidrogeológica en otras regiones	32
2.1.2 Potencial hidrogeológico en rocas ígneas y metamórficas	34
2.1.3 Uso de sensores remotos	36
2.2 Datos usados	36
2.2.1 Geología	37
2.2.2 Agua almacenada en el subsuelo	38
2.2.3 Precipitación satelital	40
2.2.4 Densidad de lineamientos y drenajes	41
2.3 Metodología propuesta	43
2.3.1 Etapa uno (1)	43
2.3.2 Etapa dos (2)	46

2.3.3	Etapas tres (3) y cuatro (4)	47
2.3.4	Etapa cinco (5)	50
3.	Zonificación propuesta.....	52
3.1	Implementación de la metodología propuesta.....	53
3.1.1	PC1* Costera - Atlántico.....	60
3.1.2	PC2* Costera - Pacífico.....	64
3.1.3	PC3* Serranía de Baudó.....	67
3.1.4	PC4* Serranía del Darién.....	70
3.1.5	PC5* Sierra Nevada de Santa Marta.....	73
3.1.6	PM1 Valle Medio del Magdalena.....	75
3.1.7	PM2 Valle Alto del Magdalena.....	79
3.1.8	PM3 Cauca - Patía.....	82
3.1.9	PM4 Cordillera Oriental.....	85
3.1.10	PM5 Catatumbo.....	89
3.1.11	PM6 Cordilleras Central y Occidental.....	92
3.1.11.1	Cordillera Central.....	92
3.1.11.2	Cordillera Occidental.....	95
3.1.12	PM7* Macizo de Garzón.....	99
3.1.13	PM8* Macizo de Santander.....	102
3.1.14	PM9* Serranía del Perijá.....	104
3.1.15	PP1 Caguán - Putumayo.....	107
3.1.16	PP2 Vaupés - Amazonas.....	110
3.1.17	PP3 Orinoquía (Llanos Orientales).....	113
3.1.18	PP4* Escudo de Guyana.....	116
4.	Análisis de resultados.....	119
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	123
5.1	Conclusiones.....	123
5.2	Recomendaciones.....	125
	Anexo A: cartografía editable.....	127
	Bibliografía.....	129

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Regiones globales de aguas subterráneas delimitadas por IGRAC. Rojo: basamento, amarillo: cuencas sedimentarias, verde: regiones montañosas plegadas de alto relieve y azul: regiones volcánicas.....	6
Figura 1-2. Regiones globales y provincias de aguas subterráneas delimitadas por IGRAC para América del Sur.....	6
Figura 1-3. Naturaleza de las entidades hidrogeológicas de acuerdo con los niveles de visualización de la Base de Datos de Límites de Sistemas Acuíferos de Francia.	8
Figura 1-4. Modelo conceptual de un perfil de meteorización parcialmente erosionado en rocas duras (erosión parte derecha de la figura), que muestra las tres capas del modelo conceptual de aguas subterráneas en rocas cristalinas.....	17
Figura 1-5. Perfiles de suelo residual representativos en rocas comunes.....	22
Figura 2-1. Grupos hidrolitológicos definidos en este trabajo, de acuerdo con el tipo de roca que conforman las unidades cronoestratigráficas (UC) del Atlas Geológico de Colombia versión 2020.....	38
Figura 2-2. Distribución espacial de la anomalía de almacenamiento de agua subterránea - GWS (lámina de agua) media anual del modelo GLDAS versión 2.2, para Colombia en el periodo comprendido entre febrero de 2003 y febrero de 2021.....	39
Figura 2-3. Distribución espacial de la precipitación media anual de la base de datos CHIRPS para Colombia, en el periodo comprendido entre febrero de 2003 y febrero de 2021.....	40
Figura 2-4. Distribución espacial de la densidad de lineamientos (fallas y lineamientos del Atlas Geológico de Colombia versión 2020). Obtenida a partir de dos métodos: (a) calculando la longitud de líneas en una cuadrícula de 5 km * 5 km y (b) usando una herramienta de análisis espacial en software SIG.	42
Figura 2-5. Distribución espacial de la densidad de drenajes obtenida calculando la longitud de líneas en una cuadrícula de 5 km * 5 km, para (a) drenajes a escala 1:100.000 y (b) drenajes a escala 1:500.000.....	42
Figura 2-6. Distribución espacial de la densidad de drenajes usando una herramienta de análisis espacial de un software SIG, para (a) drenajes a escala 1:100.000 y (b) drenajes a escala 1:500.000.....	43
Figura 2-7. Esquema de la relación entre las cinco (5) etapas de la metodología propuesta para la zonificación hidrogeológica de Colombia incluyendo rocas cristalinas a partir de información existente, desarrollada y aplicada en este trabajo.	44

Figura 2-8. Distribución espacial de los puntos usados para evaluar el comportamiento de las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS asociado a los grupos hidrolitológicos en cada provincia, respecto a la cuadrícula de los datos de GWS-GLDAS y la delimitación de las provincias hidrogeológicas propuestas (UC: unidades cronoestratigráficas).....	50
Figura 3-1. Orden jerárquico de las unidades de análisis en la zonificación hidrogeológica propuesta.....	52
Figura 3-2. Comparación entre la distribución espacial de la delimitación de las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo y las provincias definidas en IDEAM (2010).	57
Figura 3-3. Delimitación de las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo..	57
Figura 3-4. Grupos hidrolitológicos definidos en este trabajo, de acuerdo con el tipo de roca que conforman las unidades cronoestratigráficas (UC) del Atlas Geológico de Colombia versión 2020, respecto a las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo.....	59
Figura 3-5. Delimitación de las regiones hidrogeológicas propuestas en este trabajo (subdivisión al interior de las provincias hidrogeológicas propuestas).....	60
Figura 3-6. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Atlántico - PC1*	61
Figura 3-7. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	62
Figura 3-8. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	63
Figura 3-9. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.....	63
Figura 3-10. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	63
Figura 3-11. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	64
Figura 3-12. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.	64
Figura 3-13. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Pacífico - PC2*	65
Figura 3-14. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS... ..	66
Figura 3-15. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.....	66
Figura 3-16. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. ...	67
Figura 3-17. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.	67

Figura 3-18. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Serranía de Baudó - PC3* 68

Figura 3-19. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia y representan la variable P-CHIRPS.69

Figura 3-20. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados. 69

Figura 3-21. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. . 69

Figura 3-22. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados..... 70

Figura 3-23. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Serranía del Darién - PC4* 71

Figura 3-24. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. . 71

Figura 3-25. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados. 72

Figura 3-26. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. . 72

Figura 3-27. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados..... 72

Figura 3-28. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Sierra Nevada de Santa Marta - PC5* 73

Figura 3-29. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. . 74

Figura 3-30. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados. 74

Figura 3-31. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. . 75

Figura 3-32. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados..... 75

Figura 3-33. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Valle Medio del Magdalena - PM1..... 76

Figura 3-34. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS..... 77

Figura 3-35. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas con transparencia y escala de colores de azul a verde representan la variable P-CHIRPS. 77

Figura 3-36. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados. 78

Figura 3-37. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS..... 78

Figura 3-38. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	78
Figura 3-39. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.	79
Figura 3-40. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Vallo Alto del Magdalena - PM2.	80
Figura 3-41. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	80
Figura 3-42. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	81
Figura 3-43. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.	81
Figura 3-44. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	81
Figura 3-45. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	82
Figura 3-46. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.	82
Figura 3-47. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Cauca – Patía - PM3.	83
Figura 3-48. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	84
Figura 3-49. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	84
Figura 3-50. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.	84
Figura 3-51. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	85
Figura 3-52. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	85
Figura 3-53. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.	85
Figura 3-54. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Cordillera Oriental - PM4.	86

Figura 3-55. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....	87
Figura 3-56. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....	87
Figura 3-57. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.	88
Figura 3-58. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....	88
Figura 3-59. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....	88
Figura 3-60. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.....	89
Figura 3-61. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Catatumbo - PM5.	90
Figura 3-62. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. .	90
Figura 3-63. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.	91
Figura 3-64. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. .	91
Figura 3-65. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.....	91
Figura 3-66. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Cordillera Central y Occidental - PM6.....	93
Figura 3-67. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....	94
Figura 3-68. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....	94
Figura 3-69. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.	94
Figura 3-70. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....	95
Figura 3-71. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....	95
Figura 3-72. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.....	95

Figura 3-73. Delimitación de la provincia hidrogeológica Cordillera Central y Occidental - PM6.	96
Figura 3-74. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	97
Figura 3-75. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	97
Figura 3-76. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.	98
Figura 3-77. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	98
Figura 3-78. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	98
Figura 3-79. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.	99
Figura 3-80. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Macizo de Garzón - PM7*	100
Figura 3-81. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	100
Figura 3-82. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.	101
Figura 3-83. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	101
Figura 3-84. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.	101
Figura 3-85. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Macizo de Santander - PM8*	102
Figura 3-86. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	103
Figura 3-87. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.	103
Figura 3-88. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	103
Figura 3-89. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.	104
Figura 3-90. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Serranía del Perijá - PM9*	105
Figura 3-91. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.	105

Figura 3-92. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.106

Figura 3-93. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. 106

Figura 3-94. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.....106

Figura 3-95. Delimitación de la provincia hidrogeológica pericratónica Caguán – Putumayo - PP1.107

Figura 3-96. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....108

Figura 3-97. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....108

Figura 3-98. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.109

Figura 3-99. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....109

Figura 3-100. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.....109

Figura 3-101. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.....110

Figura 3-102. Delimitación de la provincia hidrogeológica Vaupés – Amazonas - PP2. 111

Figura 3-103. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. 111

Figura 3-104. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.112

Figura 3-105. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. 112

Figura 3-106. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.....112

Figura 3-107. Delimitación de la provincia hidrogeológica pericratónica Orinoquía - PP3.114

Figura 3-108. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. 114

Figura 3-109. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.115

Figura 3-110. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. 115

Figura 3-111. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.....115

Figura 3-112. Delimitación de la provincia hidrogeológica pericratónica Escudo de Guyana - PP4*	116
Figura 3-113. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. 117	117
Figura 3-114. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.....	117
Figura 3-115. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS. 117	117
Figura 3-116. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.	118

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Tipos de medios en las entidades hidrogeológicas de la Base de Datos de Límites de Sistemas Acuíferos de Francia.....	9
Tabla 1-2. Delimitación de las entidades hidrogeológicas en la Base de Datos de Límites de Sistemas Acuíferos de Francia.....	9
Tabla 1-3. Categorías en la taxonomía hidrogeológica usada en Brasil para la cartografía hidrogeológica.....	11
Tabla 1-4. Productos de la meteorización en algunas rocas comunes.....	21
Tabla 1-5. Estudios y mapas hidrogeológicos que han sido realizados en Colombia con cobertura nacional.....	29
Tabla 2-1. Resumen de las zonificaciones hidrogeológicas revisadas en otros países y en Colombia.....	33
Tabla 3-1. Comparación entre la nomenclatura y áreas de las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo y las provincias definidas en IDEAM (2010, 2013b).....	55
Tabla 3-2. Sistemas acuíferos (IDEAM, 2015a, 2019) que no cumplen el principio de herencia (definido en la zonificación hidrogeológica de Francia) con las provincias hidrogeológicas delimitadas en IDEAM (2010).....	56

Definiciones

Zonificación hidrogeológica: Zaporozec (1972) define la zonificación de las aguas subterráneas como una subdivisión regional de un área geográfica particular según características hidrogeológicas similares con el propósito de aumentar el potencial para una planificación efectiva del desarrollo y la protección de los recursos, propuesta como herramienta para un plan de desarrollo en América del Norte y Central. El autor propuso la **región hidrogeológica** como una unidad fundamental que puede ser agrupada en unidades más grandes llamadas **provincias hidrogeológicas** y estas pueden ser agrupadas en **reinos hidrogeológicos**. A su vez, las regiones se pueden dividir en **zonas y subzonas** y según la necesidad se puede establecer una unidad intermedia entre las regiones y las provincias, llamada **región hidrogeológica mayor**.

Provincia hidrogeológica: Meinzer (1923 en Zaporozec, 1972) definió las provincias hidrogeológicas como áreas relativamente grandes, cada una con una amplia uniformidad de condiciones hidrogeológicas y geológicas. En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2010) definió las provincias hidrogeológicas como unidades tectono-estratigráficas que coinciden con límites de cuencas geológicas mayores caracterizadas por su homogeneidad geomorfológica y separadas entre sí por rasgos estructurales regionales como fallas y altos estructurales que corresponden a barreras impermeables.

Sistemas acuíferos IDEAM: corresponden a cuerpos que pueden contener uno o varios acuíferos, no necesariamente relacionados y son una unidad práctica para explotar o investigar (ITGE, 1971, 1987 citado en IDEAM, 2013a).

Unidades hidroestratigráficas: las definiciones de Maxey (1964) y Seaber (1986, 1988) citados en Monreal et al. (2011), se pueden unificar como rocas que se distinguen por su porosidad y permeabilidad delimitadas por características hidrológicas observables y distintivas. Para Fetter (1994 citado en Monreal et al., 2011), corresponden a formaciones con características hidrológicas similares que permiten agruparlas en acuíferos o capas confinantes. Así que, considerando que la estratigrafía y las estructuras controlan la ocurrencia de acuíferos y acuitardos (Freeze & Cherry, 1979), una misma unidad geológica puede clasificarse en varias unidades hidroestratigráficas y equivalen a las **unidades hidrogeológicas**, definidas por Zaporozec (1972) como unidades delimitadas por características litológicas, estratigráficas, estructurales, hidrogeológicas e hidrológicas.

Grupos hidrolitológicos: definidos en este trabajo a partir de la documentación revisada sobre zonificación hidrogeológica en otros países. Se refiere a la agrupación de unidades cronoestratigráficas del Atlas Geológico de Colombia versión 2020 (J. Gómez et al., 2020), que tienen formas similares de almacenar y transmitir agua subterránea.

Saprolito: suelo residual en el que se conservan la textura y las estructuras de la roca original (Hoyos, 2012).

Regolito: término genérico utilizado para designar los materiales de la corteza terrestre que se encuentran entre la superficie y el sustrato rocoso, sean ellos residuales o transportados (Hoyos, 2012).

Los términos “saprolito” y “regolito” usados en el documento corresponden a la traducción literal cuando se hace referencia a trabajos de otros autores.

Introducción

El agua subterránea corresponde a más del 94% del agua dulce en estado líquido en el planeta Tierra y constituye la mayor reserva de agua dulce asequible a los seres humanos, representando un valor incalculable en términos de economía y de bienestar (Tarbuck et al., 2005). Además de su importancia en los ecosistemas estratégicos como páramos y humedales, que juegan un papel esencial en la prestación de servicios ecosistémicos (Betancur et al., 2017), es esencial para el suministro de agua potable tanto en zonas rurales como urbanas (Foster et al., 2002). Alrededor de 2 mil millones de personas, que equivale a más de un tercio de la población mundial, dependen completamente del agua subterránea para sus necesidades diarias (Richts et al., 2011).

En Colombia, tradicionalmente se ha reconocido el papel del agua subterránea en términos de aprovechamiento, dando menos importancia a su participación en dinámicas con el medio y los ecosistemas (IDEAM, 2013a). Debido a este enfoque se ha enfatizado en la caracterización de rocas y depósitos con permeabilidad primaria, desconociendo el interés hidrogeológico de las rocas cristalinas fracturadas, por lo que hay actualmente una carencia de caracterización hidrogeológica de orden nacional que abarque tanto las formaciones acuíferas como las que no lo son, incluyendo las rocas ígneas y metamórficas, que corresponden a un 25,5% de “ambientes con posibilidades hidrogeológicas desconocidas, limitadas o restringidas” (IDEAM, 2013a).

Con este trabajo se busca establecer una metodología para hacer una zonificación hidrogeológica que considere también las rocas cristalinas a partir de cartografía geológica ya homologada por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2020 y con el apoyo de otras temáticas, que contribuya a la consolidación del conocimiento e incentive el continuo estudio de la hidrogeología en Colombia, que a pesar de la escasez de información *in situ* debe ser una tarea continua, buscando nuevas fuentes de información y reconociendo que el agua subterránea no solo es importante para suministro, sino considerarla como parte fundamental del subsuelo, los ecosistemas y lo que ello conlleva.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha realizado la cartografía hidrogeológica a nivel nacional desde 1977 a escalas que varían desde 1:3.000.000 hasta 1:500.000. Se destaca el Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia a escala 1:500.000 (INGEOMINAS, 2004a), aunque solo cubre parte del norte y centro del país. Recientemente el SGC adelanta modelos hidrogeológicos conceptuales a escala 1:100.000 en zonas definidas como

prioritarias en el Programa de Exploración de Aguas Subterráneas – PEXAS (INGEOMINAS, 2004b).

El IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en los últimos estudios nacionales del agua (IDEAM, 2010, 2015a, 2019) ha publicado la definición de provincias hidrogeológicas, la delimitación de 62 sistemas acuíferos, entre otros resultados. En IDEAM (2013b, 2015a) se describe la zonificación hidrogeológica del país comprendida en dos (2) niveles: provincias hidrogeológicas y sistemas acuíferos. En las provincias se excluyen los terrenos conformados en su mayoría por rocas ígneas y metamórficas, sin embargo, dentro de los sistemas acuíferos se encuentran algunos conformados por unidades geológicas asociados a actividad volcánica como abanicos, formaciones vulcano-sedimentarias e incluso rocas ígneas y metamórficas.

A pesar de la existencia de estos estudios, hace falta una zonificación hidrogeológica que considere todos los ambientes geológicos. Las rocas cristalinas con porosidad secundaria pueden permitir el flujo de agua subterránea y su interacción con el medio es especialmente importante si se consideran las diferentes intervenciones antrópicas que pueden tener efecto en las dinámicas del flujo y su interacción con cuerpos de agua superficial o verse afectadas por estos.

El objetivo general de este trabajo es desarrollar y aplicar una metodología para zonificar hidrogeológicamente el país a escala regional a partir de la integración de información existente e incluyendo análisis de rocas cristalinas. Los objetivos específicos se listan a continuación:

- Identificar y analizar las metodologías usadas en otros países para la zonificación hidrogeológica regional, con el fin de tomar elementos conceptuales que puedan ser aplicados en Colombia.
- Definir como caracterizar el potencial hidrogeológico en rocas cristalinas y volcánicas para determinar la forma apropiada de hacerlo a partir de la información geológica existente.
- Evaluar el uso de sensores remotos como complemento al análisis de la cartografía básica y temática.

Los resultados son la propuesta metodológica y la aplicación de esta con base en descripciones cualitativas a partir de la información recolectada, que consiste principalmente en el Atlas Geológico de Colombia (AGC) a escala 1:500.000 versión 2020 (J. Gómez et al., 2020) y productos de la misión GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) que han sido asimilados en el modelo global de asimilación de datos GLDAS (*Global Land Data Assimilation System*) y que representan la primera aproximación al recurso hídrico subterráneo somero con métodos de teledetección. Esta propuesta se centra en la geología superficial y el agua subterránea somera, no incluye las zonas insulares de Colombia debido a las particularidades geológicas e hidrogeológicas de las islas y a que no están abarcadas en los productos de la misión GRACE y el modelo GLDAS.

Para dar continuidad a la zonificación propuesta por el IDEAM, se parte de las provincias hidrogeológicas definidas por la entidad en 2010, refinando su delimitación de acuerdo con las unidades cronoestratigráficas y fallas del AGC 2020, siguiendo los principios de integridad, parentesco y herencia establecidos en Francia (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003). Para describir las provincias y proponer una división de estas en regiones hidrogeológicas se usó la variable de anomalía de almacenamiento de agua subterránea del modelo GLDAS versión 2.2 (asimilación de la misión GRACE).

El resultado se vio restringido por tratarse de un área extensa, eso limitó el uso de otras variables que son comúnmente usadas para determinar potencial hidrogeológico, dado que implica mayores tiempos de procesamiento. La escala gruesa de los datos de la misión GRACE no permite hacer una discretización más detallada de la respuesta de esta variable en los diferentes materiales cartografiados en superficie. La geología a escala 1:500.000, que es la escala más detallada a la que se cuenta con geología homologada y homogenizada para todo el país, no tiene las descripciones necesarias para puntualizar el potencial hidrogeológico de las rocas ígneas y metamórficas y usar cartografía geológica 1:100.000 es inviable debido a que es heterogénea, incompleta y tampoco cuenta con descripciones de perfiles de meteorización o grado de fracturamiento en rocas duras.

Las rocas cristalinas se incluyeron nombrando las zonas de “basamento” (en IDEAM, 2010) como ocho provincias hidrogeológicas nuevas, no fue posible discretizar su potencial hidrogeológico porque la geología usada no cuenta con información suficiente para ello. El uso de la anomalía de almacenamiento de agua subterránea somera permitió evaluar el comportamiento hidrológico subterráneo en todas las provincias propuestas, mostrando que en las rocas cristalinas y volcánicas también hay cambios importantes, resaltando la necesidad de prestar atención a estas rocas en el estudio del recurso hídrico subterráneo.

En el documento se presenta inicialmente el marco teórico con la información consultada que sirvió como punto de partida, en el segundo capítulo se describe la metodología propuesta para la zonificación hidrogeológica y los datos usados, el capítulo tres (3) contiene la implementación de la propuesta y la descripción de las provincias y regiones hidrogeológicas definidas. Finalmente se presenta un análisis de los resultados, las conclusiones y recomendaciones.

1. Marco teórico

En este capítulo se describe la información base existente usada como insumo para la propuesta de zonificación hidrogeológica de Colombia. Se listan las metodologías revisadas definidas en otros países para zonificación hidrogeológica, la mayoría de las cuales se basan y usan información primaria disponible a nivel local y regional en cada territorio. Igualmente se documenta el tema de hidrogeología en rocas ígneas y metamórficas, además del uso de sensores remotos en este campo.

1.1 Zonificación hidrogeológica en otros países

Zaporozec (1972) define la zonificación de las aguas subterráneas como una subdivisión regional de un área geográfica particular según características hidrogeológicas similares con el propósito de aumentar el potencial para una planificación efectiva del desarrollo y la protección de los recursos, propuesta como herramienta para un plan de desarrollo en América del Norte y Central. El autor propuso la región hidrogeológica como una unidad fundamental que puede ser agrupada en unidades más grandes llamadas provincias hidrogeológicas y estas pueden ser agrupadas en reinos hidrogeológicos.

El enfoque hidrogeológico para la zonificación propuesta por Zaporozec (1972) se basa en varios criterios: geología y tectónica, litología, condiciones geológicas y geomorfológicas de las zonas de recarga, condiciones del movimiento y flujo de agua subterránea, profundidad y fluctuaciones de la tabla de agua. Estos criterios pueden variar dependiendo de la zona, y de las características fisiográficas y climáticas. Los mapas hidrogeológicos sintéticos serían la base para la zonificación regional.

Los mapas hidrogeológicos son representaciones sinópticas de datos que relacionan el sistema agua-roca en las que se describen situaciones estáticas y procesos dinámicos en el subsuelo. Comprende todos los programas y técnicas para coleccionar, documentar, dibujar, interpretar y representar información hidrogeológica en forma gráfica (Struckmeier & Margat, 1995).

A nivel global, el interés por la cartografía hidrogeológica inició en 1940 como una base para el desarrollo, debido al incremento de la demanda de agua, especialmente en los

países industrializados, y frente a la necesidad de una planificación racional de los recursos hídricos (Gilbrich & Struckmeier, 2014).

En 1999 la IAH (*International Associations of Hydrogeologist*) y la CGMW (*Commission for the Geological Map of the World*) presentaron la propuesta Programa Mundial de Mapeo y Evaluación Hidrogeológica - WHYMAP (*Worldwide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme*) incluida dentro del IHP (*International Hydrological Programme*) de la UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*). En 2002 se estableció el consorcio responsable del esquema temático general y de la gestión del programa y el primer mapa global (incluida Colombia) de recursos subterráneos a escala 1:50.000.000 se lanzó en el 2004, detallado a escala 1:25.000.000 en el 2008. Actualmente, los resultados se encuentran disponibles en aplicaciones web con productos sobre cantidad, calidad y vulnerabilidad del recurso hídrico subterráneo en el mundo (Richits et al., 2011).

El proyecto WHYMAP fue construido a partir de los mapas hidrogeológicos continentales, alimentados a su vez por mapas regionales y nacionales (Richits et al., 2011). Cada país cuenta con una cartografía hidrogeológica propia con escalas variables según su extensión y obedeciendo a dinámicas propias del territorio, siguiendo las leyendas recomendadas por la IAH y la UNESCO (Herms & Arnó, 2016).

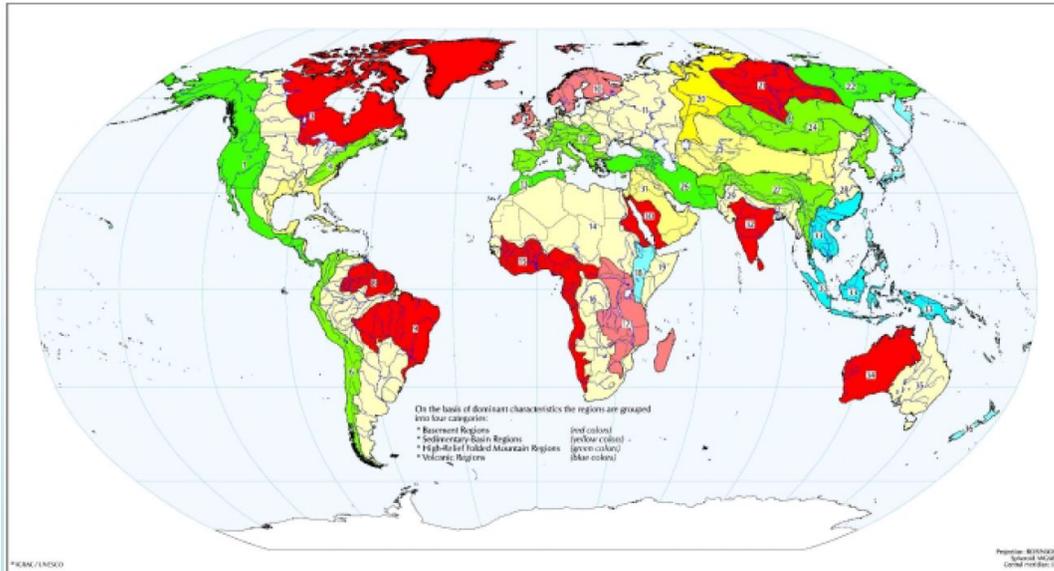
A continuación, se describen zonificaciones hidrogeológicas documentadas y disponibles de otros países, iniciando con una zonificación global propuesta por el IGRAC (*International Groundwater Resources Assessment Centre*).

1.1.1 Regiones globales de aguas subterráneas

El IGRAC definió un sistema jerárquico de tres (3) niveles de zonas de aguas subterráneas, compuesto por regiones globales de agua subterránea, provincias y sistemas acuíferos, con el propósito de ayudar a comprender y memorizar las principales características del entorno hidrogeológico a escala global (Gun et al., 2008; Margat & Gun, 2013).

Según el predominio de un determinado entorno hidrogeológico general (basamento - B, cuencas sedimentarias - S, regiones montañosas plegadas de alto relieve - M y regiones volcánicas - V), esta zonificación comprende 36 regiones globales de agua subterránea subdivididas en 217 provincias (Margat & Gun, 2013) (Figura 1-1). Aquí, las provincias obedecen al concepto de "provincias de aguas subterráneas" de Meinzer que son áreas relativamente grandes, cada una con una amplia uniformidad de condiciones hidrogeológicas y geológicas. Los sistemas acuíferos son los grandes sistemas transfronterizos y otros cuerpos reportados por las regiones. América del Sur está dividida en cuatro (4) regiones que abarcan 15 provincias como se muestra en la Figura 1-2.

Figura 1-1. Regiones globales de aguas subterráneas delimitadas por IGRAC. Rojo: basamento, amarillo: cuencas sedimentarias, verde: regiones montañosas plegadas de alto relieve y azul: regiones volcánicas.



Fuente: tomado de Gun et al. (2008).

Figura 1-2. Regiones globales y provincias de aguas subterráneas delimitadas por IGRAC para América del Sur.



Fuente: tomado y modificado de Margat & Gun (2013).

1.1.2 Francia

Francia cuenta con una Base de Datos de Límites de Sistemas Acuíferos (BDLISA, por sus siglas en francés), actualizada en 2018. Este estándar sigue cuatro (4) principios fundamentales (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003):

(1) Concepto de entidad hidrogeológica. Las entidades se definen según cuatro (4) características: temas (geología), naturaleza (potencial acuífero), medio (tipo de porosidad) y estado (tipo de acuífero: libre, confinado).

(2) Tres (3) niveles de visualización y consulta: *nivel local* - N3, de mayor detalle (escala 1:50.000) que permite apoyar estudios como la producción de mapas piezométricos o el modelado de un acuífero; *nivel regional* - N2 que puede usarse para la producción de atlas hidrogeológicos regionales o para la evaluación de recursos a escala regional (1:150.000 a 1:500.000); y *nivel nacional* - N1 que sirve para la implementación de políticas públicas o para proyectos a escala nacional (1:500.000 a 1:1.000.000).

(3) Estratigrafía de las entidades. De acuerdo con la dimensión vertical se considera un orden absoluto y otro relativo de las entidades hidrogeológicas.

(4) Principios de integridad, parentesco y herencia. El primero se refiere a que todo el país está cubierto por las entidades hidrogeológicas, sean formaciones acuíferas o no, y en todos los niveles de visualización. El parentesco indica que una entidad local está unida a una regional, que a su vez está incluida en una nacional. El principio de herencia describe que los límites de las entidades se heredan, del nivel 3 al nivel 2 y del nivel 2 al nivel 1.

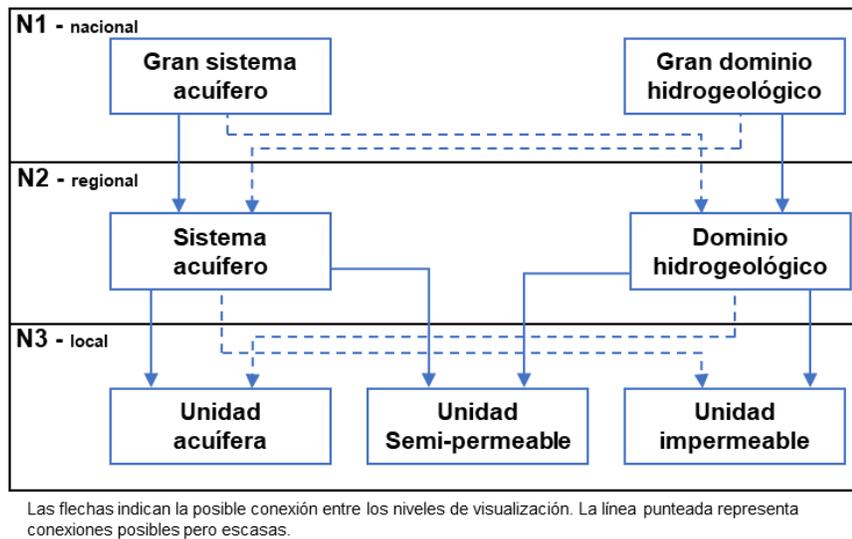
1.1.2.1 Características de las entidades hidrogeológicas

En la delimitación de las entidades hidrogeológicas, los **temas** se refieren a los grandes ambientes geológicos del país: aluvial, sedimentario, rocas cristalinas, formaciones intensamente plegadas y volcánico (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003). La **naturaleza** caracteriza el potencial acuífero de las entidades, dependiendo del nivel de visualización como se observa en la Figura 1-3. A continuación, se describe cada una de las categorías (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003).

- Gran sistema acuífero: sistema físico compuesto por una o más unidades de acuíferos, generalmente con conexión hidráulica y que está circunscrito por límites litoestratigráficos y/o estructurales.
- Gran dominio hidrogeológico (no acuífero): sistema físico con poco o ningún acuífero. Puede contener unidades acuíferas, pero de poca extensión lateral y aislado en el macizo impermeable.
- Dominio hidrogeológico (no acuífero): resulta de la división vertical u horizontal de un gran dominio hidrogeológico o un gran sistema acuífero, con base en criterios litológicos, estructurales, estratigráficos, piezométricos, geoquímicos e hidráulicos.
- Sistema acuífero: resulta de la división vertical u horizontal de un gran dominio hidrogeológico o un gran sistema acuífero, con base en criterios litológicos, estructurales, estratigráficos, piezométricos, geoquímicos e hidráulicos. Su constitución viene del conocimiento en un tiempo dado de un ambiente subterráneo.

- Unidad acuífera: sistema físico con condiciones hidrodinámicas homogéneas que permiten la circulación de agua subterránea, con suficientes recursos para ser explotados y valores de conductividad hidráulica mayores a 10^{-6} m/s.
- Unidad semi-permeable: unidad con recursos que no son suficientes para ser explotados, la conductividad hidráulica varía entre 10^{-9} m/s y 10^{-6} m/s.
- Unidad impermeable: unidad con poca o nula circulación de agua, con valores de conductividad hidráulica menores a 10^{-9} m/s.

Figura 1-3. Naturaleza de las entidades hidrogeológicas de acuerdo con los niveles de visualización de la Base de Datos de Límites de Sistemas Acuíferos de Francia.



Fuente: tomado y modificado de Brugeron et al. (2018) y Petit et al. (2003).

El **medio** es el atributo que describe el tipo de porosidad de la entidad hidrogeológica, los nueve (9) tipos considerados se presentan en la Tabla 1-1 (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003).

El **estado** se define solo en el nivel N3 y depende del nivel freático en la entidad hidrogeológica (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003):

- Confinado: entidad confinada entre dos (2) áreas con poca o nada de permeabilidad.
- Libre: entidad que no tiene límite superior impermeable.
- Libre y confinado: entidad con partes libres o confinadas en uno o varios lugares en la superficie.
- Alterno: entidad con variaciones libre/confinado en el tiempo.
- Semi-confinado: entidad con estado intermedio entre libre y confinado. Generalmente el techo del acuífero tiene áreas permeables o semi-permeables que permiten transferencias.

Tabla 1-1. Tipos de medios en las entidades hidrogeológicas de la Base de Datos de Límites de Sistemas Acuíferos de Francia.

Tipo de medio	Poroso			Fracturado	Carst
Doble porosidad	Matriz/Fisuras	Matriz/Fracturas	Matriz/Carst	Fisuras y/o fracturas	Carst/Fisuras
Triple porosidad	Matriz / Fracturas / Carst				

Fuente: tomado de Brugeron et al. (2018) y Petit et al. (2003).

1.1.2.2 Delimitación de entidades hidrogeológicas

En la Tabla 1-2 se presentan los criterios usados en la delimitación de las entidades hidrogeológicas de acuerdo con los temas y los niveles de visualización.

Tabla 1-2. Delimitación de las entidades hidrogeológicas en la Base de Datos de Límites de Sistemas Acuíferos de Francia.

Tema	Descripción	Nivel	Delimitación
Aluvial	Llanuras aluviales y terrazas hidráulicamente conectadas con los ríos	NV1	Delimitación de aluviones de más de 200 m de ancho, a menos que tenga cualidades acuíferas. Delimitación por niveles con base en la clasificación de Strahler asociada a los drenajes. Se define como entidad principal o complementaria de acuerdo con la capacidad de almacenamiento: reservorio (aluvión con espesor y porosidad que permite almacenar un volumen de agua potencialmente explotable).
		NV2	Subdivisiones de acuerdo con condiciones locales, con base en criterios geográficos, geológicos e hidráulicos.
		NV3	Se sustraen sectores de acuíferos pobres, de acuerdo con la presencia de puntos de agua, conocimiento hidrogeológico y los valores de permeabilidad intrínseca (k): Unidad permeable ($k > 10^{-6}$ m/s) Unidad semi-permeable (10^{-9} m/s $> k > 10^{-6}$ m/s) Unidad impermeable ($k < 10^{-9}$ m/s)
Sedimentario	Formaciones poco o no deformadas, de cuencas sedimentarias no metamorfoseadas. Las formaciones carbonatadas presentes en suelos primarios serán tratados como temas sedimentarios.	NV1	Los grandes sistemas acuíferos están compuestos de varias capas con conexión hidráulica y circunscritos por límites litoestratigráficos. Los grandes dominios geológicos son sistemas físicos de una o más capas pobres o no acuíferas. Los contornos en superficie corresponden a contornos de formaciones geológicas 1:50.000. Los límites se establecen de acuerdo con registros de pozos y estudios llevados a cabo en el sector, así muchos límites en profundidad son inferidos y evolucionan con el nivel de conocimiento.
		NV2	Subdivisiones verticales u horizontales usando criterios litológicos, estructurales, estratigráficos, piezométricos, geoquímicos, afloramientos o subsuelo.

Tabla 1-2. Delimitación de las entidades hidrogeológicas en la Base de Datos de Límites de Sistemas Acuíferos de Francia.

Tema	Descripción	Nivel	Delimitación
		NV3	Los límites del sistema serán piezométricos y de acuerdo con valores de permeabilidad intrínseca (k): Unidad permeable ($k > 10^{-6}$ m/s) Unidad semi-permeable (10^{-9} m/s $>k> 10^{-6}$ m/s) Unidad impermeable ($k < 10^{-9}$ m/s)
Basamento	Formaciones magmáticas y metamórficas	NV1	Límite de cuencas con área entre 3.000 y 5.000 km ² . Delimitadas de acuerdo con criterios hidrográficos y la contribución de agua subterránea al río en la cuenca considerada.
		NV2	Agrupamiento de cuencas con las mismas características hidrológicas (flujo específico bajo). Subcuencas con superficies entre 200 y 3.000 km ² , aproximación de recursos con base en el caudal bajo específico.
		NV3	Subdivisión de cuencas NV2, caracterización y agrupamiento de acuerdo con litología y/o características hidrogeológicas (flujo específico bajo). Subdivisión identificando zonas productivas, teniendo en cuenta: (1) espesor de alteritas (suelo residual) y medio fracturado, (2) principales clases litológicas (calidad hidrogeológica de alteritas), (3) fallas del mapa geológico 1:250.000 del macizo Armorican, (4) distribución de áreas fracturadas transferidas a escala de cuenca a través de interpretación de fotografías aéreas, (5) clasificación de tasas perforación.
Volcánico	Formaciones terciarias y cuaternarias que conservan la geometría, morfología y/o estructura volcánica.	NV1	Superficies entre 100 y 2.500 km ² . Se excluyen las formaciones cuyo comportamiento hidrogeológico sea similar a las de basamento.
		NV2	Duplicado de la entidad NV1 (debido a la limitada extensión de estas formaciones en Francia).
		NV3	Identificación de cuencas, agrupamiento según límites litoestratigráficos de formaciones con comportamiento hidrogeológico homogéneo: estructuras geológicas, propiedades hidrogeológicas similares como la permeabilidad.
Formaciones intensamente plegadas	Formaciones plegadas recientemente, de los Alpes, los Pirineos, Languedoc y Macizo del Jura. Yuxtaposición y/o superposición de formaciones de variada naturaleza y espesor, con la presencia de grandes discontinuidades.	NV1	Cruce de criterios litoestratigráficos e hidrográficos, se definen límites estructurales (1:1.000.000 y/o 1:250.000) y límites de cuencas hidrográficas.
		NV2	Cruce entre los diferentes criterios (límites hidrográficos, contactos estructurales, límites litológicos y estratigráficos).
		NV3	Dependiendo del estado de conocimiento, de otra manera, se hace duplicado del NV2. Delimitadas a escala 1:50.000 solo unidades acuíferas, excepto aluvial y fluvio-glacial. Los conos torrenciales se consideran acuíferos distintos a los aluviales, los conos de flujo de lodos no se consideran acuíferos.

Tabla 1-2. Delimitación de las entidades hidrogeológicas en la Base de Datos de Límites de Sistemas Acuíferos de Francia.

Tema	Descripción	Nivel	Delimitación
Carst	Ambientes geológicos donde predominan las rocas carbonatadas y tienen geoformas cársticas. Son capas delimitadas en otros temas (sedimentario o intensamente plegado).	NV1	En temas sedimentarios se delimita con base en criterios morfológicos y geológicos, en temas intensamente plegados no aparecen en este nivel.
		NV2	Considerando el comportamiento hidrodinámico tipo carst, se delimitan sectores carstificados e intersecciones de cuencas y límites naturales (acantilados).
		NV3	Delimitación según la unidad de drenaje kárstico (superficie a menudo inferior a 50 km ²).

Fuente: tomado de Brugeron et al. (2018) y Petit et al. (2003).

1.1.3 Brasil

En Brasil se ha desarrollado una *taxonomía hidrogeológica*, que es una jerarquización con base en la taxonomía biológica, partiendo de unidades básicas de referencia que se agrupan en categorías con características semejantes, así, de menor a mayor jerarquía se divide en: unidades hidroestratigráficas (individuos), acuíferos, sistemas acuíferos y unidades hidrolíticas o dominios hidrogeológicos (Oliveira et al., 2014), como se describe en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Categorías en la taxonomía hidrogeológica usada en Brasil para la cartografía hidrogeológica.

Categorías jerárquicas	Descripción	
Unidades hidrolíticas o dominios hidrogeológicos	Consideran solo el tipo litológico predominante. Son grupos de unidades geológicas que almacenan y transmiten agua subterránea de forma semejante, unidades tridimensionales con límites y dimensiones arbitrarias. No poseen límites concretos, unas características se superponen a otras, por ejemplo, una hidrolitología fracturada puede contener rocas ígneas plutónicas y volcánicas, cársticas, metasedimentarias y hasta rocas sedimentarias con alta dureza.	Porosas o granulares
		Fracturadas
		Cársticas
		No acuíferas
Sistemas acuíferos	Formado por dos o más acuíferos, constituyen una unidad práctica e investigación o exploración. Se definen siguiendo los principios básicos de agrupamiento de individuos. Limitados en superficie y en profundidad.	
Acuíferos	Se consideran homogéneos e isotrópicos sin tener en cuenta las variaciones de productividad. Los límites de los acuíferos no necesariamente coinciden con los límites de las unidades hidroestratigráficas.	
Unidades hidroestratigráficas	Formaciones geológicas relacionadas temporalmente, que almacenan y transmiten agua subterránea de forma semejante con productividades del mismo orden de magnitud. Tiene límites objetivos que sirven para la identificación y delineamiento de clases en campo. Constituyen un área acuífera formada por un único tipo litológico o agrupamiento de hidrolitologías semejantes.	

Fuente: a partir de Oliveira et al. (2014).

Los acuíferos no se consideran la unidad de referencia (menor clase jerárquica), ya que están subdivididos en unidades hidroestratigráficas de acuerdo con las variaciones en su capacidad acuífera (diferentes condiciones de productividad).

Los acuíferos (o formaciones geológicas) se definen a partir de unidades estratigráficas, conociendo su geometría, forma de ocurrencia y características hidrodinámicas generales, descripción y registro de características morfológicas tales como: estructura y forma de conducir agua (granular, fracturado, cárstico), grado de consolidación (en materiales granulares), granulometría predominante, grado de cementación, grado de carstificación, grado de fracturamiento, espesor, constitución litológica, geoformas, espesor y composición del material meteorizado, densidad y tipo de drenajes.

La productividad se clasifica según Struckmeier & Margat (1995) con base en la permeabilidad, la transmisividad, la capacidad específica o la recarga y de acuerdo con esta se clasifican los tipos de acuíferos. Las unidades hidroestratigráficas se definen asignando una clase de productividad a las unidades geológicas.

1.1.4 Italia

Pantaleone et al. (2018) describen la zonificación en el sur del país enmarcada en dos (2) niveles: dominios y complejos hidrogeológicos. Los complejos hidrogeológicos se definen siguiendo tres (3) principios: (1) tienen como referencia un esquema geoestructural regional común considerado a partir del mapa geológico 1:250.000; (2) se identifican a partir de unidades litoestratigráficas y tectónicas, considerando las relaciones geométricas y el tipo y grado de permeabilidad; (3) reconocimiento de unidades hidrogeológicas formadas por uno o más complejos, importantes a escala regional.

La definición de complejo hidrogeológico es coherente con el significado de unidad hidroestratigráfica de Maxey (1964) y es definido por Civita (1975 en Pantaleone et al., 2018) como un conjunto de litotipos con un tipo de permeabilidad predominante, un grado de permeabilidad en un intervalo limitado y respetando las relaciones geométricas recíprocas.

Se identificaron nueve (9) dominios y 39 complejos hidrogeológicos caracterizados según el tipo y grado de permeabilidad y el coeficiente de recarga (balance en unidades homogéneas). Los complejos se agrupan en cinco (5) categorías principales (Pantaleone et al., 2018):

1. Carbonatados Meso-Cenozoico: subdividido en tres (3) subgrupos: acuíferos de caliza, de dolomita y carbonatados (alternancia de caliza, caliza con chert, caliza margosa y margas).
2. Aluviales y epiclásticos Plio-Cuaternario: formados por depósitos de talus, aluviales, costeros y planicies intramontanas, caracterizados por explotación intensiva. Acuíferos heterogéneos y anisotrópicos debido a los diferentes mecanismos de depositación.

3. Volcánicos Plio-Cuaternario: depósitos de centros eruptivos con alto valor económico, permeabilidad asociada a fracturas y materiales porosos como depósitos piroclásticos. Las características hidráulicas de los acuíferos formados en rocas derivadas del enfriamiento de flujos de lava dependen del contenido de gases disueltos y el espesor del depósito. La parte menos profunda de los flujos de lava se caracteriza por una permeabilidad muy alta debido a la aparición difusa de brechas, grietas de enfriamiento abiertas y poros de desgasificación. En cambio, la parte central se caracteriza generalmente por una permeabilidad relativamente menor, principalmente relacionada con los conjuntos de juntas de enfriamiento. Estos acuíferos presentan rangos de conductividad hidráulica que van desde 10^{-8} a 10^1 m/s.
4. Cristalinos Paleozoicos: estos acuíferos no proporcionan suministros relevantes y el perfil de meteorización se puede dividir en tres (3) zonas:
 - a) El regolito constituye un acuífero superficial poroso formado por el saprolito (suelo residual) y depósitos transportados como coluviones y talus. El espesor de la zona meteorizada varía de pocos metros hasta 100 y 150 m, con mayor profundización en las zonas de falla.
 - b) Las rocas fracturadas de algunas decenas de metros de espesor se consideran un acuífero fracturado intermedio. El fracturamiento está controlado por esfuerzos tectónicos, procesos de descarga y expansión de minerales como la biotita (Lachassagne et al., 2011). Debido a la reducción en la densidad de las fracturas, la permeabilidad decrece con la profundidad (Dewandel et al., 2006; Maréchal et al., 2004).
 - c) Zona profunda donde las fracturas están limitadas a zonas de falla que se comportan como acuíferos individuales a escala local conectados con cuerpos regionales. La permeabilidad es menor debido al cierre de las fracturas por la presión litostática.
5. Terrígenos Meso-Cenozoicos: corresponden a sedimentos terrígenos depositados en cuencas marinas que forman acuíferos de menor relevancia. Turbiditas, desde arenisca hasta calcarenita, intercaladas con rocas desde lutitas hasta margas, con doble porosidad debido principalmente a fracturamiento. Según la abundancia de rocas finas, la permeabilidad varía de media a nula, es mayor en zonas superficiales debido a la existencia de regolito.

El Instituto Superior de Protección e Investigación del Medio Ambiente (ISPRA por sus siglas en italiano) cuenta con un manual de cartografía hidrogeológica en campo (ISPRA, 2018). En campo se caracterizan litología, estratigrafía, estructuras, procesos de meteorización, estado de la vegetación (ayuda a entender procesos de infiltración y evapotranspiración), geoformas cársticas y puntos de agua. Cerca del límite superficial entre complejos hidrogeológicos que tengan diferentes grados de permeabilidad relativa, se debe hacer un levantamiento detallado de la secuencia hidroestratigráfica (ISPRA, 2018).

1.1.5 Otros países

India cuenta con un atlas de sistemas acuíferos a escala 1:250.000 (Central Ground Water Board - CGWB, 2012), donde se presenta la extensión de sistemas acuíferos a lo largo del país con sus propiedades hidráulicas. La zonificación consta de dos (2) unidades, sistemas acuíferos principales (14), de mayor jerarquía y estos se dividen en acuíferos mayores (42). Los acuíferos mayores cubren todo el territorio y corresponden a diversos tipos de roca, entre ellas basaltos y rocas cristalinas. El atlas proporciona un resumen de la principal información disponible de cada uno de los acuíferos principales y mayores, como las propiedades hidráulicas y el espesor de la zona meteorizada.

En orden del área cubierta, la litología de los sistemas acuíferos mayores en India es: aluvial (31% del área del país), complejos neísicos y neises (20%), basalto (17%), arenisca (8%), shale (7%), caliza (2%) y un 15% de la superficie del país corresponde a acuíferos en esquisto, granito, charnoquita, condalita, lateritas y otras rocas intrusivas. El atlas cuenta con mapas de rendimiento potencial, conductividad eléctrica, fluoruros, nitratos, arsénico, estado (semi-crítico, crítico, sobre-explotado, salino) y profundidad del nivel freático pre-monsón y post-monsón.

Canadá está dividido en nueve (9) regiones hidrogeológicas (Sharpe et al., 2010) definidas a partir de varias características regionales con base en provincias geológicas mayores y formaciones de roca. Los principales parámetros identificados por Heath (1982 en Sharpe et al., 2010) que pueden ser correlacionados en y a través de las regiones y son: i) geología que controla características de calidad, almacenamiento y transmisividad; ii) topografía que permite establecer gradientes hidráulicos para flujos regionales, intermedios y locales; iii) excedentes o déficits de humedad a nivel regional según balance de agua o escorrentía anual promedio (descarga); iv) presencia de permafrost.

Se usaron cinco (5) capas cartográficas para delimitar los límites de las regiones hidrogeológicas, que incluyen (i) tres mapas geológicos, (ii) mapa de permafrost, (iii) excedentes y déficits de humedad usando la evapotranspiración, (iv) descarga anual o escorrentía total y (v) un mapa de coberturas de suelo que ilustra los principales cuerpos de agua superficial, hielo, nieve y patrones de vegetación que a largo plazo reflejan elementos climáticos regionales (precipitación y temperatura) (Sharpe et al., 2010).

Considerando que los principales patrones en el régimen de agua subterránea son el clima, la topografía y la geología (Sharpe et al., 2010), las regiones hidrogeológicas en Canadá corresponden a cordilleras, cuencas sedimentarias, escudos, tierras bajas y permafrost.

En países como **Polonia** y **Nigeria** se definen acuíferos mayores y estos se subdividen en acuíferos menores o locales (Alimi, n.d.; Herbich et al., 2010). En **Nigeria** la distribución de acuíferos es categorizada en dos (2) sistemas: basamento fluvio-volcánicos y sedimentarios, que se dividen en acuíferos principales: basamento, cuencas

sedimentarias, plateau volcánico y aluviones. Los acuíferos en basamento consisten en rocas cristalinas de grano grueso y rocas meta-sedimentarias arcillosas (Alimi, n.d.).

En **República Checa** la zonificación está conformada por provincias, regiones, zonas y acuíferos (Sima, n.d.). Las provincias representan un tipo de estructura geológica y, por lo tanto, una ocurrencia similar de agua subterránea (valle de rift, plateau volcánico, rocas sedimentarias, basamento y depósitos terciarios y cuaternarios). Las zonas de aguas subterráneas se basan en el concepto de flujo de aguas subterráneas y, en su mayoría, podría estar conectada a la extensión del acuífero, o con la cuenca del río en el caso de los acuíferos superficiales.

Una zona hidrogeológica se define como un área demarcada tectónica y geológicamente con similares condiciones hidrogeológicas en cuyo territorio predomina un cierto tipo de circulación de aguas subterráneas. Se define con base en la geología estructural, estratigrafía y litología; seguido de aspectos hidrogeológicos y sistemas de flujo de aguas subterráneas. La definición de las zonas se considera un proceso repetitivo que se actualiza con nuevo conocimiento (Sima, n.d.).

1.2 Hidrogeología en rocas cristalinas y volcánicas

Desde 1975 el Programa Hidrológico Internacional – IHP (*International Hydrological Programme*) de la UNESCO consideró el estudio de acuíferos en rocas cristalinas como uno de sus principales proyectos, con el objetivo de cubrir el vacío de conocimiento en esta parte de la hidrogeología (UNESCO, 1985). En 1985, la UNESCO publica el documento “Aguas subterráneas en rocas duras” basado principalmente en la experiencia del equipo encargado, en donde se describen las características hidrológicas asociadas a rocas duras fracturadas y alteradas, técnicas de investigación y algunos casos de exploración y explotación de acuíferos en estos materiales.

En cuanto a la caracterización hidrogeológica en ambientes de rocas cristalinas, se han realizado estudios en zonas donde este tipo de acuíferos juegan un papel relevante en términos de abastecimiento. Generalmente se clasifican como acuíferos en rocas cristalinas (*crystalline rocks aquifers*, *basement aquifers*) y en países como India puede haber subdivisiones dentro de estos.

Los acuíferos en basamento son más importantes en zonas tropicales y subtropicales donde ocurren procesos de meteorización profunda además de la presencia de rocas fracturadas, están presentes en regiones de África, el sur de Asia, Suramérica y Australia (Taylor & Howard, 1999; Wright & Burgess, 1992). Investigaciones realizadas en países como Malawi, Zimbabwe, Uganda y al sur de India, han mostrado que las propiedades hidrogeológicas de estos acuíferos están directamente relacionadas con el perfil de meteorización, encontrando que la zona más permeable corresponde a la base del saprolito y la parte superior de la roca meteorizada (Chilton & Foster, 1995; Foster, 1984;

Guihéneuf et al., 2014; Maréchal et al., 2018). Las características hidrogeológicas de la roca, incluyendo roca meteorizada y roca fresca, están relacionadas con las condiciones tectónicas que dan origen a sistemas de fracturas (Chilton & Foster, 1995; Wright & Burgess, 1992). El espesor saturado del suelo residual y el saprolito es el principal control para los pozos de suministro (Foster, 1984).

Se ha evidenciado que en África la ocurrencia y potencial acuífero en rocas volcánicas es extremadamente variable, se pueden comportar como acuíferos comparados con cuerpos cársticos (algunas lavas con cavidades y fisuras) hasta acuícludos (Foster, 1984).

La relación entre meteorización y permeabilidad es variable y compleja, la permeabilidad y rendimiento específico aumentan progresivamente durante los procesos iniciales de meteorización sin generación de minerales secundarios, posteriormente la descomposición a minerales arcillosos secundarios puede reducir los valores de estos parámetros (Wright & Burgess, 1992). Se espera que el tipo de roca ejerza el mayor control, por ejemplo, rocas ricas en cuarzo de grano grueso, desarrollan suelos de más alta permeabilidad. La mayoría de rocas esquistasas y zonas de alteración tectónica probablemente lleven a meteorización más profunda y suelos espesos, aunque la presencia de algunos productos secundarios pueden reducir la permeabilidad (Foster, 1984).

En las rocas cristalinas se ha observado una relación directa entre la permeabilidad y el fracturamiento, se espera que a menores espaciamentos entre fracturas mayor sea la permeabilidad, sin embargo, puede darse una relación inversa (Worthington et al., 2016).

Los procesos de meteorización también pueden aumentar la permeabilidad en rocas de silicatos y carbonatos, debido a las correlaciones positivas entre la permeabilidad y las concentraciones de soluto y las tasas de disolución (Worthington et al., 2016).

En países de latitudes más altas como Estados Unidos, Alemania y Francia se cuenta también con la presencia de acuíferos en rocas cristalinas. En Estados Unidos, están ubicados en varias regiones al noreste del país, el movimiento del agua se da a través de diaclasas, fracturas y fallas, y la disponibilidad se limita a las capas más superficiales ya que en profundidad la abertura de las discontinuidades es insignificante (USGS, 1992, 1995). En Alemania y Francia consisten principalmente en granito y neis, donde el flujo depende del espesor de los horizontes de meteorización, diaclasas y fracturas (Wendland et al., 2007).

1.2.1 Modelo conceptual de aguas subterráneas en rocas cristalinas

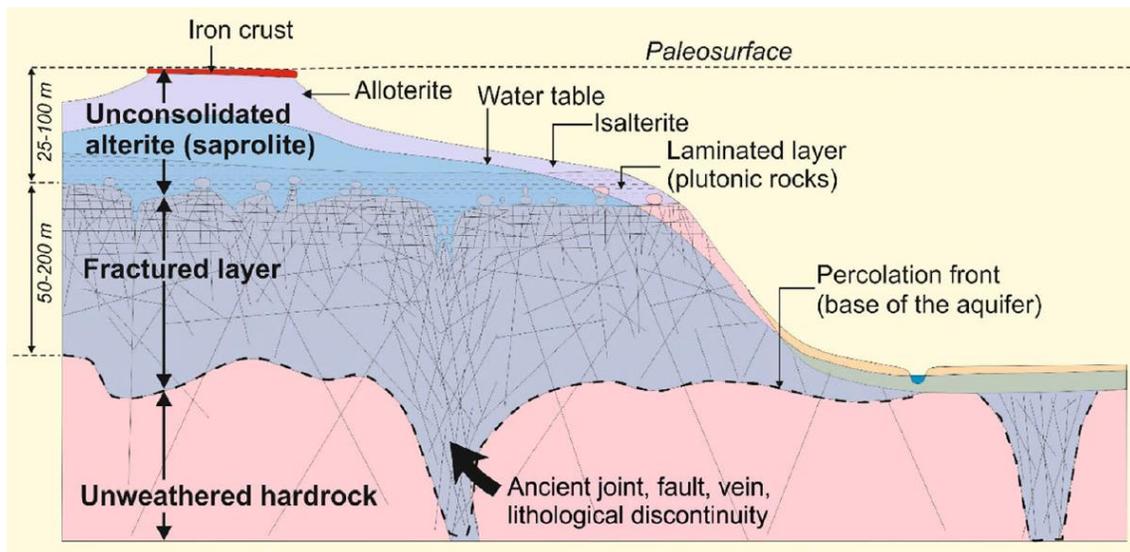
En las rocas cristalinas o rocas duras (*hard rocks*) se incluyen las rocas ígneas plutónicas y las rocas metamórficas a excepción del mármol que puede formar acuíferos cársticos

(Lachassagne et al., 2021). En los trabajos de Lachassagne (2008); Lachassagne et al. (2001, 2011, 2014a, 2014b, 2021), Dewandel et al. (2006), Belle et al. (2019) y Portal et al. (2017) se presenta un modelo conceptual de acuíferos en rocas cristalinas (*hard rock aquifer - HRA*), se consideran constituidos por dos (2) capas que forman un acuífero compuesto (*composite aquifer*), donde la conductividad hidráulica se debe a las fracturas originadas por procesos de meteorización.

En 2011, Lachassagne et al. demuestran que la permeabilidad en acuíferos en rocas duras no se debe a la tectónica, ni a procesos de descarga sino a la meteorización y que las fracturas subhorizontales son resultado, principalmente, de la expansión de minerales como la biotita.

Estos acuíferos se desarrollan en los 100 primeros metros de profundidad en el perfil de meteorización. El modelo conceptual consta de tres (3) capas (Figura 1-4), descritas a continuación de techo a base (Lachassagne et al., 2021). Los acuíferos están constituidos por las dos (2) primeras capas.

Figura 1-4. Modelo conceptual de un perfil de meteorización parcialmente erosionado en rocas duras (erosión parte derecha de la figura), que muestra las tres capas del modelo conceptual de aguas subterráneas en rocas cristalinas.



Fuente: tomado de Lachassagne et al. (2021).

Saprolito: de baja permeabilidad, se divide en aloterita (arcilloso, sin evidencia de la roca parental) e isalterita (preserva la estructura de la roca, el espesor es la mitad o 2/3 de todo el saprolito). El saprolito tiene una función capacitiva (contener agua). En rocas plutónicas como granitos y gabros, en la base del saprolito puede formarse una “capa laminada” con textura clástica de grano grueso y una laminación de fractura horizontal densa de escala

milimétrica que atraviesa los minerales más grandes, pero conservando la estructura original (Lachassagne et al., 2021).

SFL (*stratiform fractured layer*): capa fisurada, caracterizada por el denso fracturamiento en los primeros metros que decrece con la profundidad. Las fracturas son inducidas por la expansión de algunos minerales (comúnmente biotita) y son principalmente subhorizontales en rocas graníticas y verticales en rocas foliadas (Lachassagne et al., 2021). En rocas graníticas se considera que la permeabilidad horizontal (K_{xy}) es 10 mayor que la vertical (K_z) (Maréchal et al., 2004).

En ocasiones el tope de la SFL y/o la base del saprolito (coexisten bloques y saprolito) se nombra como *saprock* (transición suelo-roca). La densidad de las fracturas decrece hacia la base de la capa y la permeabilidad se reduce, no por la presión litostática sino porque las fracturas desaparecen. El espesor de la capa fisurada es aproximadamente dos o tres veces mayor que la del saprolito (Dewandel et al., 2006) y tiene una función transmisiva (paso de agua).

Basamento fresco: se considera permeable solo en las zonas de fracturas profundas, en la periferia o dentro de las discontinuidades geológicas preexistentes (juntas, diques, vetas, contactos litológicos, etc.). Para objetivos de extracción de recursos hídricos se considera impermeable con una capacidad de almacenamiento insignificante (Maréchal et al., 2004).

Con este modelo conceptual los HRA pueden considerarse como acuíferos continuos. Es posible mapear (o modelar en tres (3) dimensiones) la geometría y las propiedades físicas de las capas constituyentes: saprolito, con propiedades hidrodinámicas principalmente capacitivas y SFL, principalmente transmisivas pero también propiedades capacitivas (Dewandel et al., 2006; Lachassagne et al., 2001; Wyns et al., 2004).

La definición y descripción del modelo conceptual se basa principalmente en observaciones en rocas graníticas en países de África, Francia y Guyana Francesa, pero se consideran también trabajos en gabros, peridotitas, esquistos y neises en distintas regiones del mundo.

El trabajo de estos autores demuestra que la meteorización es el principal proceso que impulsa la creación de fracturas y la formación de acuíferos en rocas duras. Por décadas se ha descrito el papel de la meteorización, pero principalmente en la parte inconsolidada del perfil de meteorización y solo en los últimos 15 años se ha demostrado que la capa fisurada (SFL) está también vinculada a los mismos procesos de meteorización, con observaciones en Francia, Corea del Sur, Burkina Faso y otros países de África, Guyana Francesa, Madagascar y otros (Lachassagne et al., 2021). De manera directa o indirecta se había confirmado por trabajos de otros autores en los países ya mencionados además

de Portugal, Irlanda, Dinamarca, Suecia, España, Europa central y mediterránea, Taiwan, Australia y Norte América (Lachassagne et al., 2021).

1.2.2 Rocas volcánicas

Debido al tipo de volcanismo, los eventos y la distancia a áreas activas, las propiedades hidrogeológicas de las rocas volcánicas son altamente variables, asociadas a los vacíos originados por burbujas de gas o el agrietamiento producido por el flujo de lavas semi-endurecidas y el enfriamiento de masas calientes agua (Custodio, 2003).

Las características hidráulicas de los acuíferos formados en rocas derivadas del enfriamiento de flujos de lava dependen del contenido de gases disueltos y el espesor del depósito. La parte menos profunda de los flujos de lava se caracteriza por una permeabilidad muy alta debido a la aparición difusa de brechas, grietas de enfriamiento abiertas y poros de desgasificación. En cambio, la parte central se caracteriza generalmente por una permeabilidad relativamente menor, principalmente relacionada con los conjuntos de juntas de enfriamiento (Pantaleone et al., 2018).

La permeabilidad puede variar hasta siete (7) órdenes de magnitud desde ignimbritas densamente fundidas hasta brechas recientes. La porosidad y la permeabilidad pueden cambiar por el fracturamiento y especialmente por la alteración que tiende a reducir dramáticamente la conductividad hidráulica en zonas afectadas por fluidos hidrotermales e inyección de magma (Custodio, 2003).

Las rocas volcánicas ácidas, como las riolitas y las traquitas, suelen ser más masivas que los basaltos y, por lo tanto, tienen menor porosidad y permeabilidad, con algunas excepciones (Singhal & Gupta, 2010). Las diversas aberturas que imparten porosidad y permeabilidad a las rocas basálticas son (a) escorias, (b) zonas de brechas entre flujos, (c) cavidades entre flujos de lava pahohoe, (d) grietas por contracción, paralelas a las superficies de flujo o juntas columnares, (e) vesículas de gas, (f) tubos de lava y (g) fracturas y lineamientos (Stearns 1942; UNESCO 1975 en Singhal & Gupta, 2010).

Otros espacios de interflujo también pueden impartir permeabilidad, como las juntas laminares y columnares formadas debido al enfriamiento, otras fracturas y lineamientos producidos como resultado de la actividad tectónica posterior (Singhal & Gupta, 2010). La permeabilidad horizontal es varias veces mayor que la vertical debido a la presencia de espacios entre flujos y fracturas horizontales, la unión columnar puede impartir una alta conductividad vertical (Singhal & Gupta, 2010).

Los flujos basálticos en las islas volcánicas suelen ser delgados pero forman los principales acuíferos debido a su alta permeabilidad (Singhal & Gupta, 2010). Se conocen tres (3) modelos conceptuales de acuíferos en ambientes basálticos de islas oceánicas: modelo Hawaiano (Peterson, 1972 y McDonald et al., 1983 en Lachassagne et al., 2014), modelo islas Canarias (Custodio et al., 1983, 1988; Custodio, 1989 en Lachassagne et al., 2014) y

modelo Mayotte (Lachassagne et al., 2014), se caracterizan por la presencia de acuíferos basales y/o colgados. En el ambiente de rift o de fracturamiento generalmente se presenta mayor variabilidad litológica, generando mayores variaciones laterales y verticales en la estructura y propiedades hidrodinámicas (Fenta et al., 2020).

A partir de investigaciones realizadas en África se ha concluido que los factores más importantes para el desarrollo de acuíferos dentro de rocas volcánicas son los siguientes (Kehinde & Loenhert, 1989 y Vernier, 1993 en MacDonald & Davies, 2000):

- Los paleosuelos gruesos o el material piroclástico suelto entre los flujos de lava suelen ser muy permeables.
- Las juntas y fracturas debido al rápido enfriamiento de la parte superior de los flujos de lava proporcionan importantes vías de flujo.
- El contacto entre los flujos de lava y las rocas sedimentarias o el material volcánico anterior, como domos, etc., a menudo están muy fracturados y contienen mucha agua subterránea.
- Las burbujas de gas dentro de los flujos de lava y la porosidad dentro de las cenizas y aglomerados pueden proporcionar un importante almacenamiento de agua subterránea.

Las rocas extrusivas más antiguas exhiben una erosión más profunda, lo que implica una cubierta vegetal y de suelo más gruesa (Singhal & Gupta, 2010). Los minerales en rocas volcánicas son inestables en la superficie y por lo tanto no son fácilmente meteorizados por el agua (Custodio, 2003).

La lava ácida es viscosa y, por lo tanto, de extensión restringida, en contraste con la lava básica de viscosidad relativamente más baja. En rocas volcánicas jóvenes debido a la alta porosidad y permeabilidad, el drenaje superficial es ausente (Singhal & Gupta, 2010).

1.2.3 Patrones de meteorización

Como se ha descrito, el potencial hidrogeológico de las rocas cristalinas está asociado a los perfiles de meteorización y al grado de fracturamiento. Los procesos de meteorización afectan de manera desigual a los diferentes tipos de roca, la profundidad de la meteorización depende de la roca parental, el clima, el tiempo de exposición, agentes biológicos y la topografía (González de Vallejo et al., 2002; Tarbuck et al., 2005).

El clima se considera el factor más influyente en la formación del suelo, las variaciones de temperatura y de precipitaciones determinan si predominará la meteorización química o la mecánica, por ejemplo, un clima cálido y húmedo puede producir una potente capa de suelo meteorizado químicamente en el mismo tiempo que un clima frío y seco produce un fino manto de derrubios físicamente meteorizados (Tarbuck et al., 2005).

La topografía tiene una fuerte influencia, en áreas de pendientes fuertes y montañosas los suelos son bien drenados con un componente fuerte de flujo hacia abajo y la formación de minerales arcillosos es baja, por otro lado, en zonas de pendiente suave los suelos tienden a ser pobremente drenados y están asociados a alta actividad de minerales arcillosos (Wesley, 2010).

Los minerales formadores de cada tipo de roca determinan los minerales residuales que quedan después de la meteorización (Huat et al., 2012). Los productos de meteorización de algunas rocas comunes se listan en la Tabla 1-4.

Tabla 1-4. Productos de la meteorización en algunas rocas comunes.

Tipo de roca		Producto
Ígneas	Granito	Cuarzo (arena) y minerales arcillosos
	Basalto	Minerales arcillosos
Sedimentarias	Shale	Minerales arcillosos
	Arenisca	Cuarzo (arena)
	Caliza	Iones disueltos y partículas residuales tamaño arcilla
Metamórficas	Metasedimentos (esquisto, filita, anfibolita, pizarra)	Minerales arcillosos, limo micáceo y partículas tamaño arcilla
	Neis, granulita y otras rocas ricas en cuarzo	Cuarzo (arena)

Fuente: tomado de Huat et al. (2012).

1.2.3.1 Rocas plutónicas

En estas rocas es común que queden bloques de roca relativamente inalterados dentro de la masa descompuesta, la descomposición ocurre a lo largo de las juntas formando bloques meteorizados esferoidalmente. Generalmente, el cuarzo permanece como arena, mientras los feldespatos y mica se convierten en arcillas (Suárez, 2009).

En rocas ígneas intrusivas ácidas (con gran contenido de cuarzo) como el granito, se forman perfiles profundos, arenos arcillosos y en las rocas básicas (poco cuarzo) se forman perfiles menos profundos y más arcillosos (Suárez, 2009). La profundidad del perfil depende también de la pendiente del terreno, en las pendientes altas, son poco profundos y los materiales tienden a ser granulares, por otro lado en zonas de pendiente suave, los perfiles tienden a ser más profundos con materiales más arcillosos (Suárez, 2009).

1.2.3.2 Rocas volcánicas

Los perfiles de meteorización en los suelos de origen volcánico, son similares en su apariencia general con respecto a los suelos de origen ígneo intrusivo; pero en este caso, las discontinuidades tienden a ser horizontales y verticales (Suárez, 2009). Se pueden presentar altos contrastes de permeabilidad que conducen a la formación de acuíferos colgados (Suárez, 2009).

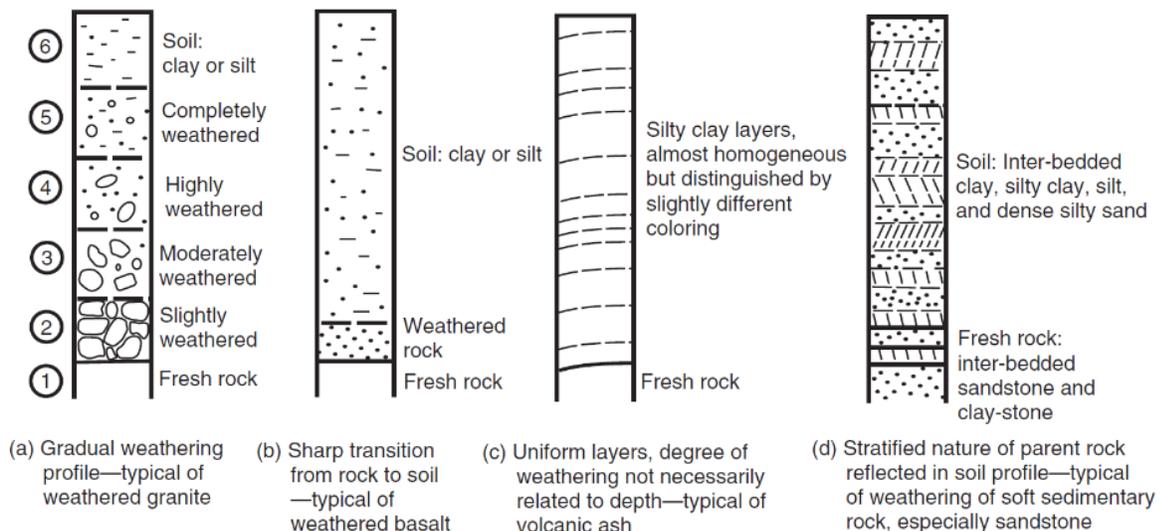
Los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan relaciones de vacíos muy elevadas y porosidades muy altas (Suárez, 2009). Los basaltos se descomponen fácilmente a arcillas, cuando se encuentran cercanos a la superficie, ocurren procesos de expansión y la roca se va desintegrando (Suárez, 2009).

1.2.3.3 Rocas metamórficas

La profundidad del perfil de meteorización depende, al igual que en las rocas ígneas, del relieve, el clima, la litología y la estructura, es común que se genere microfisuramiento de la roca (Suárez, 2009). Los neises meteorizan generalmente a arenas de grano medio, micáceas, en perfiles menos profundos que los de un granito, pero de comportamiento muy similar (Suárez, 2009).

En la Figura 1-5 se presentan algunos perfiles de suelo residual representativos. En este caso el perfil de rocas graníticas (Moye, 1955; Little, 1969 en Wesley, 2010) se divide en seis (6) zonas dependiendo del grado de meteorización.

Figura 1-5. Perfiles de suelo residual representativos en rocas comunes.



Fuente: tomado de Wesley (2010).

1.3 Sensores remotos

Los sensores remotos se consideran una herramienta útil para la exploración regional y local de agua subterránea, combinados con herramientas SIG y metodologías de análisis jerárquico, factores de influencia múltiple, bosques aleatorios (*random forests*), entre otras (Krishnamurthy et al., 1996; Kumar et al., 2007; Nag & Chowdhury, 2019; Rahmati et al., 2015; Razandi et al., 2015). En la mayoría de los casos, la información obtenida de sensores remotos se usa en el análisis de características morfológicas, hidrológicas y

geológicas que gobiernan las condiciones subsuperficiales, dichas características se reúnen en dos (2) categorías, indicadores de primer orden (directos) y de segundo orden (indirectos) como se listan a continuación (Singhal & Gupta, 2010):

Indicadores de primer orden o directos:

- Características asociadas a zonas de recarga; ríos, canales, lagos, entre otros
- Características asociadas a zonas de descarga; manantiales, entre otros
- Humedad del suelo
- Vegetación (anomalías)

Indicadores de segundo orden o indirectos:

- Topografía
- Geoformas
- Profundidad de meteorización y regolito
- Litología
- Estructuras geológicas
- Lineamientos, diaclasas y fracturas
- Fallas y zonas de cizalla
- Tipo de suelo
- Humedad del suelo
- Vegetación
- Características de los drenajes
- Características geológicas especiales como carst, abanicos aluviales, diques y arrecifes.

Ambos tipos de indicadores están relacionados con el régimen de agua subterránea, mientras los de primer orden se relacionan directamente, los de segundo orden corresponden a parámetros hidrogeológicos que dan indicios regionales (Singhal & Gupta, 2010). Según los alcances de este trabajo, los indicadores de mayor interés corresponden a lo relacionado con estructuras geológicas para determinar densidad de fracturamiento, profundidad de meteorización y humedad del suelo como indicador de la presencia de agua en el subsuelo. En este último caso se puede usar directamente el componente de agua subterránea derivado de los datos de la misión GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*).

1.3.1 Espesor del regolito

En este caso, la variable de estudio constituye el regolito, ya que las aplicaciones se refieren al espesor del material no consolidado que reposa sobre el macizo rocoso, sea de origen transportado o *in situ*.

La distribución espacial de los afloramientos de rocas duras dan una idea del espesor del suelo, que está relacionado con la forma del terreno, siendo más probable que sea mayor en laderas y valles bajos (Singhal & Gupta, 2010). Para obtener información del espesor

probable se ha utilizado el estudio de fotografías aéreas y composiciones de color infrarrojo (CIR) de imágenes multiespectrales (Singhal & Gupta, 2010).

De la información revisada se tiene que, en la obtención de información del espesor probable de suelo usando imágenes satelitales o modelos de elevación digital, se han usado técnicas que requieren emplear y analizar datos adicionales como las coberturas vegetales y usos del suelo (Kuriakose et al., 2009), además de puntos de control en campo o métodos indirectos como geoelectrónica (Shafique, van der Meijde, & Rossiter, 2011; Shafique, van der Meijde, & Ullah, 2011).

1.3.2 Densidad de drenajes

De acuerdo con Strahler (1957), la densidad de drenaje es una expresión de la proximidad del espaciamiento de los canales, lo que proporciona una medida cuantitativa de la longitud de la corriente dentro de una cuadrícula del área en términos de km/km^2 . La densidad de drenaje es una función inversa de la permeabilidad, cuanto menos permeable es una roca, menor es la infiltración de la lluvia, dando lugar a un sistema de drenaje fino y bien desarrollado (Chowdhury et al., 2010; Razandi et al., 2015).

A mayor densidad de drenaje, menor tasa de infiltración y por lo tanto mayor escorrentía, mientras que a las áreas de baja densidad se asocian una tasa de infiltración alta (Krishnamurthy et al., 1996; Kumar et al., 2007; Prasad et al., 2008; Rahmati et al., 2015; Razandi et al., 2015). Las áreas con menor densidad de drenaje se relacionan entonces con mayor potencial de agua subterránea y mayor probabilidad de recarga (Chowdhury et al., 2010; Krishnamurthy et al., 1996; Kumar et al., 2007; Prasad et al., 2008).

En los estudios enfocados en delimitar zonas con potencial de agua subterránea, la red de drenaje generalmente se extrae de un modelo de elevación de terreno y el mapa de densidad de drenaje se genera utilizando la densidad de línea en las herramientas de análisis espacial de software SIG (Das & Singh, 2016) o usando la ecuación (1.1) de acuerdo con Greenbaum (1989 en Das & Singh, 2016), donde la cantidad de densidad de drenaje se define como la relación entre la suma de las longitudes de los arroyos y el tamaño del área de la cuadrícula. Así que una vez definida la malla, se calcula el índice de densidad de drenaje.

$$Dd = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{Di}{A} (km/km^2) \quad (1.1)$$

Donde $\sum Di$ es la longitud total de todos los arroyos en la malla i (km) y A es el área de la cuadrícula (grid) (km^2). Luego, a partir del valor obtenido para cada celda se genera un mapa de densidad de drenaje superficial mediante una técnica de interpolación (Rahmati et al., 2015; Razandi et al., 2015). Asimismo, comúnmente se usan las herramientas

disponibles en los software SIG para calcular la densidad de líneas en una capa de entrada con esta geometría (Das & Singh, 2016; El-Naqa et al., 2009).

1.3.3 Densidad de lineamientos

Por lo general, los lineamientos representan zonas de fractura, están asociados con zonas de mayor meteorización, mayor cobertura del suelo, vegetación más densa, mayor humedad y alineaciones de valles (Singhal & Gupta, 2010), su estudio es particularmente útil en terrenos de rocas cristalinas o calizas, cuyo flujo de agua está limitado a la permeabilidad secundaria asociada a fracturamiento y zonas meteorizadas (Meijerink, 1996). Las discontinuidades pueden observarse en fotografías aéreas, imágenes de satélite y modelos de elevación digital, el mapeo de lineamientos y fallas se puede hacer en todo tipo de imágenes de teledetección (Singhal & Gupta, 2010). Los mapas de densidad de lineamientos se pueden combinar con otros parámetros, como la densidad de drenaje, donde la alta densidad de fracturamiento y una menor densidad de drenaje implican mayor infiltración (Singhal & Gupta, 2010).

Debido a que las características estructurales juegan un papel importante en la infiltración y el movimiento del agua subterránea (Chilton & Foster, 1995; Meijerink, 1996), la identificación de lineamientos es uno de los parámetros más usados en la delimitación de zonas con potencial de agua subterránea (Díaz-Alcaide & Martínez-Santos, 2019), considerando que ejercen control sobre el movimiento y almacenamiento del agua (Das & Singh, 2016).

Ahmadi & Pekkan (2021) listan las técnicas usadas en detección de lineamientos usando sensores remotos: extracción manual, semi-automática y automática. En el primer caso se usan técnicas de mejora de las imágenes, filtros y análisis multibanda para trazar los lineamientos manualmente. En la extracción semi-automática, además de las técnicas de mejora y filtrado, se aplican algoritmos de clasificación basada en objetos, segmentación, STA (*segment tracing algorithm*), transformada de *Hough* o softwares desarrollados para esto, entre otros. La extracción automatizada de lineamientos se realiza con algoritmos diseñados para operar a través de un paquete de software y producir un mapa de lineamientos final en formato vectorial. Estos algoritmos tienen en cuenta el ruido, el umbral, el tamaño y la orientación de las características lineales (Joshi, 1989) e incluyen técnicas de mejora, filtrado y detección de bordes (Ahmadi & Pekkan, 2021).

Existen varios algoritmos que extraen automáticamente los lineamientos, por ejemplo, *Hough Transform* (Cross, 1988), *Lineament Extraction* y *Stripe Statistical Analysis* (LESSA) (Zlatopolsky, 1992), algoritmo de seguimiento de segmentos (STA) (Koike et al., 1995), algoritmo Canny (Marghany & Hashim, 2010), ADALGEO (Soto-Pinto et al., 2013), TecLines (Rahnama & Gloaguen, 2014) o detección y análisis de lineamientos (LINDA) (Masoud & Koike, 2017). En los últimos años, el módulo LINE del software PCI Geomatica se ha convertido en una herramienta de uso común (Ahmadi & Pekkan, 2021).

El inconveniente con los métodos automatizados es que los lineamientos extraídos pueden no corresponder con estructuras geológicas, por lo que el usuario debe evaluar los resultados (Ahmadi & Pekkan, 2021). El mapeo de lineamientos manual ha sido criticado por su confianza en la intuición, conduciendo a resultados irrepetibles (Díaz-Alcaide & Martínez-Santos, 2019). La reproducibilidad puede incrementarse comparando e integrando los resultados obtenidos por varios operadores en la misma área o utilizando métodos automatizados (Ahmadi & Pekkan, 2021; Díaz-Alcaide & Martínez-Santos, 2019; Ramli et al., 2010). Tanto los métodos manuales como automatizados presentan inconvenientes prácticos, así que, una combinación de los dos sería el enfoque más recomendable para suavizar las inconsistencias (Ahmadi & Pekkan, 2021; Díaz-Alcaide & Martínez-Santos, 2019; Meijerink et al., 2007).

Los modelos de elevación digital se encuentran dentro de los datos típicamente usados en la detección de lineamientos geológicos (Ahmadi & Pekkan, 2021), siendo particularmente útiles las imágenes de relieve sombreados (Abdullah et al., 2010; Das & Singh, 2016). Después de tener los lineamientos trazados se pueden usar herramientas SIG para determinar la densidad de entidades lineales de acuerdo con la longitud por unidad de área (km/km^2), como se mencionó en el caso de la densidad de drenajes.

1.3.4 Cambios en el almacenamiento de agua subterránea poco profunda en GLDAS versión 2.2 - misión GRACE

Un indicador no mencionado por Singhal & Gupta (2010) y que también se puede relacionar con el potencial hidrogeológico de una región es el cambio en almacenamiento de agua en el suelo, este indicador se puede obtener procesando los datos obtenidos por las misiones satelitales **GRACE** (marzo de 2002 a octubre de 2017) y **GRACE-Follow On** (mayo de 2018 hasta la actualidad) son una colaboración entre la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR), que miden anomalías en la gravedad y estas pueden ser convertidas a cambios en altura equivalente de agua permitiendo medir cambios mensuales en el almacenamiento de agua terrestre (Rodell & Famiglietti, 1999), estos datos han sido aplicados para calcular niveles de estrés en los acuíferos (Richey et al., 2015), para monitorear cambios en el almacenamiento, agotamiento y recarga de acuíferos (Abdelmohsen et al., 2019; Ahmed & Abdelmohsen, 2018; Awange et al., 2014; Frappart & Ramillien, 2018; Henry et al., 2011; Mohamed, 2019; Mohamed et al., 2017; Scanlon et al., 2012; B. F. Thomas et al., 2017; Wu et al., 2019), usualmente se combinan los datos de la misión GRACE con información aportada por otros sensores, simulada y/o información primaria de las zonas.

Estos datos también han sido utilizados en Colombia, por ejemplo L. A. Gómez (2017) analizó la variación espacial y temporal del almacenamiento de agua en el suelo para las cuencas Cauca-Magdalena y Orinoco; Guarín & Poveda (2013) calcularon las variaciones de humedad en el suelo y del espesor equivalente de agua de GRACE para cinco (5) regiones climáticas en el país; Ospina & Vargas (2018) correlacionaron los cambios en el

almacenamiento de agua en el suelo y niveles de agua subterránea con cambios en infiltración y recarga en los Llanos Orientales y Bolaños et al. (2021) evaluaron el desempeño de los productos GRACE en la representación de la dinámica de almacenamiento de agua en la cuenca Cauca-Magdalena, analizaron tendencias a largo plazo y concluyeron que el almacenamiento de agua terrestre y de agua subterránea se ha ido agotando gradualmente en la cuenca desde finales de 2010.

Con la misión GRACE inició una nueva era para el monitoreo de almacenamiento de agua vía sensores remotos (Rodell & Famiglietti, 2002). Las misiones satelitales GRACE consisten cada una en un par de satélites separados unos 220 km, mientras orbitan alrededor de la Tierra la distancia entre ellos es afectada por anomalías en la gravedad, con base en fundamentos físicos la distancia entre los satélites gemelos es convertida en gravedad o concentración en masa y estas variaciones en la gravedad se pueden interpretar como cambios en el almacenamiento de aguas terrestres (*terrestrial water storage* - TWS) debido a que los desplazamientos de agua en el subsuelo, en el océano y en la atmósfera generan cambios sutiles en la gravedad de la Tierra (Mehta et al., 2020).

Los datos GRACE son distribuidos por tres centros de investigación: GFZ (*German Research Centre for Geosciences*), CSR (*University of Texas Center for Space Research*) y JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), que ofrecen diferentes soluciones y resoluciones espaciales. Los datos de agua terrestre (TWS) se presentan en centímetros equivalentes al grosor de la cantidad de agua, que corresponden a anomalías mensuales con una resolución espacial nativa de cuadrículas de 300 - 400 km (~150.000 km²). Se estima que los errores resultantes en las anomalías mensuales de TWS son de 2 a 3 cm en resolución de 1° * 1° (Landerer & Swenson, 2012). GRACE no tiene una resolución vertical, no puede separar entre la porción de agua almacenada como agua, nieve, humedad del suelo o agua subterránea (ARSET, n.d.).

Las aguas terrestres son una suma de las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas. GRACE mide la columna total de aguas terrestres (TWS) y no puede distinguir entre agua almacenada como nieve, humedad del suelo o agua subterránea (Mehta et al., 2020). Para obtener una disgregación vertical de las mediciones de GRACE se usan modelos de superficie terrestre como **GLDAS** (*Global Land Data Assimilation System*) o datos *in situ*, a partir del balance de agua terrestre (ecuación (1.2)) (Richey et al., 2015; Rodell et al., 2007; Scanlon et al., 2012; B. F. Thomas et al., 2017) para obtener los valores de ΔSM , ΔSWE y ΔSW .

$$\Delta TWS = \Delta GW + \Delta SM + \Delta SWE + \Delta SW \quad (1.2)$$

Donde, ΔTWS : cambio en el almacenamiento de aguas terrestres (de GRACE); ΔGW : cambio en el almacenamiento de aguas subterráneas; ΔSM : cambio en la humedad del suelo; ΔSWE : cambio en el equivalente en agua de la nieve; ΔSW : cambio en el almacenamiento de aguas superficiales.

El sistema de asimilación de datos terrestres mundiales - GLDAS (Rodell et al., 2004) integra observaciones terrestres y satelitales dentro de modelos numéricos para producir campos consistentes de alta resolución de estados y flujos de la superficie terrestre. Usa datos de MODIS, TRMM, GOES y el sistema de información terrestre LIS (*Land Information System*) con diferentes fuentes de insumos: análisis meteorológico, radiación solar superficial, precipitación, textura del suelo, clasificación de la vegetación e índice de área foliar y topografía (Mehta, n.d.). GLDAS tiene cuatro (4) modelos de superficie terrestre: Noah, *Catchment (CLSM)*, *Community Land Model (CLM)*, y *Variable Infiltration Capacity (VIC)*, los productos integrados incluyen precipitación, humedad del suelo, evapotranspiración, escorrentía superficial/subsuperficial, velocidad del viento, entre otras (Rui & Beaudoin, 2021).

Este sistema de asimilación de datos permite mejorar la escala (*downscaling*) y descomponer los datos de GRACE en los distintos componentes de almacenamiento (A. C. Thomas et al., 2014). En la versión 2.2 (febrero 2020) del GLDAS están asimilados los datos GRACE proporcionados por el CSR (Li et al., 2019) y los productos de TWS y agua subterránea (*groundwater storage - GWS*) se encuentran separados y disponibles con resolución de $0,25^{\circ} * 0,25^{\circ}$ y a escala diaria (Rui & Beaudoin, 2021). Debido a la resolución gruesa de los datos originales de GRACE, dos cuadrículas adyacentes podrían no incluir estimaciones independientes (Mehta et al., 2020).

1.4 Antecedentes de zonificación hidrogeológica en Colombia

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha realizado la cartografía hidrogeológica a nivel nacional desde 1977 a escalas que varían desde 1:3.000.000 hasta 1:500.000. En la página web de la entidad se puede acceder a estos estudios, la geología base empleada en cada caso se describe a continuación: **(i)** para el mapa hidrogeológico de 1977 (1:3.000.000) (INGEOMINAS, 1977) no está disponible la memoria técnica, en el mapa no se especifica la información base; **(ii)** el mapa hidrogeológico realizado entre 1987 y 1989 sí cuenta con el documento (versión 1987), la geología base utilizada fue una publicación adelantada por INGEOMINAS en escala 1:1.500.000 (INGEOMINAS, 1987); **(iii)** en 1984 el Departamento Nacional de Planeación (DNP) contrató la elaboración del mapa hidrogeológico a escala 1:500.000, elaborado para las 26 planchas que cubren el país, aunque el documento técnico no está disponible, en los mapas se cita que se utilizó la geología local y el mapa geológico de Colombia de 1976 a escala 1:1.500.000 (DNP, 1983); **(iv)** la geología base para el Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia corresponde al mapa crono-estratigráfico también publicado por INGEOMINAS a escala 1:500.000 (INGEOMINAS, 2004a); **(v)** finalmente, el Mapa litoestratigráfico con permeabilidades evalúa cualitativamente la capacidad de almacenar y permitir el flujo de las unidades crono-estratigráficas del Mapa Geológico de Colombia de 2007 a escala 1:500.000 (INGEOMINAS, 2011).

En el Estudio Nacional del Agua - ENA 2010 (IDEAM, 2010), el IDEAM publica la zonificación de provincias hidrogeológicas, posteriormente en el ENA 2014 (IDEAM, 2015a) se presentó la primera delimitación de 61 sistemas acuíferos construida a partir de información levantada por distintas entidades y en el ENA 2018 (IDEAM, 2019) se refinó la cartografía de los sistemas acuíferos, se actualizó la información de ocho (8) sistemas y se agregó uno (1) nuevo, para un total de 62 sistemas acuíferos delimitados, de los cuales 56 cuentan con descripciones en las denominadas “fichas síntesis de sistemas acuíferos”.

En otras de sus publicaciones, el IDEAM (2013a, 2015b) describe la **zonificación hidrogeológica del país** comprendida en dos (2) niveles: provincias hidrogeológicas y sistemas acuíferos. Las provincias corresponden a las publicadas en el ENA del 2014 (IDEAM, 2015a), delimitadas con base en las cuencas sedimentarias de Barrero et al. (2007), los resultados del ENA 2010 (IDEAM, 2010) y el trabajo realizado por Vargas (2001, 2005, 2006) (IDEAM, 2015b). Dentro de los sistemas acuíferos descritos en los ENA 2014 y 2018 (IDEAM, 2015a, 2019) se encuentran algunos conformados por unidades geológicas asociados a actividad volcánica como abanicos, formaciones vulcano-sedimentarias e incluso rocas ígneas y metamórficas como en el caso del sistema acuífero de Santa Marta, aunque no se encuentra muy bien caracterizado, en el sistema acuífero del Valle de Aburrá se menciona la Dunita de Medellín como una unidad con potencial al igual que el saprolito del Batolito Antioqueño en el sistema acuífero del Valle de San Nicolás y La Unión.

En la Tabla 1-5 se listan los principales estudios y mapas hidrogeológicos de ámbito nacional, agrupados por autor con algunas observaciones sobre su cubrimiento. Esta tabla no incluye los estudios específicos que han permitido la definición de los 62 sistemas acuíferos.

Tabla 1-5. Estudios y mapas hidrogeológicos que han sido realizados en Colombia con cobertura nacional.

Autor	Producto	Año	Publicación	Observación
Vargas, N.O.	Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia a escala 1:1.200.000	2001	Monografía (Universidad Nacional Sede Bogotá)	Disponible solo para consulta en biblioteca, no está permitida la duplicación o reprografía.
	Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia a escala 1:1.200.000	2001	Presentación disponible en http://gisweb.ciat.cgiar.org/website/googleearth/LLANOS/reunion/Savanas/DOCUMENTACION/Presentacin%20mar%20Vargas-UN.pdf	Mapa de cuencas (16) y regiones (12) hidrogeológicas; mapa de provincias hidrogeológicas (12) .
	Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia	2005	Disponible en la página web del IDEAM	Descripción de cuencas (16) y regiones (12) hidrogeológicas.

Tabla 1-5. Estudios y mapas hidrogeológicos que han sido realizados en Colombia con cobertura nacional.

Autor	Producto	Año	Publicación	Observación
	Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia	2006	Boletín Geológico y Minero, volumen 117, número 1	Descripción y mapa de cuencas (16) hidrogeológicas, mapa de unidades hidroestratigráficas.
IDEAM	Provincias hidrogeológicas	2010	Estudio Nacional del Agua 2010	Descripción y mapa de 16 provincias hidrogeológicas .
	Provincias hidrogeológicas y sistemas acuíferos	2015	Estudio Nacional del Agua 2014	Mapa de 16 provincias hidrogeológicas, descripción y mapa de 61 sistemas acuíferos.
	Sistemas acuíferos	2019	Estudio Nacional del Agua 2018	Actualización de sistemas acuíferos (62).
IGAC	Regiones hidrogeológicas 1:5.000.000	2002	Regiones hidrogeológicas 1:5.000.000	Mapa de regiones hidrogeológicas (permeabilidad relativa) a partir de INGEOMINAS (1989).
DNP	Mapa hidrogeológico general Colombia 1:500.000	1983	Mapa hidrogeológico, escala 1:500.000	Planchas 01 a 19 (1:500.000). Faltan planchas 20 a 26.
SGC (INGEOMINAS)	Mapa hidrogeológico de Colombia	1977	Mapa hidrogeológico, escala 1:3.000.000	
	Estudio hidrogeológico Colombia versión 1986	1986	Mapa hidrogeológico, escala 1:2.500.000	
	Mapa hidrogeológico de Colombia 1:2.500.000 (1987-1989)	1989	Mapa hidrogeológico 1:2.500.000, 1987 y 1989; memoria 1987	Seis provincias hidrogeológicas
	Atlas Hidrogeológico Digital de Colombia - Mapa de ocurrencias de aguas minerales	1998	Informe - mapa de ocurrencias de aguas minerales	Informe de los resultados para las planchas 01 a 04 y 09 (1:500.000).
	Atlas de Aguas Subterráneas 1:500.000 (2000-2002)	2004	Mapas y memorias, escala 1:500.000	Planchas 01 a 04, 06, 09, 13, 14. Faltan planchas 05, 07, 08, 10 a 12, 15 a 26. Seis (6) provincias hidrogeológicas de acuerdo con el mapa hidrogeológico de Sur América de la UNESCO.
	Programa de Exploración de Aguas Subterráneas	2004	Programa de Exploración de Aguas Subterráneas	Estado de los estudios hidrogeológicos a 2004, zonas para exploración.
	Mapa litoestratigráfico con permeabilidades 1:500.000	2011	Mapa litoestratigráfico con permeabilidades (e informes), planchas 04, 05, 07 a 26	Mapa litoestratigráfico con permeabilidades (e informes), planchas 04, 05, 07 a 26 (faltan planchas 01 a 03, 06).

En Colombia los estudios hidrogeológicos se han realizado principalmente en el contexto de demanda del recurso, así que la caracterización hidrogeológica se ha concentrado en unidades sedimentarias con potencial hidrogeológico significativo, las rocas cristalinas con

menos potencial pueden permitir el flujo de agua subterránea y su interacción con el medio es especialmente importante si se consideran las diferentes intervenciones antrópicas que pueden tener efecto en las dinámicas del flujo y su interacción con cuerpos de agua superficial o verse afectadas por los mismos. Ejemplo de esto, es la construcción de túneles que se pueden comportar como desagües de flujos subterráneos (Freeze & Cherry, 1979) y los problemas geotécnicos como infiltración de presas y túneles, deslizamientos, estabilidad de laderas y subsidencia (Freeze & Cherry, 1979; Singhal & Gupta, 2010). En el caso de la construcción de túneles viales en Colombia se han documentado impactos a la calidad y cantidad de cuerpos de agua superficial y subterránea (Ramírez, 2016), como abatimiento y desaparición de ríos, quebradas, nacimientos y manantiales en proyectos como el Túnel de Sumapaz (Doble Calzada Bogotá – Ibagué), el Túnel de Occidente (Conexión Vial Aburrá – Río Cauca), el Túnel de la Línea (Vía Bogotá – Buenaventura) y el Túnel de Captación de la Hidroeléctrica Miel I de ISAGEN (Ramírez, 2016).

A pesar de la existencia de los estudios mencionados, el país sigue careciendo de una zonificación hidrogeológica que tenga en cuenta las rocas cristalinas, si bien, la propuesta del IDEAM (2010, 2013b, 2015a) representa un importante avance y un punto de partida, es necesario integrar todo el territorio y no solo regiones que demandan el agua subterránea.

2. Propuesta de zonificación hidrogeológica para Colombia

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para la zonificación hidrogeológica de Colombia, iniciando con el análisis de la información disponible y los elementos que fueron tomados y usados para establecerla.

2.1 Aspectos relevantes de la información documentada para la zonificación hidrogeológica en Colombia

2.1.1 Zonificación hidrogeológica en otras regiones

Zaporozec (1972) propuso la zonificación de las aguas subterráneas, con el propósito de optimizar la planificación y gestión del recurso, como una subdivisión regional de un área geográfica particular según características hidrogeológicas similares. Como se expuso anteriormente se consultaron las zonificaciones hidrogeológicas de Francia, Brasil, Italia, India, Canadá, Polonia, Nigeria y República Checa, además de la propuesta global del IGRAC. Estos países cuentan con información primaria como bases de datos de parámetros hidráulicos o caracterización hidrogeológica a nivel local y regional que les permite hacer una discretización detallada y con base en propiedades como la productividad o conductividad hidráulica de los acuíferos. De la documentación disponible, Francia y Brasil ofrecen las descripciones más completas explicando de forma detallada los procedimientos aplicados y los resultados. En la Tabla 2-1 se presenta un resumen comparativo de las metodologías revisadas, incluyendo Colombia.

Cada zonificación está enmarcada en las dinámicas propias de cada país, pero tienen aspectos comunes. Coinciden en que el primer aspecto considerado es la geología dada por los ambientes geológicos/tectónicos, el tipo de porosidad predominante o el tipo de roca. A excepción de Canadá, en todos los países revisados se cuenta con dos (2) o más

niveles de jerarquización: en Francia son tres (3) niveles, cuatro (4) niveles en Brasil y República Checa y en el resto de las regiones consultadas, dos (2) niveles (Tabla 2-1).

Generalmente, el nivel de menor detalle hace referencia a grandes ambientes geológicos o agrupaciones de tipos de rocas con formas semejantes de almacenar y transmitir agua subterránea como se puede ver en la Tabla 2-1. En IGRAC, Canadá, Nigeria, República Checa, Brasil e India mencionan la inclusión de geoformas o topografía para discretizar las unidades. Solo en Canadá se menciona la inclusión de capas temáticas de clima y humedad para trazar las regiones hidrogeológicas. En Polonia se tiene en cuenta la calidad del agua subterránea y el riesgo por contaminación. En Francia se establecen tres (3) **principios**, de **integridad**, **parentesco** y **herencia**, para asegurar que todo el país esté cubierto en todos los niveles de visualización incluyendo formaciones no acuíferas y que los límites de los niveles se conserven, es decir, que una entidad local esté unida a una regional, que a su vez está incluida en una nacional.

Tabla 2-1. Resumen de las zonificaciones hidrogeológicas revisadas en otros países y en Colombia.

País/región	Unidades	Ambientes geológicos/Tipos de rocas	Consideraciones	Observaciones
IGRAC (Margat & Gun, 2013)	Regiones globales	Regiones: basamento, cuencas sedimentarias, regiones montañosas plegadas de alto relieve y regiones volcánicas	Predominio de un determinado entorno hidrogeológico general	Zonificación global
	Provincias de aguas subterráneas		Por ambientes geológicos y grandes cuencas hidrográficas	
	Sistemas acuíferos		Acuíferos transfronterizos de gran extensión	
Norte y Centro América (Zaporozec, 1972)	Reino hidrogeológico	Reinos: permafrost, cordillera, planicie, escudo, Paleozoico, planicie costera	Con base en geología y tectónica, litología, zonas de recarga, movimiento y flujo de agua subterránea, profundidad y fluctuaciones del nivel freático	Propuesta para gestión y planificación
	Provincia hidrogeológica			
	Región hidrogeológica mayor (opcional)			
	Región hidrogeológica			
Zona hidrogeológica				
Francia (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003)	Gran sistema acuífero/Gran dominio hidrogeológico	Temas: aluvial, sedimentario, basamento, volcánico, formaciones intensamente plegadas, carst	Acuífero/no acuífero, porosidad, tipos de acuífero. El sistema acuífero agrupa unidades acuíferas, semi-impermeables e impermeables.	Principios de integridad, parentesco y herencia
	Sistema acuífero/Dominio hidrogeológico			
	Unidad acuífera/Unidad semi-permeable/Unidad impermeable			
Brasil (Oliveira et al., 2014)	Unidad hidrolitológica o dominio hidrogeológico	Unidades hidrolitológicas: porosas o granulares, fracturadas, cársticas, no acuíferas	Agrupa litologías según el tipo de porosidad	--
	Sistema acuífero		Agrupa acuíferos	
	Acuífero		Según litología, geoformas, material meteorizado, densidad y tipo de drenajes	
	Unidad hidroestratigráfica		Según productividad	

Tabla 2-1. Resumen de las zonificaciones hidrogeológicas revisadas en otros países y en Colombia.

País/ región	Unidades	Ambientes geológicos/Tipos de rocas	Consideraciones	Observaciones
Italia (Pantaleone et al., 2018):	Dominio hidrogeológico	Categorías de los complejos: carbonatados Meso-Cenozoico, aluviales y epiclásticos Plio-Cuaternario, volcánicos	Nueve dominios según tipo de roca, facies sedimentarias y edad (1 aluvial, 1 volcánico, 2 terrígenos, 4 calcáreos y 1 cristalino)	En la categoría "Cristalino Paleozoico" se divide el perfil de meteorización en 3 zonas: regolito, roca fracturada, zona profunda.
	Complejo hidrogeológico (unidad hidroestratigráfica)	Plio-Cuaternario, cristalinos Paleozoicos, terrígenos Meso-Cenozoicos	Tipo de permeabilidad predominante y en un intervalo limitado	
India (Central Ground Water Board - CGWB, 2012)	Acuífero principal	Acuíferos principales: aluvial, laterita, basalto, arenisca, shale, caliza, granito, esquisto, cuarcita, charnoquita, condalita, neises, intrusivos	Por tipo de roca	De cada uno de los acuíferos principales y mayores se describen las propiedades hidráulicas y el espesor de la zona meteorizada.
	Acuífero mayor		Según características litológicas y geomorfológicas	
Canadá (Sharpe et al., 2010).	Región hidrogeológica	Corresponden a cordilleras, cuencas sedimentarias, escudos, tierras bajas y permafrost.	Provincias geológicas mayores, topografía, excedentes/déficits de humedad, presencia de permafrost	--
Nigeria (Alimi, n.d.)	Acuífero mayor regional	Categorizados en: basamento, cuenca sedimentaria, plateau volcánico y aluvial	--	--
	Acuífero menor local/No acuífero		--	
Polonia (Herbich et al., 2010)	Acuífero útil mayor	--	Parámetros hidrogeológicos, hidrodinámica, calidad, riesgo por contaminación	Las capas temáticas son actualizadas cada 6 años (desde 2009)
	Acuífero primario		Considerando sus interacciones con las aguas superficiales y los ecosistemas terrestres	
República Checa (Sima, n.d.)	Provincia	Provincias: valle de rift, plateau volcánico, rocas sedimentarias, basamento, depósitos terciarios y cuaternarios	Ambiente geológico	La definición de las zonas se considera un proceso repetitivo que se actualiza con nuevo conocimiento
	Región		Cuencas hidrogeológicas	
	Zona		Con base en la geología estructural, estratigrafía y litología; aspectos hidrogeológicos y sistemas de flujo	
	Acuífero		--	
Colombia (IDEAM, 2010, 2013b)	Provincia hidrogeológica	--	Cuencas sedimentarias mayores limitadas por fallas regionales y altos estructurales	No tiene en cuenta las rocas de basamento y los sistemas acuíferos pueden estar contenidos en 2 o más provincias
	Sistema acuífero		Puede contener uno o varios acuíferos	

2.1.2 Potencial hidrogeológico en rocas ígneas y metamórficas

En cuanto a la hidrogeología en rocas cristalinas y volcánicas, de acuerdo con la información revisada se tiene que en el caso de las primeras el potencial hidrogeológico está dado principalmente por el espesor y características del perfil de meteorización y en las rocas volcánicas se asocia a las dinámicas del vulcanismo y solidificación.

El potencial hidrogeológico de las rocas ígneas plutónicas y metamórficas está asociado a los perfiles de meteorización y al grado de fracturamiento. Se ha encontrado que la zona más permeable corresponde a la base del saprolito y la parte superior de la roca meteorizada (Chilton & Foster, 1995; Foster, 1984; Guihéneuf et al., 2014; Maréchal et al., 2018). El modelo conceptual de acuíferos en rocas cristalinas (*hard rock aquifer - HRA*) (Belle et al., 2019; Dewandel et al., 2006; Lachassagne, 2008; Lachassagne et al., 2001, 2011, 2021; Lachassagne et al., 2014a, 2014b; Portal et al., 2017) define un acuífero continuo que se desarrolla en los 100 primeros metros de profundidad en el perfil de meteorización y donde la conductividad hidráulica se debe a las fracturas originadas por procesos de meteorización.

El modelo conceptual consta de tres (3) capas: (i) saprolito con una función principalmente capacitiva (contener agua); (ii) capa fisurada con fracturas principalmente subhorizontales en rocas graníticas y verticales en rocas foliadas, tiene una función principalmente transmisiva (paso de agua) pero también propiedades capacitivas y (iii) la capa más profunda corresponde al basamento fresco, solo permeable en zonas de discontinuidades. Los acuíferos están constituidos por las dos (2) primeras capas (Belle et al., 2019; Dewandel et al., 2006; Lachassagne, 2008; Lachassagne et al., 2001, 2011, 2021; Lachassagne et al., 2014a, 2014b; Portal et al., 2017).

Además de la presencia del saprolito y la capa fisurada, es importante considerar que la permeabilidad del suelo residual depende del proceso de meteorización, ya que durante las etapas iniciales sin generación de minerales secundarios, la permeabilidad y rendimiento específico aumentan progresivamente, pero en fases posteriores la descomposición a minerales arcillosos secundarios puede reducir los valores de estos parámetros (Wright & Burgess, 1992).

La definición y descripción del modelo conceptual de acuíferos en rocas cristalinas se basa principalmente en observaciones hechas en países de África, Francia y Guyana Francesa en rocas graníticas, se consideran también otros trabajos en gabros, peridotitas, esquistos y neises en distintas regiones del mundo.

Aunque los términos usados en el modelo conceptual de acuíferos en rocas duras difieren de los usados en Colombia, de acuerdo con las descripciones de las capas se pueden establecer la relación. La capa de “saprolito” en el modelo conceptual corresponde a los horizontes de suelo residual (sin estructuras heredadas) y saprolito (estructuras heredadas) y la “capa fisurada” ubicada en entre el saprolito y el basamento fresco se relaciona con los horizontes de transición suelo roca y de roca meteorizada que subyacen el saprolito.

En las rocas volcánicas, las propiedades hidrogeológicas son altamente variables, dependen del tipo de volcanismo, los eventos y la distancia a áreas activas (Custodio, 2003). Las rocas volcánicas ácidas suelen ser más masivas que los basaltos y por lo general tienen menor porosidad y permeabilidad (Singhal & Gupta, 2010). Los paleosuelos

gruesos o el material piroclástico suelto entre los flujos de lava suelen ser muy permeables, al igual que el contacto entre los flujos de lava y las rocas sedimentarias o el material volcánico anterior, a menudo están muy fracturados y contienen mucha agua subterránea (Kehinde & Loenhert, 1989 y Vernier, 1993 en MacDonald & Davies, 2000).

2.1.3 Uso de sensores remotos

Como se expuso en una primera revisión en el numeral 1.3, de los indicadores seleccionados, el indicador de espesor de regolito requiere análisis particulares de los modelos de terreno y un control de campo representado un esfuerzo adicional limitado por los alcances de la presente propuesta, razón por la que no se evaluó el uso de esta variable.

Por otro lado, dentro de los alcances de este trabajo se planteó dar prioridad a los productos de sensores remotos con base en información ya procesada, debido a esto se examinó el uso de los indicadores densidad de drenajes y densidad de lineamientos a partir de cartografía existente, como se detalla en el próximo numeral (2.2), encontrando que, en el caso de la densidad de lineamientos, con la cartografía temática disponible a escala 1:500.000 no hay un aporte significativo. Mientras que, en los resultados de la densidad de drenajes, con base en la cartografía básica disponible (escalas 1:500.000 y 1:100.000), se observa que posiblemente la cartografía de los drenajes esté afectada por la resolución y calidad de las imágenes fuente, ya que los trazados muestran diferencias según las cuadrículas de la cartografía base. Dado lo anterior, se descartó el uso de las variables antes mencionadas.

Los datos de la variable de anomalía de almacenamiento de agua en el subsuelo del modelo GLDAS versión 2.2 a partir de la asimilación de datos de la misión GRACE, se encuentran procesados, disponibles para descarga en formato ráster y no requieren tratamientos adicionales. Debido a lo anterior, esta variable si fue usada y permitió mostrar que en las zonas con predominio de rocas cristalinas y volcánicas se presentan cambios importantes en el almacenamiento de agua subterránea somera, como se presenta más adelante.

2.2 Datos usados

A continuación, se describe la información temática que fue evaluada para llevar a cabo la zonificación hidrogeológica y las variables que finalmente fueron usadas para la metodología propuesta e implementada.

2.2.1 Geología

El insumo base para proponer una zonificación hidrogeológica de Colombia que no excluya las rocas cristalinas consiste en la geología oficial con cobertura nacional completa y escala más detallada, que corresponde al Atlas Geológico de Colombia a escala 1:500.000 versión 2020 (AGC v2020) (J. Gómez et al., 2020). Este producto constituye cartografía geológica homologada y homogenizada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), se encuentra disponible en el geoportal de esta entidad (<https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/Inicio.aspx>) de donde se puede descargar la cartografía nativa y publicaciones asociadas que describen los procedimientos y el contenido del producto.

La primera edición del Atlas Geológico de Colombia fue publicada en 2007; la segunda en 2015 y la tercera en 2020. Esta última edición se actualizó con los mapas geológicos a escala 1:100.000 publicados por el SGC, información de artículos publicados entre noviembre de 2014 y diciembre de 2019, además de la obra *The Geology of Colombia* (SGC, 2020). El atlas está conformado por unidades cronoestratigráficas (UC) que fueron definidas según la edad y la litología de los materiales; las unidades, fallas y pliegues se ajustaron con la imagen de relieve sombreado de Colombia a escala 1:100.000 proveniente de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la NASA (SGC, 2020). La geología es el principal condicionante la forma del paisaje, así que el relieve se consideró un insumo fundamental para ajustar los límites geológicos siguiendo la topografía (J. Gómez, 2022).

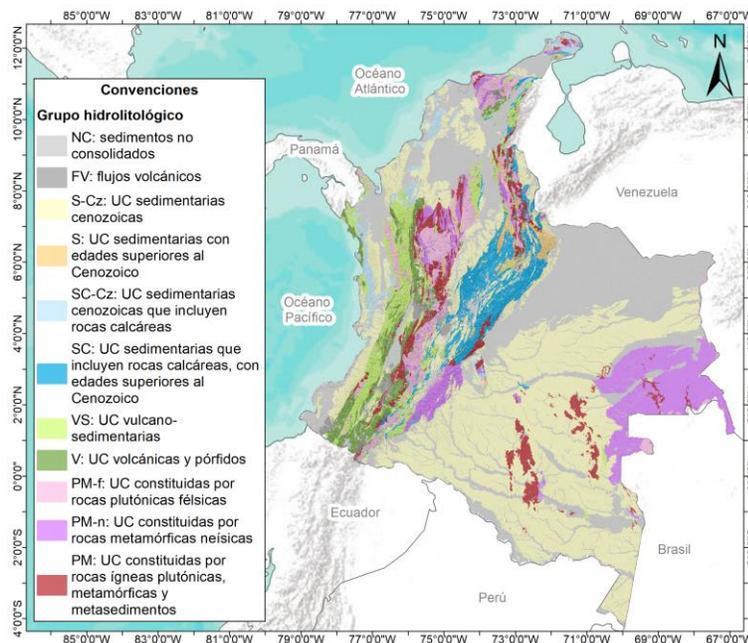
Las unidades cronoestratigráficas (UC) y las fallas del AGC v2020 fueron consideradas en este trabajo para refinar la delimitación de las provincias hidrogeológicas propuestas a partir de las provincias definidas en IDEAM (2010) como se describe en el próximo numeral en la metodología llevada a cabo. Las descripciones de las UC hacen referencia a características litológicas, no cuentan con detalles sobre perfiles de meteorización o grado de fracturamiento para determinar el potencial hidrogeológico de las rocas ígneas y metamórficas.

Según los tipos de roca, se establecieron “grupos hidrolitológicos” que reúnen unidades cronoestratigráficas del AGC 2020 con formas similares de almacenar y transmitir agua subterránea, con el propósito de relacionar la geología con la variable de agua almacenada en el subsuelo del modelo GLDAS (asimilación de datos de la misión GRACE). Los grupos hidrolitológicos propuestos son los siguientes (Figura 2-1):

- **NC:** sedimentos no consolidados.
- **FV:** flujos volcánicos.
- **S-Cz:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias cenozoicas.
- **SC-Cz:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias cenozoicas que incluyen rocas calcáreas.
- **S:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias con edades superiores al Cenozoico.

- **SC:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias que incluyen rocas calcáreas, con edades superiores al Cenozoico.
- **VS:** unidades cronoestratigráficas vulcano-sedimentarias.
- **V:** unidades cronoestratigráficas volcánicas y pórfidos.
- **PM:** unidades cronoestratigráficas constituidas por rocas ígneas plutónicas y metamórficas (incluyendo metasedimentos).
- **PM-f:** unidades cronoestratigráficas constituidas por rocas plutónicas félsicas.
- **PM-n:** unidades cronoestratigráficas constituidas por rocas metamórficas neísicas.

Figura 2-1. Grupos hidrolitológicos definidos en este trabajo, de acuerdo con el tipo de roca que conforman las unidades cronoestratigráficas (UC) del Atlas Geológico de Colombia versión 2020.



2.2.2 Agua almacenada en el subsuelo

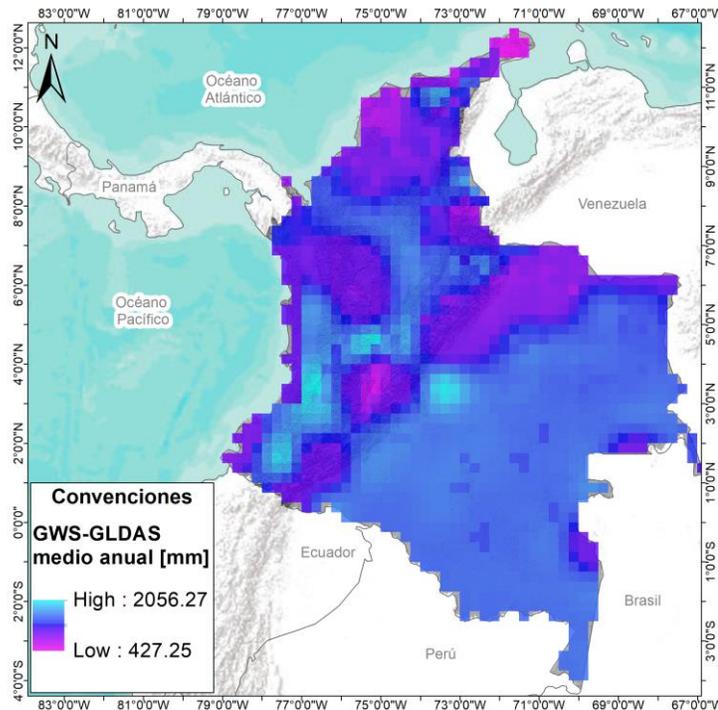
En el numeral 1.3.4 se hizo una descripción de la misión GRACE y el modelo global de asimilación de datos GLDAS. La variable GWS (*groundwater storage*) de GLDAS v2.2 con modelo de superficie terrestre CLSM (*Catchment Land Surface Model*) representa cambios en el almacenamiento de aguas subterráneas poco profundas en respuesta a cambios en condiciones atmosféricas como precipitación y evapotranspiración (Li et al., 2019), obtenidos de asimilar datos de la misión GRACE que mide cambios en el almacenamiento de agua total terrestre (TWS). Para obtener la variable GWS fue removida la media temporal de las anomalías de GRACE (para cada pixel de 0,5°), definida como la media temporal (2003 a 2015) del TWS simulado por CLSM (Li et al., 2019).

En la zonificación de regiones hidrogeológicas de Canadá se incluyó un mapa de excedentes/déficits de humedad, de manera similar en este caso se usaron los datos mensuales de anomalía de almacenamiento de agua subterránea en lámina de agua (GWS) del modelo GLDAS v2.2, entre el 01 de febrero de 2003 y el 28 de febrero de 2021, con tamaño de pixel $0,25^\circ$ que equivale a unos 30 km aproximadamente. Se compararon los valores de GWS para diferentes tipos de roca.

En el capítulo 3, para cada provincia se evaluó la variación de GWS-GLDAS relacionada con el tipo de roca, se presentan las series de tiempo, el ciclo anual y los rezagos respecto a las series de tiempo de precipitación de la base datos CHIRPS.

En la Figura 2-2 se presenta la distribución espacial para Colombia de la anomalía de almacenamiento de agua subterránea (lámina de agua) media anual GWS-GLDAS v2.2 con base en datos mensuales entre febrero de 2003 y febrero de 2021.

Figura 2-2. Distribución espacial de la anomalía de almacenamiento de agua subterránea - GWS (lámina de agua) media anual del modelo GLDAS versión 2.2, para Colombia en el periodo comprendido entre febrero de 2003 y febrero de 2021.



En estudios regionales realizados en Colombia usando valores de TWS de GRACE y de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM se ha concluido que los datos de GRACE representan una fuente confiable para el estudio de los recursos hídricos terrestres y se destaca la importancia de continuar con esfuerzos de monitoreo similares (Bolaños et al., 2021). Esto a partir de la aplicación en la cuenca Magdalena-Cauca donde se obtuvo que estimaciones basadas en los datos GRACE son comparables con las obtenidas a través

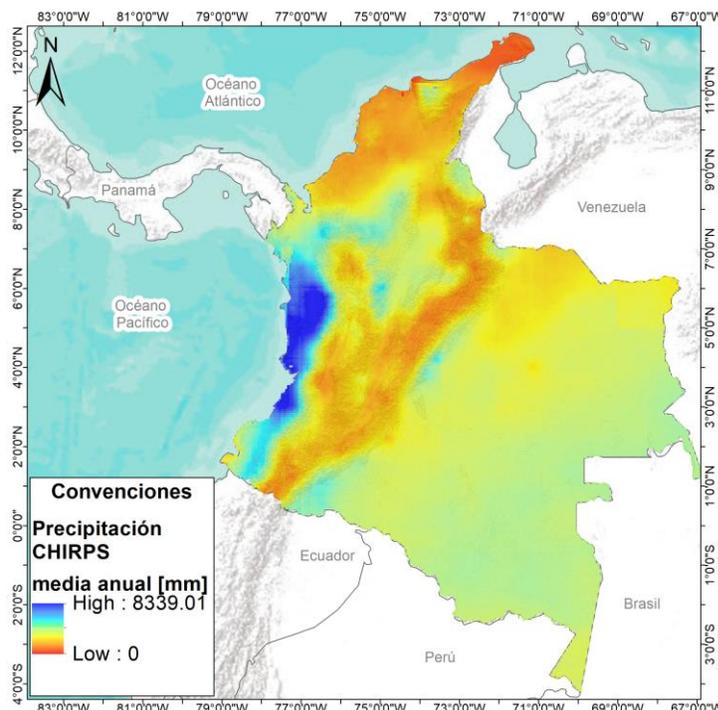
de la ecuación del balance hídrico utilizando fuentes independientes de los componentes (precipitación, evaporación y descarga de ríos) en Bolaños et al. (2021). Para la región de los Llanos Orientales, Ospina & Vargas (2018) afirman que los datos de GRACE representan una herramienta útil para monitorear los cambios de recarga.

2.2.3 Precipitación satelital

Con el fin de evaluar la respuesta de la variable GWS frente a la precipitación, se usaron datos mensuales de la base de datos CHIRPS v2.0 (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) desarrollada por el USGS (*United States Geological Survey*) y el *Climate Hazard Center* (CHC) de la Universidad de California, Santa Bárbara, con una resolución espacial de 0,05°. Los productos CHIRPS incluyen datos históricos y casi en tiempo real de estaciones proporcionados por diferentes organizaciones incluyendo servicios meteorológicos nacionales (Funk et al., 2015).

Urrea (2017) validó los datos de CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014, encontrando que conserva características importantes como la media, la precipitación acumulada total y la estacionalidad en las tres escalas analizadas. En la Figura 2-3 se puede ver la distribución espacial de la precipitación media anual de la base de datos CHIRPS con base en datos mensuales entre febrero de 2003 y febrero de 2021.

Figura 2-3. Distribución espacial de la precipitación media anual de la base de datos CHIRPS para Colombia, en el periodo comprendido entre febrero de 2003 y febrero de 2021.



2.2.4 Densidad de lineamientos y drenajes

Como se mencionó en el numeral 1.3 existen múltiples herramientas para hacer trazado automático de lineamientos, sin embargo, lo más recomendable es que el resultado sea siempre supervisado por el usuario. Para el trazado automático de drenajes a partir de modelos de elevación de terreno es necesario hacer correcciones iniciales, especialmente en zonas de relieve plano.

En este caso por tratarse de un área extensa se ve limitada la eficiencia del trazado automático de lineamientos y de drenajes, incrementando el tiempo y actividades de pre y post-procesamiento que se salen de los alcances de este trabajo. Por esta razón se usan productos ya existentes generados por entidades oficiales, como la capa de fallas y lineamientos del AGC v2020 a escala 1:500.000, que se encuentran ajustados al Modelo Digital de Terreno (MDT) de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la NASA y los drenajes de la cartografía básica a escala 1:100.000 y 1:500.000 disponibles en el geoportal del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

La densidad de lineamientos y de drenajes se calculó de las dos (2) formas mencionadas en el numeral 1.3, calculando la longitud de las líneas por área de celda en una malla de 5 km * 5 km y usando una herramienta de análisis espacial en un software SIG diseñada para tal fin. En la Figura 2-4, Figura 2-5 y Figura 2-6 se presentan los resultados.

Los valores altos de densidad de lineamientos, usando las fallas y lineamientos a escala 1:500.000 del AGC 2020, están ubicados en la zona de las cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta (Figura 2-4), principalmente en las provincias conformadas por rocas cristalinas, sin precisar diferencias importantes al interior de estas. Debido a esto, este resultado no tiene mucha relevancia a nivel de provincia y en el caso de considerarse para la delimitación de niveles más detallados en la zonificación, sería más conveniente obtener los lineamientos a una escala cartográfica más detallada. Por lo anterior el uso de esta variable se descarta puesto que los procesamientos a escala de mayor detalle no hacen parte de los alcances de este trabajo.

En la Figura 2-5 y Figura 2-6 se muestra la distribución espacial de la densidad de drenajes, en la primera calculando la longitud de las líneas por área de celda en una malla de 5 km * 5 km y en la segunda, usando una herramienta de análisis espacial en un software SIG. En ambas figuras se comparan los resultados usando drenajes a escalas 1:100.000 y 1:500.000 y se observa que los patrones en la densidad de drenajes no coinciden si se varía la escala, además se evidencian diferencias en el trazado de drenajes por plancha (de la cartografía base), probablemente afectada por la resolución y calidad de las imágenes usadas para trazar la cartografía. Dado lo anterior, se descarta el uso de la densidad de drenaje.

Figura 2-4. Distribución espacial de la densidad de lineamientos (fallas y lineamientos del Atlas Geológico de Colombia versión 2020). Obtenida a partir de dos métodos: (a) calculando la longitud de líneas en una cuadrícula de 5 km * 5 km y (b) usando una herramienta de análisis espacial en software SIG.

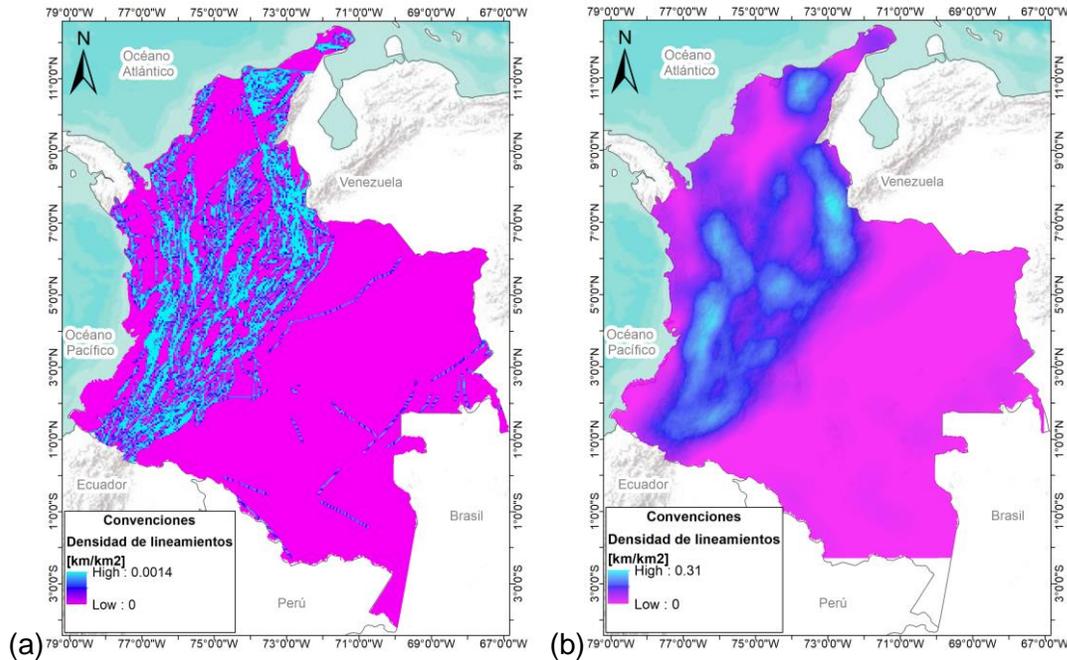


Figura 2-5. Distribución espacial de la densidad de drenajes obtenida calculando la longitud de líneas en una cuadrícula de 5 km * 5 km, para (a) drenajes a escala 1:100.000 y (b) drenajes a escala 1:500.000.

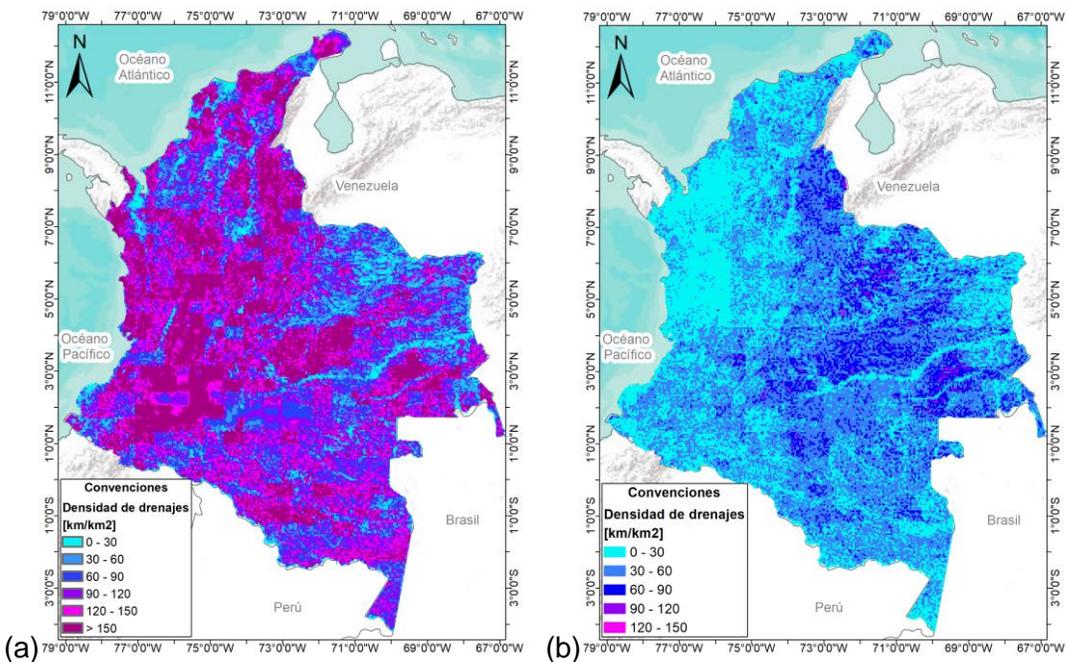
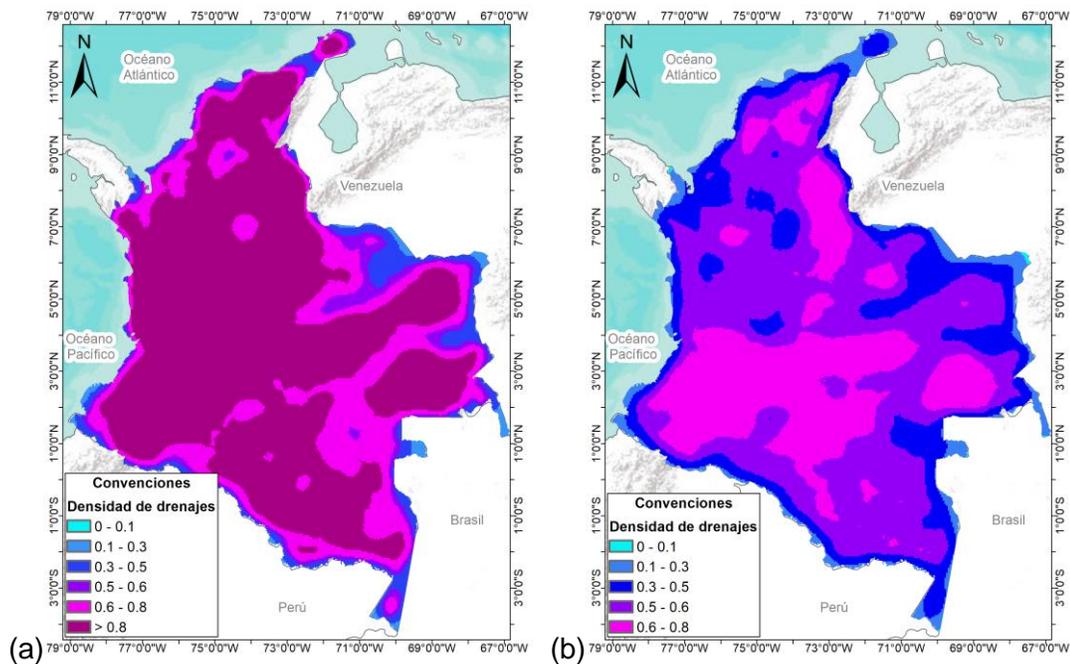


Figura 2-6. Distribución espacial de la densidad de drenajes usando una herramienta de análisis espacial de un software SIG, para (a) drenajes a escala 1:100.000 y (b) drenajes a escala 1:500.000.



2.3 Metodología propuesta

En la Figura 2-7 se presenta de manera esquemática la relación entre las fases de la metodología propuesta para realizar una zonificación hidrogeológica a mayor detalle de Colombia que incluya las rocas cristalinas con base en información existente. Se divide en cinco (5) etapas iniciando con la recopilación y análisis de información sobre zonificaciones hidrogeológicas en otros países, antecedentes en Colombia y la información temática disponible en el país. A continuación, se describe cada uno de los pasos seguidos.

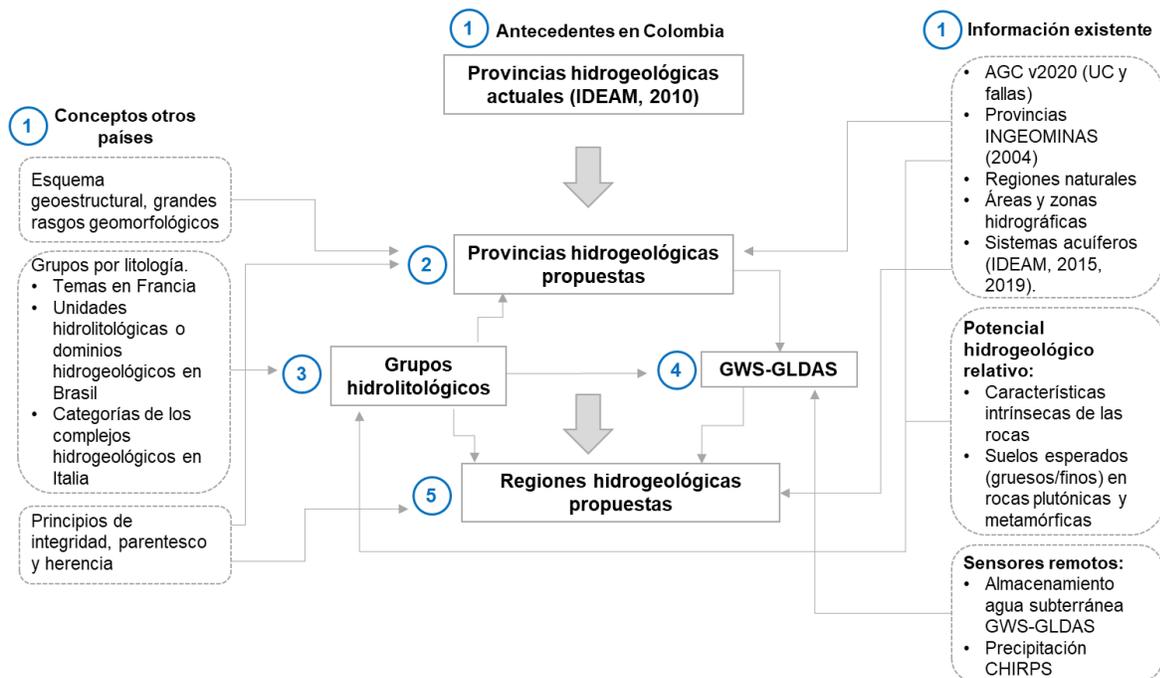
2.3.1 Etapa uno (1)

Con el propósito principal de incluir las rocas cristalinas en una zonificación hidrogeológica de Colombia, se consideró necesario indagar sobre los antecedentes en Colombia y posibles estándares o procedimientos sugeridos en el tema, al igual que documentación sobre zonificación hidrogeológica en otros países. Para llevar a cabo la zonificación a partir de información ya existente en Colombia fue necesario precisar como caracterizar el potencial hidrogeológico de las rocas cristalinas con el fin de incluirlas en la zonificación. Además de identificar qué información sería usada como base para la zonificación con el apoyo de productos de sensores remotos.

Esta primera etapa consistió en la recolección y revisión de la información existente para posteriormente determinar que usar en la zonificación propuesta para Colombia. La información recopilada y analizada se agrupa en cinco (5) temas:

- (1) Procedimientos y experiencias en otros países en zonificación y cartografía hidrogeológica (a nivel de país).
- (2) Potencial hidrogeológico en rocas volcánicas y cristalinas.
- (3) Productos de sensores remotos indicadores de la presencia de agua subterránea.
- (4) Antecedentes en Colombia sobre estudios hidrogeológicos de cobertura nacional.
- (5) Información temática disponible en el país para llevar a cabo la zonificación hidrogeológica.

Figura 2-7. Esquema de la relación entre las cinco (5) etapas de la metodología propuesta para la zonificación hidrogeológica de Colombia incluyendo rocas cristalinas a partir de información existente, desarrollada y aplicada en este trabajo.



De las experiencias en otros países se tomaron elementos generales que pudieran ser aplicados sin contar con información hidrogeológica detallada, ya que en Colombia esta información es escasa y difusa. Así que, de las metodologías usadas en otros países se aplican para esta propuesta metodológica las siguientes consideraciones:

- Tomar como referencia inicial un marco geológico/estructural regional (IGRAC, Italia, Canadá, Nigeria, República Checa).
- Separar en grandes grupos litológicos con formas semejantes de almacenar y transmitir agua subterránea (IGRAC, Francia, Brasil, Italia, India), para delimitar o establecer niveles de análisis.

- Considerar rasgos mayores del relieve, topografía (IGRAC, Canadá, Nigeria, República Checa).
- Incluir excedentes o déficits de humedad (Canadá). En este caso, anomalías de almacenamiento de agua subterránea de la misión GRACE asimiladas en GLDAS versión 2.2.
- Acoger los principios de integridad, parentesco y herencia definidos en Francia. Aunque en los demás países documentados no se establecen explícitamente este tipo de criterios, son aplicados en la delimitación de las distintas unidades de análisis. Con estos principios se asegura que la zonificación abarque todo el territorio y que los niveles de menor jerarquía estén incluidos en otros de mayor jerarquía.

Del potencial hidrogeológico de las rocas cristalinas y volcánicas se tiene que la caracterización con base en información existente requiere descripciones y espesores del perfil de meteorización (horizontes de suelo residual, saprolito, transición suelo roca y roca meteorizada) y en zonas donde el perfil de meteorización es escaso, es necesario conocer grado de fracturamiento y/o zonas de fracturas profundas, en el caso de las rocas cristalinas. En rocas volcánicas, descripciones texturales asociadas a los vacíos y presencia de fracturas que permitan dar una idea del grado de porosidad y permeabilidad secundaria. Por la escasez de información en estos aspectos, esta metodología no incluyó la caracterización del potencial hidrogeológico de las rocas cristalinas y volcánicas con base en lo anterior. Considerando los patrones de meteorización, en la etapa tres (3) se definen grupos hidrológicos para rocas félsicas y neises porque tienen mayor probabilidad de desarrollar suelos gruesos con mayor porosidad.

Sobre productos de sensores remotos se evaluó el uso de indicadores comunes y principalmente relacionados con la determinación del potencial en rocas cristalinas, por lo que revisó información sobre espesor de regolito, densidad de drenaje y lineamientos y cambios en el almacenamiento de agua en el suelo. Como se mencionó en los numerales 1.3 y 2.2, se dio preferencia al uso de información ya procesada (generada con base en modelos de elevación digital e imágenes satelitales). A partir de la primera revisión en el marco teórico se descartó el indicador de espesor de regolito por requerir control de campo y otros datos, posteriormente se evaluaron la densidad de drenajes y de lineamientos, pero no se incluyen en la implementación de la metodología porque los resultados requieren revisiones o el uso de información base más detallada, que representan esfuerzos adicionales limitados por los alcances de la presente propuesta. El producto de cambios en el almacenamiento de agua en el suelo a partir de asimilación de datos de la misión GRACE se encuentra ya procesado, por lo que fue el único producto de sensores remotos usado.

En cuanto a los antecedentes de zonificación hidrogeológica de Colombia se tienen varios mapas hidrogeológicos nacionales y la única referencia a zonificación es el trabajo del IDEAM (2013b) que define dos (2) unidades: provincias hidrogeológicas y sistemas acuíferos. Para dar continuidad a ese trabajo y en concordancia con la zonificación del IDEAM que es reconocida y usada en el país, se toman como punto de partida las

provincias hidrogeológicas definidas en IDEAM (2010), a la vez que se relaciona con un marco geológico/estructural regional de Colombia. De esta manera, la etapa siguiente en la metodología consistió en el refinamiento de tales provincias, considerando los aspectos tomados de la información revisada y documentada.

Sobre información temática base en Colombia se buscó principalmente información geológica, geomorfológica e hidrogeológica. La información hidrogeológica es dispersa y para casos muy puntuales (donde se aprovecha el agua subterránea). En la plataforma SIG-OT (Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial) están disponibles dos (2) capas relacionadas con geomorfología, pero no es específica la escala de la cartografía ni se encuentran disponibles documentos o memorias asociados, además la delimitación de las unidades difiere en ambas capas. Se usó únicamente la geología oficial ya homologada e integrada para todo el país por el SGC, con mayor detalle, del Atlas Geológico de Colombia a escala 1:500.000 versión 2020 (AGC v2020) (J. Gómez et al., 2020).

El detalle y los principales aspectos de la información revisada se documentan en el capítulo 1 y en los numeral anteriores (2.1 y 2.2) se describe que consideraciones de la información revisada fueron tenidas en cuenta en este trabajo, que información temática se usó y porqué se descartó el uso de los indicadores de densidad de lineamientos y densidad de drenajes.

2.3.2 Etapa dos (2)

Para tener como punto de partida un marco geológico/estructural regional y en correspondencia con el trabajo ya adelantado en Colombia, se parte de las “provincias hidrogeológicas” del IDEAM (2010) definidas como unidades tectono-estratigráficas que coinciden con cuencas geológicas mayores caracterizadas por su homogeneidad geomorfológica y separadas entre sí por rasgos estructurales regionales que corresponden a barreras impermeables (IDEAM, 2010).

La inclusión de las rocas cristalinas se hizo nombrando las zonas de “basamento” (en zonificación de IDEAM, 2010) como provincias hidrogeológicas nuevas y con la evaluación de la variable GWS-GLDAS se muestra que en provincias dominadas por estas rocas también hay cambios importantes en el almacenamiento de agua subterránea, por lo que su potencial se considera relevante para el conocimiento hidrogeológico del país.

Se actualizaron los límites de dichas provincias según la geología base de edición reciente (AGC 2020) y de manera que haya correspondencia con los **principios de integridad, parentesco y herencia** con los “sistemas acuíferos” (IDEAM, 2015a, 2019) definidos como el siguiente nivel en la zonificación del IDEAM (2013b). Estos principios son definidos en la metodología de Francia (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003) y aseguran que todo el territorio se encuentre caracterizado y que una unidad de menor jerarquía esté contenida

dentro de otra de mayor jerarquía. Aunque en otros países no se enuncien estos principios, en la cartografía y niveles definidos es claro que se cumplen los tres (3).

Además, se tuvo en cuenta la delimitación de las provincias hidrogeológicas del Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia (INGEOMINAS, 2004a), regiones naturales (IGAC, 1997), áreas y zonas hidrográficas del país (IDEAM, 2013b) y sistemas acuíferos (IDEAM, 2015a, 2019), al momento de refinar los límites de las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo.

Para cada una de las provincias hidrogeológicas determinadas en IDEAM (2010) se revisó la delimitación descrita que corresponde a límites fallados, cambios litológicos o altos estructurales (en IDEAM, 2010), para actualizarla con el trazado de las fallas geológicas y contactos entre unidades cronoestratigráficas del AGC 2020.

Teniendo en cuenta que la zonificación definida por el IDEAM (2013b, 2015a) incluye los sistemas acuíferos delimitados en el ENA 2014 y el ENA 2018, cumpliendo con los principios de parentesco y herencia, un sistema acuífero debería estar completamente contenido dentro de una provincia (por ser el nivel más detallado de la zonificación actual). Como el nivel de conocimiento de la mayoría de los sistemas acuíferos es bajo (IDEAM, 2015a), los límites de estos se asocian a las unidades cronoestratigráficas del AGC v2020 en las que se enmarcan. Cuando no es posible ajustar los límites de un sistema acuífero dentro de una sola provincia hidrogeológica, se unen varias provincias de IDEAM (2010) en una sola, considerando que esto es posible debido a la homogeneidad geológica de las provincias con el predominio de un cierto tipo de roca.

Se procuró también que las provincias quedaran como áreas continuas, evitando el trazado de provincias contenidas en otras. En este sentido quedó una excepción debido a la importancia de una de las provincias involucradas, como se describe en el numeral 3.1.

2.3.3 Etapas tres (3) y cuatro (4)

Las etapas tres (3) y cuatro (4) consistieron en el procesamiento del producto de sensores remotos asociado a los cambios en el almacenamiento de agua subterránea. Para relacionar esta variable con la geología se definieron unos “grupos hidrolitológicos”, con el objetivo de asociar los píxeles de resolución gruesa (~30 km) del almacenamiento de agua subterránea con un tipo de roca en general.

En la **etapa tres (3)**, antes de analizar la variable de cambios en el almacenamiento de agua subterránea con relación a diferentes tipos de roca (etapa cuatro (4)), se definen 11 “grupos hidrolitológicos” con base en la geología del AGC v2020 y teniendo en cuenta lo consultado sobre hidrogeología en rocas cristalinas y volcánicas. Estos grupos corresponden a la agrupación de unidades cronoestratigráficas (UC) que tienen formas similares de almacenar y transmitir agua subterránea. Se considera solo el tipo de roca, debido a que para las unidades cronoestratigráficas (UC) del AGC v2020 no hay

descripciones de suelo, perfil de meteorización o grado de fracturamiento que permitan establecer otros grupos hidrolitológicos según el potencial hidrogeológico de rocas cristalinas y volcánicas. En los grupos hidrolitológicos determinados, de las rocas cristalinas se separan las plutónicas félsicas y las neísicas por ser las de mayor potencial para generar suelos gruesos.

La división en 11 grupos hidrolitológicos se basa, de forma general y cualitativa, en la semejanza de las unidades geológicas para almacenar y transmitir agua subterránea, de acuerdo con las “regiones globales” de IGRAC (Margat & Gun, 2013), los “temas” en Francia (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003), “unidades hidrolitológicas o dominios hidrogeológicos” en Brasil (Oliveira et al., 2014) y categorías de los complejos hidrogeológicos en Italia (Pantaleone et al., 2018).

En las rocas plutónicas y metamórficas el potencial acuífero está asociado al perfil de meteorización y asumiendo que los suelos residuales arenosos tienen mayor potencial de infiltración, las rocas félsicas y neísicas se consideran un grupo hidrolitológico aparte del resto de rocas duras. Los flujos volcánicos inconsolidados suelen ser muy permeables (MacDonald & Davies, 2000), por lo que se establece una categoría para estos materiales. En las rocas sedimentarias se separan las unidades cronoestratigráficas recientes (Terciario y Cuaternario) y anteriores al Cenozoico debido a que se sabe que en las primeras el grado de consolidación es débil o nulo y constituyen unidades acuíferas importantes en Colombia como en casos de la región Caribe o el Magdalena Medio, según lo reportado en INGEOMINAS (2004a). Los grupos hidrolitológicos propuestos son los siguientes (Figura 2-8):

- **NC:** sedimentos no consolidados.
- **FV:** flujos volcánicos.
- **S-Cz:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias cenozoicas.
- **SC-Cz:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias cenozoicas que incluyen rocas calcáreas.
- **S:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias con edades superiores al Cenozoico.
- **SC:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias que incluyen rocas calcáreas, con edades superiores al Cenozoico.
- **VS:** unidades cronoestratigráficas vulcano-sedimentarias.
- **V:** unidades cronoestratigráficas volcánicas y pórfidos.
- **PM:** unidades cronoestratigráficas constituidas por rocas ígneas plutónicas y metamórficas (incluyendo metasedimentos).
- **PM-f:** unidades cronoestratigráficas constituidas por rocas plutónicas félsicas.
- **PM-n:** unidades cronoestratigráficas constituidas por rocas metamórficas neísicas.

La **etapa cuatro (4)** consiste en el uso y análisis de la variable de cambios en el almacenamiento de agua subterránea, que es uno de los productos del modelo GLDAS versión 2.2 después de asimilar los datos de la misión GRACE. La variable GWS (groundwater storage) de GLDAS v2.2 representa cambios en el almacenamiento de

aguas subterráneas poco profundas en respuesta a cambios en condiciones atmosféricas como precipitación y evapotranspiración (Li et al., 2019).

Con el fin de evaluar la respuesta de la variable GWS de GLDAS frente a la precipitación, se usaron también datos de lluvia de la base de datos CHIRPS versión 2.0 (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) desarrollada por el USGS (*United States Geological Survey*) y el *Climate Hazard Center* (CHC) de la Universidad de California, Santa Bárbara.

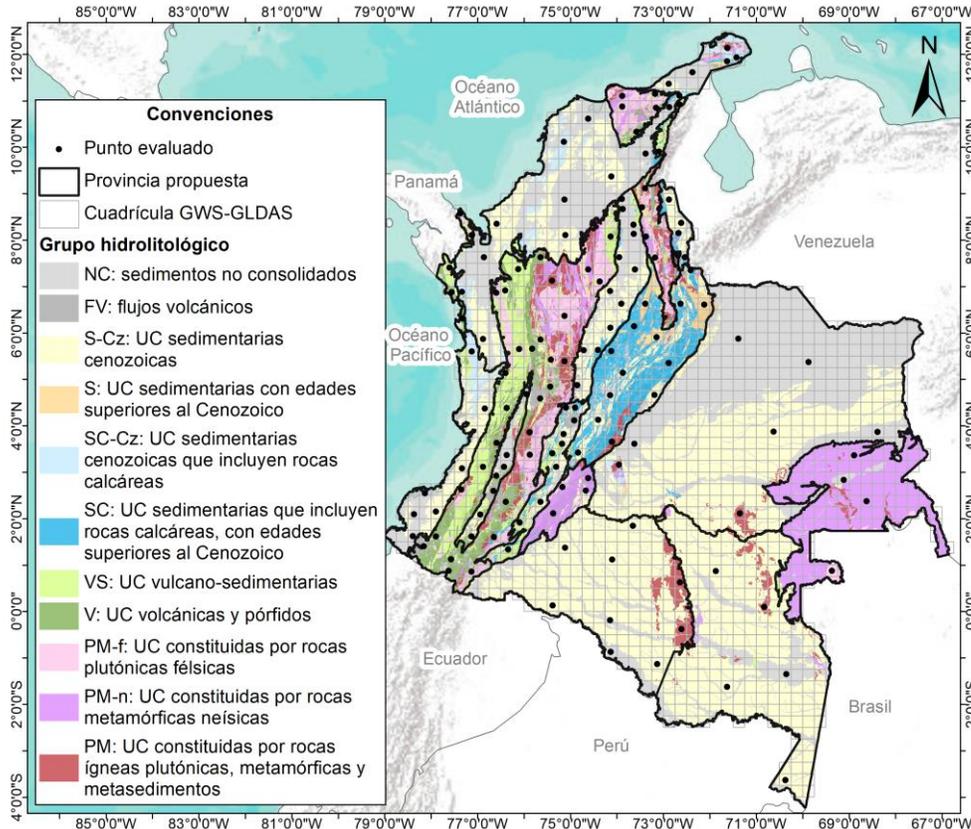
La variable GWS del modelo GLDAS versión 2.2 está disponible a escala temporal diaria, con resolución espacial de $0,25^\circ$ (~30 km) y en varios formatos geospaciales (en este caso se usaron los datos en formato GeoTIFF) en la plataforma Giovanni de la NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>), donde se encuentran disponibles todas las versiones y variables del modelo GLDAS. La variable representa cambios en el almacenamiento de aguas subterráneas poco profundas en lámina de agua [mm] y se acota en este trabajo como “GWS-GLDAS”.

Los datos de la base de datos CHIRPS versión 2.0 se obtuvieron de la página web dispuesta para esto por el *Climate Hazard Center - CHC* de la Universidad de California, Santa Bárbara (<https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>). Las cuadrículas están disponibles en formato GeoTIFF, con una resolución espacial de $0,05^\circ$ (~5,5 km) y opciones de descarga de datos diarios, anuales, mensuales o cada 5 años, de precipitación en milímetros [mm] (“P-CHIRPS”).

Se usaron los datos mensuales de ambas variables (GWS-GLDAS y P-CHIRPS), para el periodo común de febrero de 2003 a febrero de 2021 (217 meses, sin datos faltantes) usando las unidades y resolución espacial originales. En el caso de GWS-GLDAS se procesaron los valores originales (diarios) para obtener datos mensuales. Dichos datos fueron usados para construir las series de tiempo y los ciclos anuales de ambas variables, además del rezago entre las series de P-CHIRPS y GWS-GLDAS, para **puntos** específicos ubicados el interior de las provincias propuestas en la etapa dos (2). Adicionalmente se obtuvieron las cuadrículas de los valores medios anuales de las dos (2) variables.

Estos **puntos** ubicados al interior de las provincias hidrogeológicas propuestas se determinaron para evaluar el comportamiento de las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS asociado a diferentes tipos de rocas dentro de cada provincia. Se definieron un total de 146 puntos, entre dos (2) y 30 por cada provincia según la extensión y variedad de grupos hidrolitológicos y unidades cronoestratigráficas. La ubicación de los puntos se hizo manualmente procurando representar los diferentes tipos de roca presentes en cada provincia y que cada punto se asociara a un pixel de GWS-GLDAS que estuviera dominado por un grupo hidrolitológico, por esta razón los puntos no constituyen una cuadrícula exacta. En la Figura 2-8 se muestra la ubicación de estos puntos, respecto a la cuadrícula de los datos de GWS-GLDAS, los grupos hidrolitológicos definidos y la delimitación de las provincias propuestas que será presentada en el siguiente capítulo.

Figura 2-8. Distribución espacial de los puntos usados para evaluar el comportamiento de las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS asociado a los grupos hidrolitológicos en cada provincia, respecto a la cuadrícula de los datos de GWS-GLDAS y la delimitación de las provincias hidrogeológicas propuestas (UC: unidades cronoestratigráficas).



A cada uno de estos puntos se asocia un grupo hidrolitológico y la unidad geológica integrada, cuando aplica, según el AGC v2020 y para cada punto se presenta la serie de tiempo y el ciclo anual de las dos (2) variables, además de los coeficientes de correlación rezagada entre la serie de tiempo de P-CHIRPS y de GWS-GLDAS, para rezagos entre cero (0) y seis (6) meses. Los coeficientes de correlación rezagada se calcularon para conocer el tiempo de respuesta entre los eventos de lluvia y las anomalías de agua subterránea somera y verificar si muestran alguna relación con los diferentes tipos de roca. Esto se tuvo en cuenta para discretizar algunas provincias en regiones hidrogeológicas en la siguiente etapa.

2.3.4 Etapa cinco (5)

El análisis de las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS en los puntos evaluados en la etapa cuatro (4) y la distribución espacial de los valores medios anuales de estas variables, permitieron en algunas de las provincias hidrogeológicas propuestas encontrar comportamientos distintos y dar señales de respuestas hidrológicas diferentes o posibles

diferencias de potencial hidrogeológico. Con base en esto se propone una división en regiones hidrogeológicas para seis (6) de las provincias propuestas donde una de ellas (Serranía de Baudó) corresponde a una de las nuevas provincias incluidas en esta propuesta dominada por rocas volcánicas y vulcano-sedimentarias (en IDEAM (2010) considerada basamento).

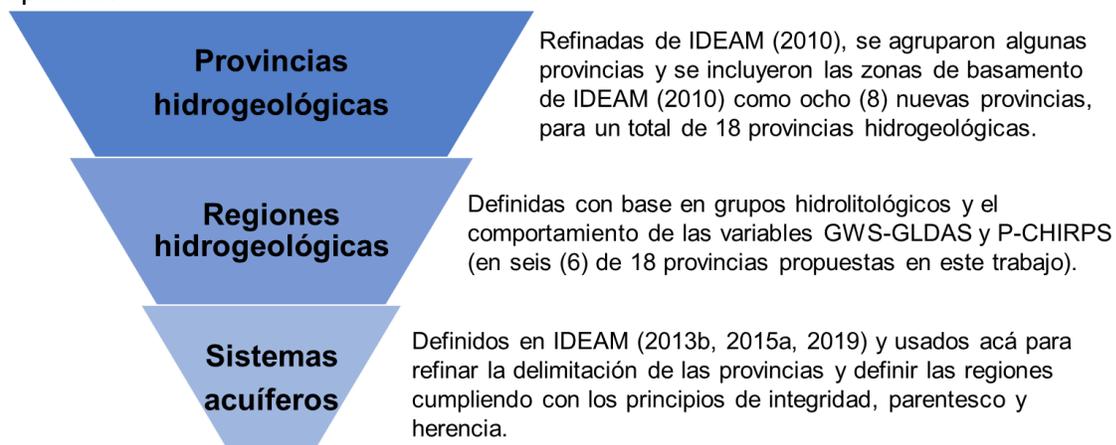
Esta división en regiones hidrogeológicas se propone donde se observan diferencias en magnitud, forma y amplitud en las series de tiempo y ciclos anuales de GWS-GLDAS y en los tiempos de rezago entre las series de P-CHIRPS y GWS-GLDAS entre los puntos evaluados en una misma provincia hidrogeológica y si esas diferencias se relacionan espacialmente con contactos estratigráficos o fallados del AGC 2020 o con cambios de grupos hidrolitológicos, siempre y cuando no se incumplan los principios de herencia y parentesco respecto a los sistemas acuíferos definidos por el IDEAM (2015a, 2019) como la unidad de menor jerarquía en la zonificación hidrogeológica del 2013 (IDEAM, 2013b).

3. Zonificación propuesta

En este capítulo se describe la implementación de la metodología propuesta, la delimitación de 18 provincias hidrogeológicas propuestas a partir de IDEAM (2010) y su división en regiones hidrogeológicas con base en las anomalías de almacenamiento de agua subterránea asociadas a los distintos grupos hidrolitológicos que conforman las provincias, de acuerdo con la metodología propuesta y la información disponible en Colombia.

En la Figura 3-1 se muestran las unidades de análisis consideradas en la zonificación propuesta. Los sistemas acuíferos (IDEAM, 2015a, 2019) constituyen la unidad de menor jerarquía en la zonificación hidrogeológica del IDEAM (2013b), así que, en este trabajo se tuvieron en cuenta al momento de refinar la delimitación de las provincias hidrogeológicas propuestas y la definición de las regiones hidrogeológicas para cumplir con los principios de parentesco y herencia, pero estos cuerpos no fueron analizados dado que sería necesario un nivel mayor de detalle al tratado en esta propuesta.

Figura 3-1. Orden jerárquico de las unidades de análisis en la zonificación hidrogeológica propuesta.



3.1 Implementación de la metodología propuesta

El primer paso consistió en determinar qué incluir de la información revisada como ya se describió, por lo que se toma como punto de partida las provincias hidrogeológicas actuales del IDEAM (2010) y se modifican para actualizarlas con información geológica reciente y homogenizada por el SGC, para incluir las rocas cristalinas denominadas como basamento en IDEAM (2010) y para aplicar los principios de **integridad, parentesco y herencia** ya mencionados.

Las zonas de basamento se incluyen como nuevas provincias hidrogeológicas siguiendo la codificación del IDEAM (2010, 2013b, 2015a). Se conserva la clasificación en provincias costeras (PC), intramontanas (PM) y pericratónicas (PP). Los códigos de las provincias de esta propuesta que difieren con las del IDEAM, se indican con un asterisco al final.

La delimitación y descripción de las provincias hidrogeológicas del IDEAM se presentan en el Estudio Nacional del Agua – ENA 2010 (IDEAM, 2010). La delimitación de los sistemas acuíferos que se mencionan en estos documentos se encuentra en el Anexo 4 del ENA 2014 (IDEAM, 2015a) y en el ENA 2018 (IDEAM, 2019).

Cuando la delimitación de las provincias IDEAM (2010) dividía un sistema acuífero incumpliendo los principios de **parentesco y herencia**, se modificó el límite siguiendo contactos o fallas y cuando no fuera posible ajustar estos límites de acuerdo con los principios, se unieron varias provincias hidrogeológicas de IDEAM (2010) en una sola, considerando el predominio de un cierto tipo de roca.

Los principales cambios y observaciones respecto a las provincias hidrogeológicas actuales de IDEAM (2010) se listan a continuación:

- Las áreas de basamento se dividen en varias provincias hidrogeológicas, sin embargo, no se nombran como provincias los altos estructurales y el basamento correspondiente a rocas de la Serranía de la Macarena, porque cortan la continuidad de las provincias Amazonas y Llanos Orientales.
- Las provincias costeras Cesar Ranchería, Guajira, Sinú San Jacinto, Urabá y Valle Bajo del Magdalena de IDEAM (2010) se agrupan en una sola provincia denominada Costera – Atlántico, con el fin de cumplir los principios de parentesco y herencia respecto a los sistemas acuíferos en estas zonas y porque presentan homogeneidad en los grupos hidrolitológicos.
- Las provincias costeras Chocó y Tumaco de IDEAM (2010) se agrupan en una misma provincia denominada Costera – Pacífico, con el fin de cumplir los principios de parentesco y herencia respecto a los sistemas acuíferos en estas zonas y porque presentan homogeneidad en los grupos hidrolitológicos.
- Nuevo límite entre la provincia Llanos Orientales y las provincias de la cuenca del Amazonas (Caguán-Putumayo, Vaupés-Amazonas) considerando la homogeneidad geológica (superficial) de dichas provincias, ya que a excepción del escudo guyanés y sedimentos y metasedimentos ordovícicos de la Serranía de Chiribiquete, están

- conformadas por rocas sedimentarias cenozoicas y depósitos aluviales, se propone un nuevo límite dado por la divisoria de las cuencas de los ríos Amazonas y Orinoco.
- El límite entre las provincias Caguán-Putumayo y Vaupés-Amazonas se mantiene, debido a que no hay evidencia superficial del alto estructural que las separa en Barrero et al. (2007) y con los límites de las unidades cronoestratigráficas no es posible establecer la división al sur de estas provincias. Es posible que esto afecte el principio de herencia debido a que en el mapa de sistemas acuíferos presentado en el ENA 2018 (IDEAM, 2019) se puede ver un nuevo sistema acuífero (SAP2.1) en las provincias Caguán Putumayo y Vaupés Amazonas, pero no está documentado en las fichas que describen estos sistemas. Debido a esto y a la homogeneidad litológica de estas zonas, en un trabajo futuro puede evaluarse la posibilidad de que conformen una sola provincia hidrogeológica.
 - La cuenca Amagá no se toma como un elemento aislado. Se incluye en la provincia hidrogeológica Cordilleras Central y Occidental. En Barrero et al. (2007) la cuenca Amagá se incluye en la lista de cuencas sedimentarias que deben ser evaluadas para la extracción de hidrocarburos no convencionales y en IDEAM (2010) no se considera como una provincia hidrogeológica.
 - En la provincia Valle Medio del Magdalena, se mantiene el límite fallado al norte y este divide los sistemas acuíferos de La Mojana y Cesar, incumpliendo el principio de herencia. No se observó una relación clara entre el límite en las unidades cronoestratigráficas del AGC v2020 y los sistemas acuíferos. En un trabajo futuro, es necesario revisar con geología más detallada y otros estudios para ajustar este límite.
 - Las provincias son áreas continuas a excepción de Cauca-Patía que está contenida en el polígono de las cordilleras Central y Occidental, debido a que la provincia Cauca-Patía es considerada con potencial hidrogeológico en las delimitaciones de IDEAM (2010, 2015a) y encierra el sistema acuífero del Valle del Cauca que hace parte del 27% de sistemas acuíferos con un nivel de conocimiento adecuado o medio de acuerdo con IDEAM (2015a).

En la Tabla 3-1 y la Figura 3-2 se presenta la relación y diferencias en extensión y nomenclatura entre las provincias hidrogeológicas actuales del IDEAM (2010) y su modificación propuesta en este trabajo. En IDEAM (2010) se tienen 17 provincias (incluyendo la provincia costera Isla de San Andrés) y zonas de basamento, en esta propuesta se determinan 18 provincias hidrogeológicas en las que se separan las zonas de basamento en ocho (8) provincias y no se incluyen las zonas insulares. Las áreas difieren debido a que en esta propuesta se agruparon provincias de IDEAM (2010) en una sola provincia y a que se refinaron los límites, en el caso de la provincia PC2* aunque se agrupan dos (2) provincias de IDEAM (2010), el área es menor debido a que la delimitación cambió con base en la divisoria entre las zonas hidrográficas Caribe y Pacífico.

En la Tabla 3-2 se listan los sistemas acuíferos que incumplen el principio de herencia respecto a las provincias hidrogeológicas actuales del IDEAM (2010) considerando los límites fallados o de las unidades cronoestratigráficas en las que se enmarcan. Lo anterior

se determinó con base en la cartografía digital de las provincias hidrogeológicas (IDEAM, 2010) y los sistemas acuíferos del ENA 2014 (IDEAM, 2015a) disponibles en el geoportal del IDEAM y de acuerdo con la figura de sistemas acuíferos presentada en el ENA 2018 (IDEAM, 2019), ya que estos últimos no se encuentran aún publicados en cartografía digital. Finalmente, en la Figura 3-3 se puede ver la distribución espacial de las provincias hidrogeológicas propuestas.

Tabla 3-1. Comparación entre la nomenclatura y áreas de las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo y las provincias definidas en IDEAM (2010, 2013b).

Provincias IDEAM (2010, 2013b)			Provincias propuestas en este trabajo		
Código	Nombre	Área [km ²]	Código	Nombre	Área [km ²]
PC4	Cesar Ranchería	11.666	PC1*	Costera - Atlántico	126.162
PC3	Guajira	13.763			
PC1	Sinú San Jacinto	39.610			
PC5	Urabá	9.426 **			
PC2	Valle Bajo del Magdalena	38.011			
PC6	Chocó	38.481	PC2*	Costera - Pacífico	35.688
PC7	Tumaco	23.623			
PC8	Isla San Andrés	143.317 **	No tomada en cuenta en este trabajo		
PP1	Caguán Putumayo	110.266	PP1	Caguán Putumayo	121.465
PP2	Vaupés Amazonas	154.485	PP2	Vaupés Amazonas	156.323
PP3	Llanos Orientales	229.557	PP3	Orinoquía - Llanos Orientales	278.757
PM1	Valle Medio del Magdalena	32.948	PM1	Valle Medio del Magdalena	32.954
PM2	Valle Alto del Magdalena	21.497	PM2	Valle Alto del Magdalena	20.342
PM3	Cauca Patía	12.800	PM3	Cauca Patía	12.271
PM4	Cordillera Oriental	71.744	PM4	Cordillera Oriental	72.389
PM5	Catatumbo	7.711	PM5	Catatumbo	8.006
PM6	Basamento - Acuifugas / Otros sistemas acuíferos en Cordillera Occidental - Central	134.562	PM6	Cordilleras Central y Occidental	144.549
	Basamento - Acuifugas	13.798	PM7*	Macizo de Garzón	14.536
	Basamento - Acuifugas	17.140	PM8*	Macizo de Santander	17.286
	Basamento - Acuifugas	1.016	PM9*	Serranía del Perijá	2.681
	Basamento - Acuifugas	92.610	PP4*	Escudo de Guyana	78.189
	Basamento - Acuifugas	2.322	PC3*	Serranía del Baudó	4.299
	Basamento - Acuifugas	822	PC4*	Serranía del Darién	1.585
	Basamento - Acuifugas	13.279	PC5*	Sierra Nevada Santa Marta	12.919
	Alto estructural (Amagá)	2.823	No aplica	Incluido en PM6	
	Alto estructural (Chiribiquete)	18.519		Incluido en PP1	
	Alto estructural (Arco de Vaupés)	25.313		Incluido en PP2 y PP3	

Tabla 3-1. Comparación entre la nomenclatura y áreas de las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo y las provincias definidas en IDEAM (2010, 2013b).

Provincias IDEAM (2010, 2013b)			Provincias propuestas en este trabajo		
Código	Nombre	Área [km ²]	Código	Nombre	Área [km ²]
No se consideran como provincias la Serranía de La Macarena (basamento en IDEAM, 2010) y los altos estructurales de IDEAM (2010), debido a que se encuentran dentro de otras provincias.					
* Codificación propuesta en este trabajo que difiere de IDEAM (2010, 2013b).					
** Incluye zona marina.					

Tabla 3-2. Sistemas acuíferos (IDEAM, 2015a, 2019) que no cumplen el principio de herencia (definido en la zonificación hidrogeológica de Francia) con las provincias hidrogeológicas delimitadas en IDEAM (2010).

Sistema acuífero (IDEAM, 2015a, 2019)	Provincia hidrogeológica IDEAM (2010)	Observación
SAC1.6 Ciénaga - Fundación	PC1 Sinú - San Jacinto	En esta propuesta hace parte de la provincia PC1* Costera-Atlántico
	PC2 Valle Bajo del Magdalena	
SAC2.1 Bajo Magdalena	PC1 Sinú - San Jacinto	En esta propuesta hace parte de la provincia PC1* Costera-Atlántico
	PC2 Valle Bajo del Magdalena	
SAC2.2 La Mojana	PC2 Valle Bajo del Magdalena	No ajustado en esta propuesta. No se observó una relación clara entre el límite en las unidades cronoestratigráficas del AGC v2020 y los sistemas acuíferos
	PM1 Valle Medio del Magdalena	
SAC4.1 Cesar	PC2 Valle Bajo del Magdalena	En esta propuesta hace parte de la provincia PC1* Costera-Atlántico
	PC4 Cesar - Ranchería	
	PC2 Valle Bajo del Magdalena	
SAC5.1 Urabá	PC1 Sinú - San Jacinto	En esta propuesta hace parte de la provincia PC1* Costera-Atlántico
	PC5 Urabá	
	PC6 Chocó	
SAM6.5 Bajo Cauca Antioqueño	PC2 Valle Bajo del Magdalena	En esta propuesta hace parte de la provincia PC2* Costera-Pacífico
	Basamento Cordillera Central y Occidental	
SAC7.2 Raposo	PC6 Chocó	En esta propuesta hace parte de la provincia PC2* Costera-Pacífico
	PC7 Tumaco	
SAC7.1 Depósitos aluviales llanura del Pacífico	PC6 Chocó	En esta propuesta hace parte de la provincia PC2* Costera-Pacífico
	PC7 Tumaco	
SAM6.1 Glacis del Quindío	PM3 Cauca - Patía	En esta propuesta hace parte de la provincia PM6 Cordillera Central y Occidental
	Basamento Cordillera Central y Occidental	
SAP2.1 (no se registra el nombre)	PP1 Caguán - Putumayo	No ajustado en esta propuesta porque el sistema acuífero no se encuentra documentado.
	PP2 Vaupés Amazonas	

Figura 3-2. Comparación entre la distribución espacial de la delimitación de las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo y las provincias definidas en IDEAM (2010).

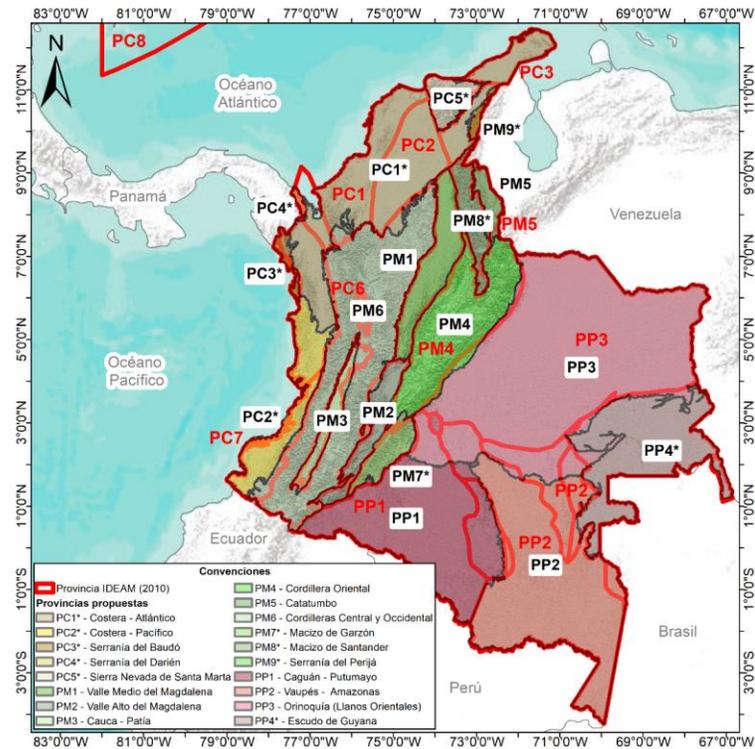
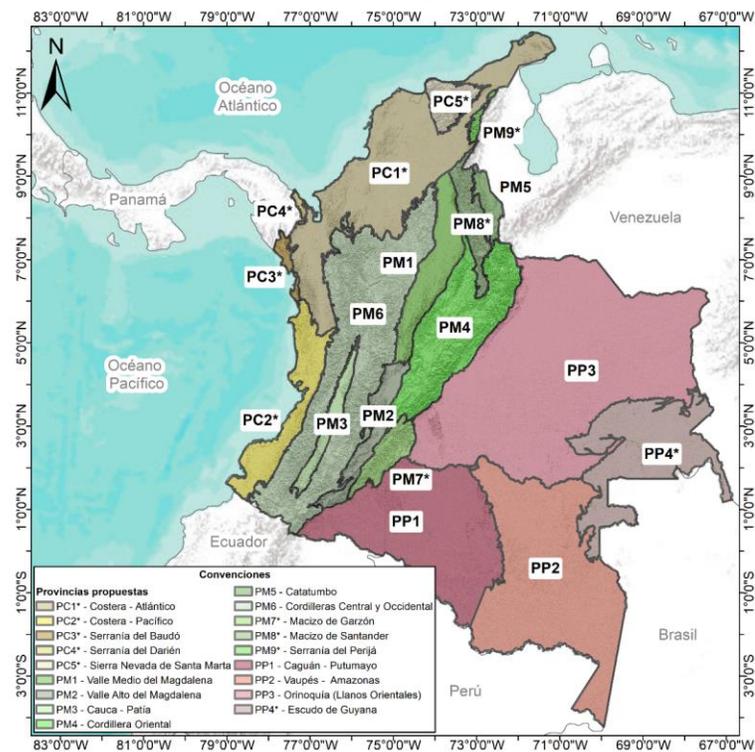


Figura 3-3. Delimitación de las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo.



Con el objetivo de relacionar la variable de anomalía de almacenamiento de agua subterránea (GWS-GLDAS) con un tipo de roca y debido a la gruesa resolución de GWS-GLDAS se establecen “grupos hidrolitológicos” reuniendo unidades cronoestratigráficas del AGC 2020 (1:500.000) (J. Gómez et al., 2020) según tipos de roca con formas similares de almacenar y transmitir agua subterránea, como criterio complementario a las características geológicas que no fueron suficientes para discretizar el potencial hidrogeológico de rocas cristalinas. En el caso de las rocas cristalinas, con base en la descripción de las unidades cronoestratigráficas, se diferenciaron las rocas con mayor potencial de generar suelos gruesos, ya que estos representan un mayor potencial hidrogeológico de acuerdo con la información presentada en el numeral 1.2. Los grupos propuestos son los siguientes (Figura 3-4):

- **NC:** sedimentos no consolidados.
- **FV:** flujos volcánicos.
- **S-Cz:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias cenozoicas.
- **SC-Cz:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias cenozoicas que incluyen rocas calcáreas.
- **S:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias con edades superiores al Cenozoico.
- **SC:** unidades cronoestratigráficas sedimentarias que incluyen rocas calcáreas, con edades superiores al Cenozoico.
- **VS:** unidades cronoestratigráficas vulcano-sedimentarias.
- **V:** unidades cronoestratigráficas volcánicas y pórfidos.
- **PM:** unidades cronoestratigráficas constituidas por rocas ígneas plutónicas y metamórficas (incluyendo metasedimentos).
- **PM-f:** unidades cronoestratigráficas constituidas por rocas plutónicas félsicas.
- **PM-n:** unidades cronoestratigráficas constituidas por rocas metamórficas neísicas.

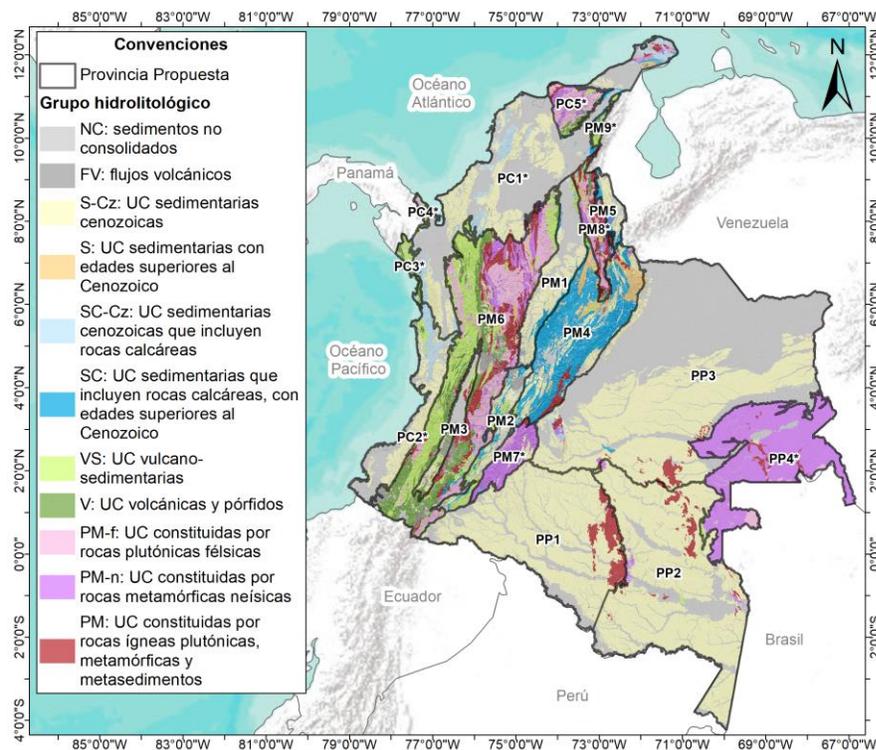
Se propone una división al interior de las provincias hidrogeológicas, llamadas **regiones hidrogeológicas** delimitadas considerando las siguientes variables:

- Grupos hidrolitológicos: unidades cronoestratigráficas del Atlas Geológico de Colombia (AGC) a escala 1:500.000 versión 2020 (J. Gómez et al., 2020), agrupadas como se ha descrito.
- GWS-GLDAS [mm]: anomalía de almacenamiento de agua subterránea en lámina de agua, que corresponde a los datos de la misión GRACE asimilados en el modelo GLDAS v2.2 (Li et al., 2019), con resolución espacial de 0,25° (~30 km). Datos mensuales del 01 de febrero de 2003 al 28 de febrero de 2021.
- P-CHIRPS [mm]: precipitación satelital de la base de datos CHIRPS (Funk et al., 2015), con resolución espacial de 0,05° (~5,5 km). Datos mensuales del 01 de febrero de 2003 al 28 de febrero de 2021.

Para evaluar el comportamiento de las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS asociado a diferentes tipos de rocas dentro de cada provincia, se ubicaron puntos relacionados con el grupo hidrolitológico predominante en el pixel de GWS-GLDAS de resolución más gruesa.

La ubicación de los puntos se hizo de forma manual procurando que el pixel de GWS-GLDAS estuviera dominado por un grupo hidrológico. A cada punto se asocia un grupo hidrológico y la unidad geológica integrada, cuando aplica, según el AGC v2020 y para cada punto se presenta la serie de tiempo y el ciclo anual de las dos (2) variables, además de los coeficientes de correlación rezagada entre la serie de tiempo de P-CHIRPS y de GWS-GLDAS, para rezagos entre cero (0) y seis (6) meses.

Figura 3-4. Grupos hidrológicos definidos en este trabajo, de acuerdo con el tipo de roca que conforman las unidades cronoestratigráficas (UC) del Atlas Geológico de Colombia versión 2020, respecto a las provincias hidrogeológicas propuestas en este trabajo.

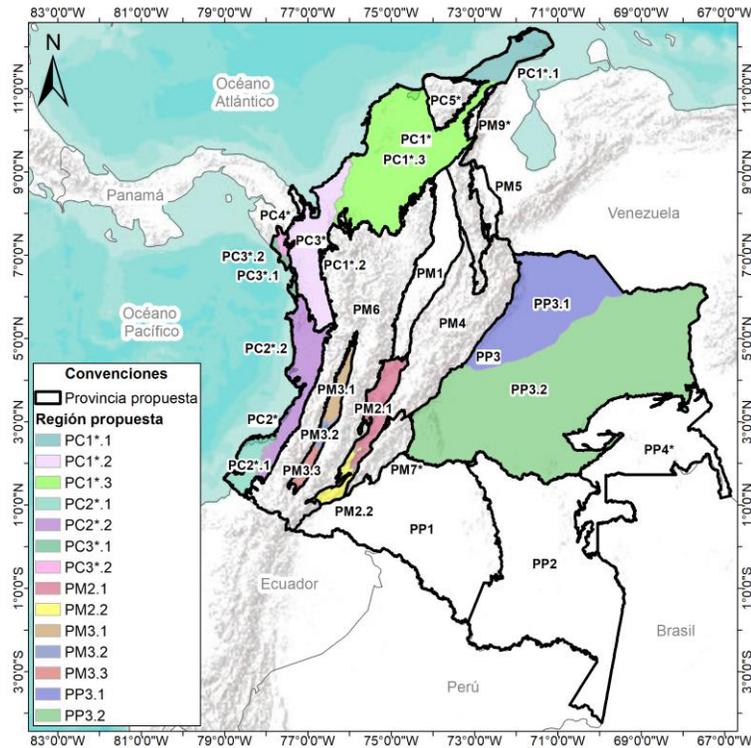


Con base en los resultados de los puntos evaluados y la distribución espacial de los valores medios anuales de GWS-GLDAS y P-CHIRPS, se propone una división en regiones hidrogeológicas (Figura 3-5) para seis (6) provincias: Costera - Atlántico, Costera - Pacífico, Serranía de Baudó, Alto Magdalena y Cauca-Patía, Llanos Orientales.

La descripción de las provincias y su división en regiones se presenta se detalla en los numerales 3.1.1 a 3.1.18. En algunas provincias se sugiere, para un trabajo futuro, revisar información geológica más detallada o estudios hidrogeológicos si es el caso, para delimitar de manera más precisa asegurando que se cumplan los principios de herencia y parentesco entre los diferentes niveles. Asimismo, a medida que se publique más información sobre los sistemas acuíferos o se definan nuevos cuerpos, sería necesario reevaluar los límites propuestos. La definición de las provincias, regiones y otras unidades

que puedan ser establecidas en un trabajo futuro es un proceso repetitivo que debe actualizarse a medida que se cuente con nuevo conocimiento, como se define para las zonas hidrogeológicas en República Checa (Sima, n.d.).

Figura 3-5. Delimitación de las regiones hidrogeológicas propuestas en este trabajo (subdivisión al interior de las provincias hidrogeológicas propuestas).



A continuación, se describen cada una de las provincias, indicando las diferencias respecto a la delimitación de IDEAM (2010).

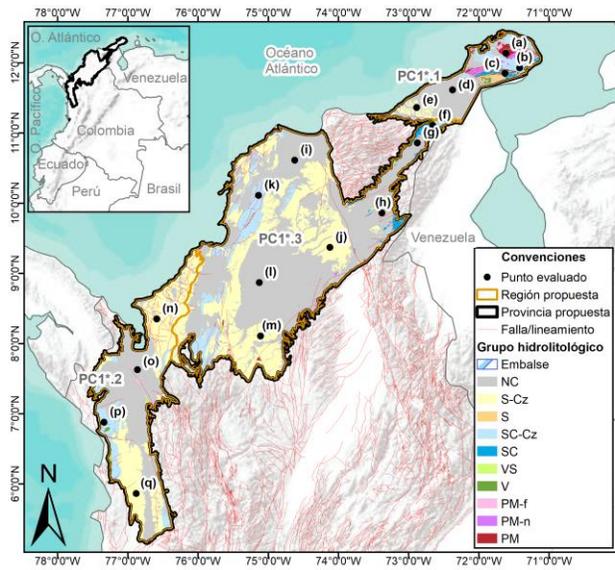
3.1.1 PC1* Costera - Atlántico

En esta provincia (Figura 3-6) se incluyen las provincias costeras de IDEAM (2010) llamadas Cesar Ranchería, Guajira, Sinú - San Jacinto, Urabá y Valle Bajo del Magdalena. Se agrupan en una única provincia donde predominan sedimentos no consolidados y rocas sedimentarias cenozoicas y asegurando que se cumpla el principio de herencia entre los sistemas acuíferos y la provincia, es decir, que un sistema acuífero no sea dividido en varias provincias hidrogeológicas, sino que esté contenido en una sola.

El límite occidental de la provincia está dado por la línea de costa y en el suroccidente por límites estratigráficos y la divisoria de las áreas hidrográficas Caribe y Pacífico. El límite oriental corresponde a límites estratigráficos y fallas como se describe en IDEAM (2010) pero ajustados a la cartografía del AGC versión 2020.

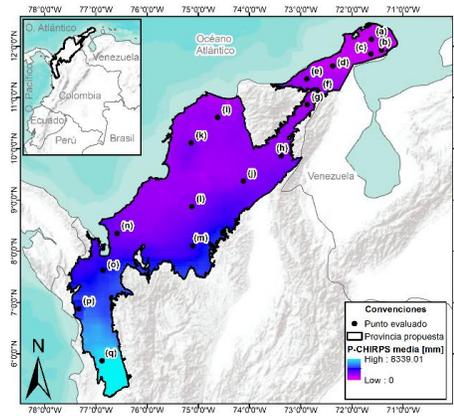
Figura 3-6. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Atlántico - PC1*.

(a) Grupos hidrolitológicos y delimitación de regiones hidrogeológicas propuestas en la provincia.

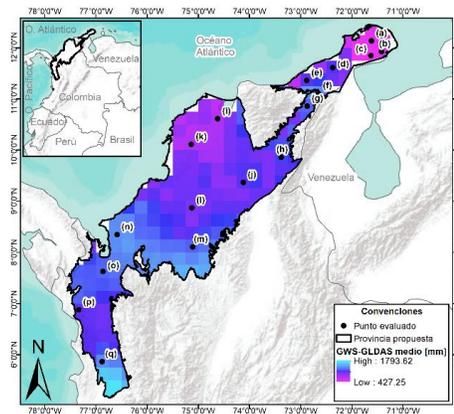


En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

(b) Distribución espacial de la precipitación media (P-CHIRPS) en la provincia.



(c) Distribución espacial de la media de la anomalía en el almacenamiento de agua subterránea (GWS-GLDAS) en la provincia.



En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-7, Figura 3-8), se observa que la mayoría de los puntos tienen una tendencia similar que exhibe, en general, un mínimo y un máximo al año. Sobresalen los puntos (p) y (q) con las menores amplitudes sin cambios pronunciados. En los puntos (n) y (o) las amplitudes también son bajas y los máximos no son tan marcados como en los otros puntos. Los valores más bajos de GWS-GLDAS se presentan en los puntos (a), (b) y (c) en el extremo norte de la Guajira, asociados a rocas sedimentarias y cristalinas y los más altos en el punto (f), al sur de la Guajira en formación sedimentaria cenozoica.

Sobresalen los picos a finales de los años 2011 y 2012 en los puntos (a) a (l) ubicados en el centro y norte de la provincia. En los puntos (m) a (q) en sedimentos cenozoicos y depósitos no consolidados no sobresalen estos máximos.

La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS (Figura 3-9) se da para los dos (2) meses de rezago en la mayoría de los puntos; para un (1) mes de rezago en los puntos (b) al norte de la provincia y (n), (o), (p) y (q) al sur. Solo el punto (l) tiene correlación más alta con un rezago de tres (3) meses.

El ciclo anual de P-CHIRPS (Figura 3-10, Figura 3-11) en los puntos ubicados al norte, (a) a (i), muestra una tendencia bimodal con máximos en mayo y octubre-noviembre. En los puntos del sur, (j) a (q), la tendencia es unimodal con valores más altos entre abril y noviembre. En el ciclo anual de GWS-GLDAS (Figura 3-10, Figura 3-11) se observa poca variación, los mayores valores se presentan en diciembre y noviembre. Los puntos (k), (l), (m), (j) e (i) se aproximan a una tendencia unimodal con valores más altos en noviembre y diciembre.

En la Figura 3-12 se presenta un gráfico de barras con las amplitudes de las series de tiempo de GWS-GLDAS para cada punto, los valores son similares a excepción de los menores valores en los puntos (n), (p) y (q).

Regiones propuestas (Figura 3-6): Guajira (puntos a, b, c, d), delimitada al sur por la falla de Oca y el cambio estratigráfico a rocas sedimentarias calcáreas. Urabá (puntos n, o, p, q), separada al este por fallas para no dividir el sistema acuífero La Mojana (SAC1.7) conservando el principio de herencia (fallas del Río Verde, Almagritas, Floresanta, Pueblo Búho, de La Mora, de La Cuchara, de Manantial).

Se observa una posible división entre las zonas que representan los puntos (f), (g), (h) y los puntos (i), (j), (k), (l), (m), pero es necesario revisar con detalle la delimitación de los sistemas acuíferos en relación con las unidades cronoestratigráficas para que se cumpla el principio de herencia.

Figura 3-7. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

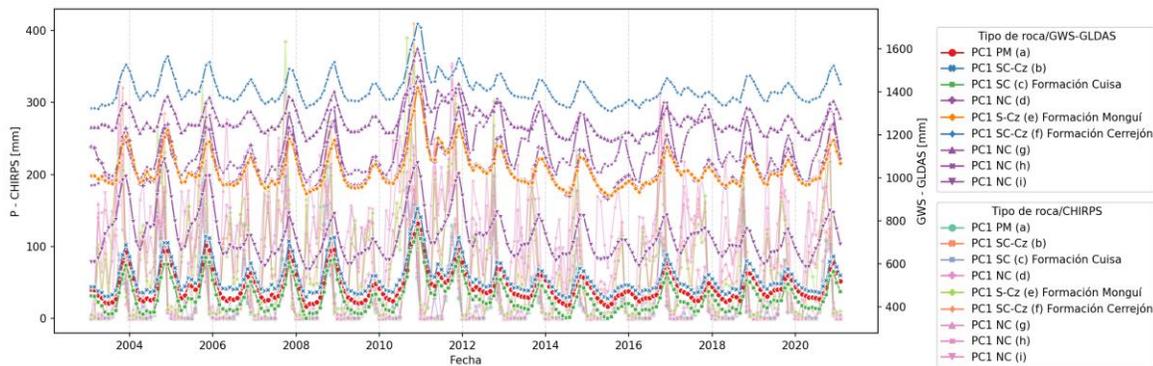


Figura 3-8. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

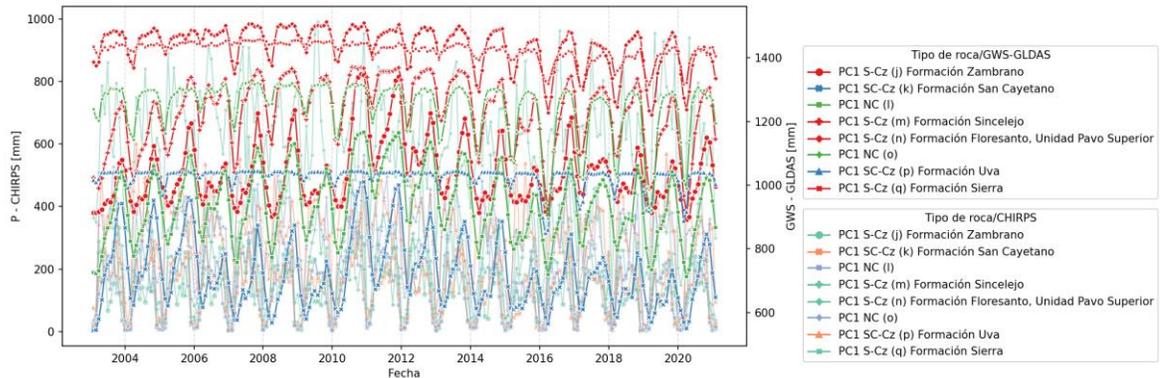


Figura 3-9. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

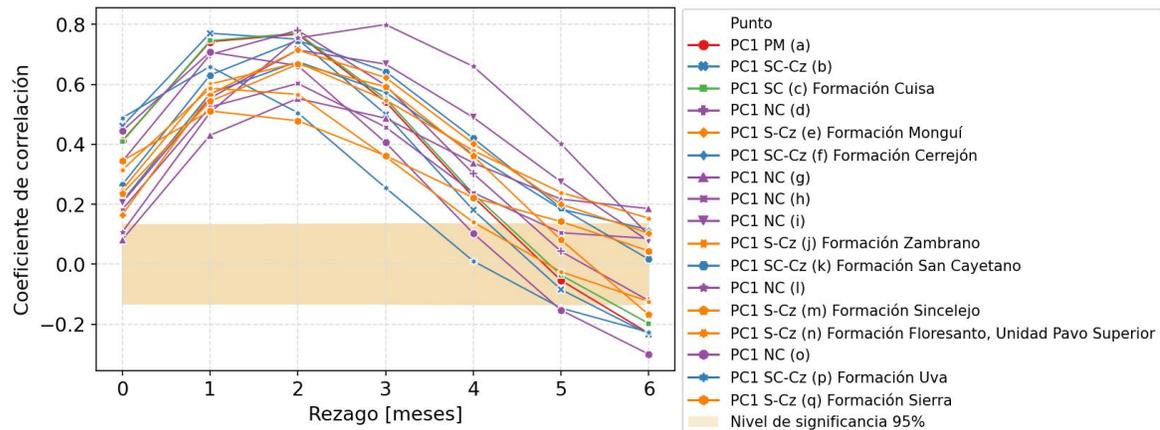


Figura 3-10. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

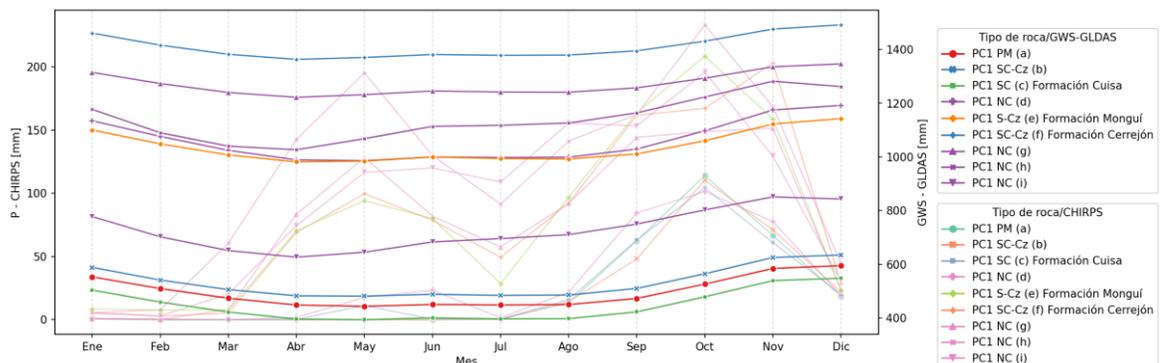


Figura 3-11. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

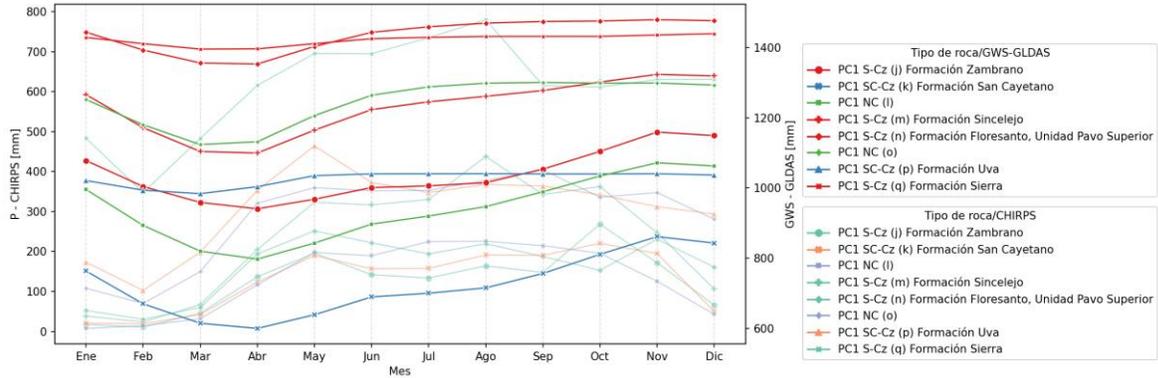
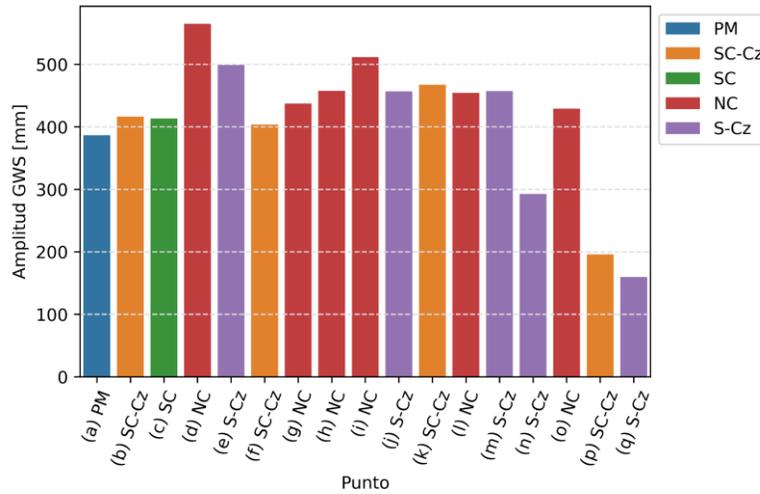


Figura 3-12. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.

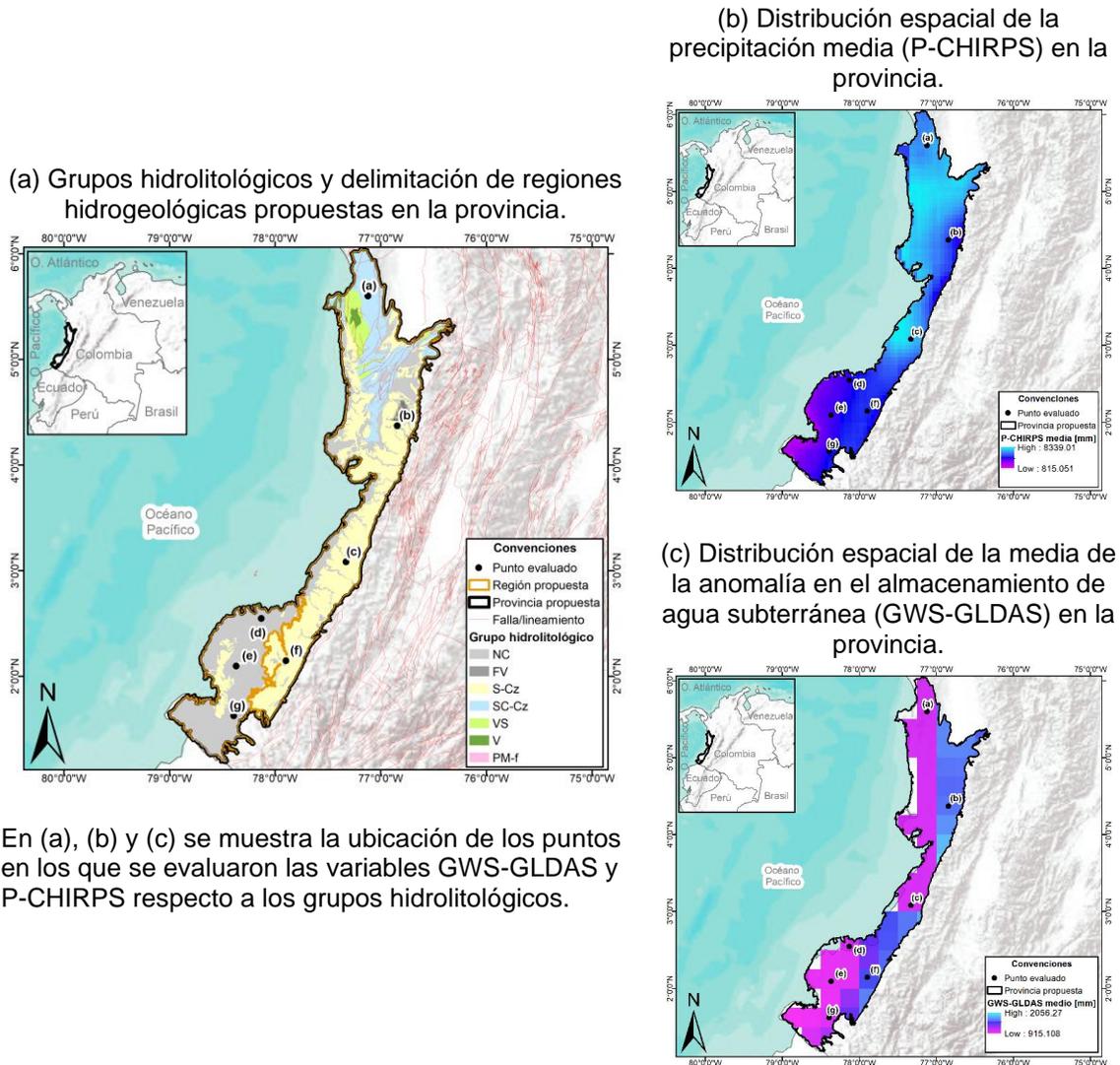


3.1.2 PC2* Costera - Pacífico

En esta provincia (Figura 3-13) se incluyen las provincias costeras de IDEAM (2010) llamadas Chocó y Tumaco. Se agrupan en una única provincia donde predominan sedimentos no consolidados y rocas sedimentarias cenozoicas y asegurando que se cumpla el principio de herencia entre los sistemas acuíferos y la provincia, es decir, que un sistema acuífero no sea dividido en varias provincias hidrogeológicas, sino que esté contenido en una sola.

El límite norte de la provincia corresponde a la divisoria de las áreas hidrográficas Caribe y Pacífico, hacia el occidente, a la línea de costa. El límite oriental está marcado por cambios estratigráficos con rocas volcánicas, vulcano-sedimentarias y flujos volcánicos de la cordillera Occidental y el límite sur está dado por el límite político con Ecuador.

Figura 3-13. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Pacífico - PC2*.



En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-14), se observa que el rango de variación es más bajo que en la provincia Atlántica. Los valores más altos se presentan en los puntos (b) y (f) en sedimentos cenozoicos, los más bajos están en los puntos (d), (e) y (g) en depósitos no consolidados. Las mayores amplitudes se dan en los puntos (d), (e) y (f).

La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da en los siete (7) puntos para un (1) mes de rezago (Figura 3-15). El ciclo anual de P-CHIRPS no hay tendencia predominante en los puntos, mientras que el ciclo anual de GWS-GLDAS muestra una tendencia similar para todos los puntos, con valores casi constantes todo el año (Figura 3-16).

En la Figura 3-17 se puede ver un gráfico de barras que relaciona los valores de amplitud de la serie de tiempo de GWS-GLDAS con el tipo de roca de cada punto. Para un mismo

tipo de roca los valores varían y sobresalen los valores bajos en los puntos (a) y (c) en rocas sedimentarias terrígenas y calcáreas cenozoicas.

Regiones propuestas (Figura 3-13): al sur en los depósitos no consolidados asociados a los puntos (d), (e) y (g) que corresponden principalmente depósitos y llanuras aluviales, abanicos aluviales y depósitos coluviales.

Figura 3-14. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

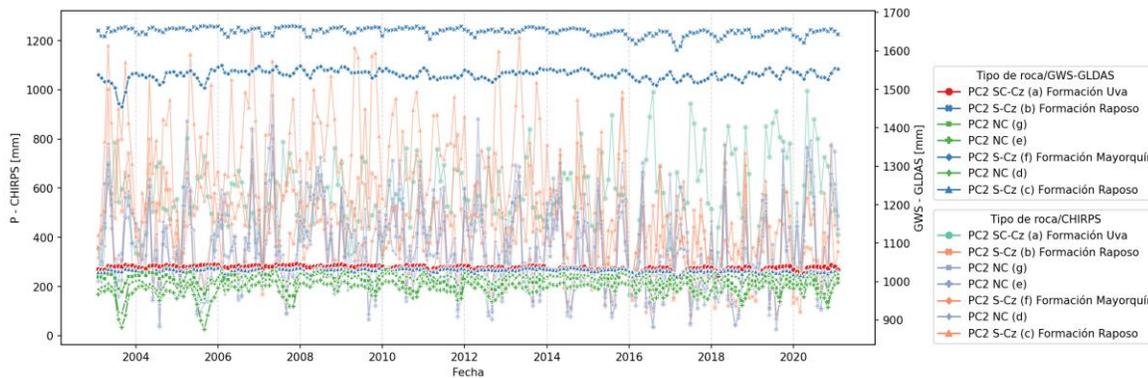


Figura 3-15. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

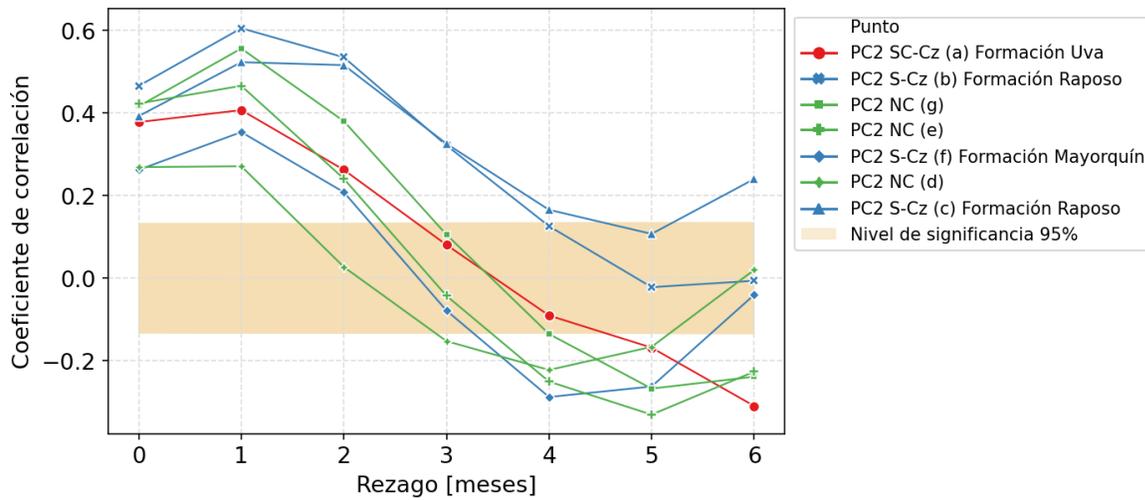


Figura 3-16. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

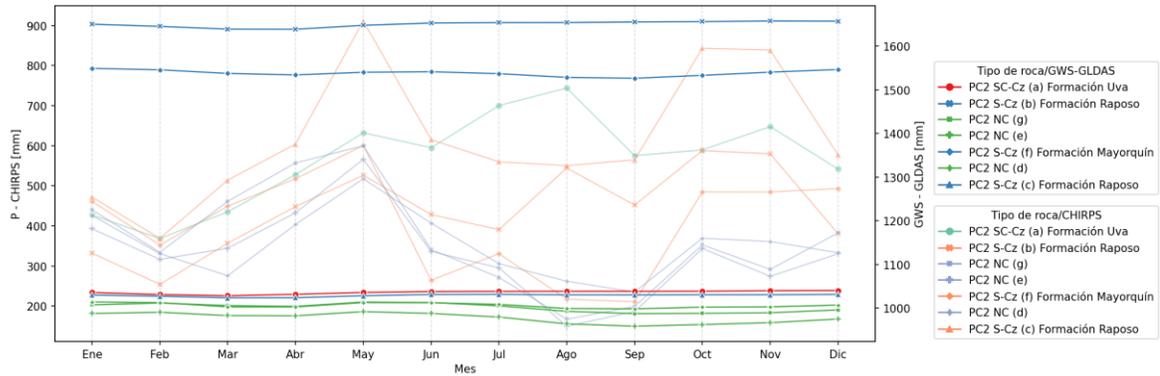
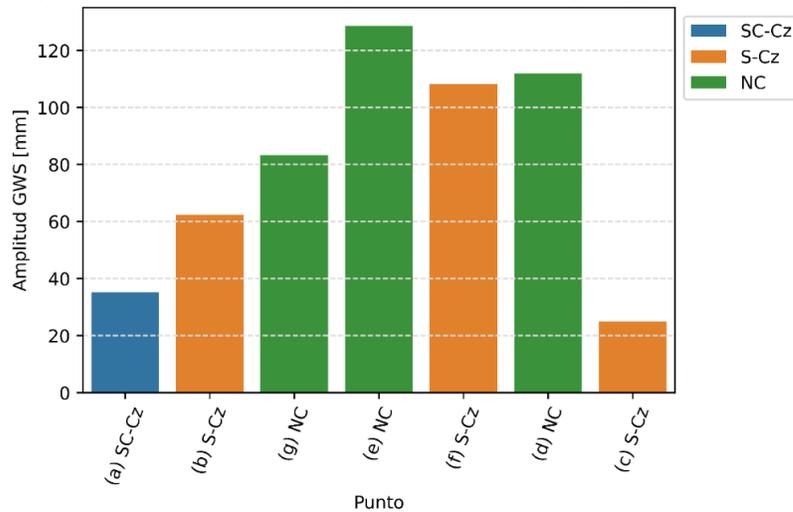
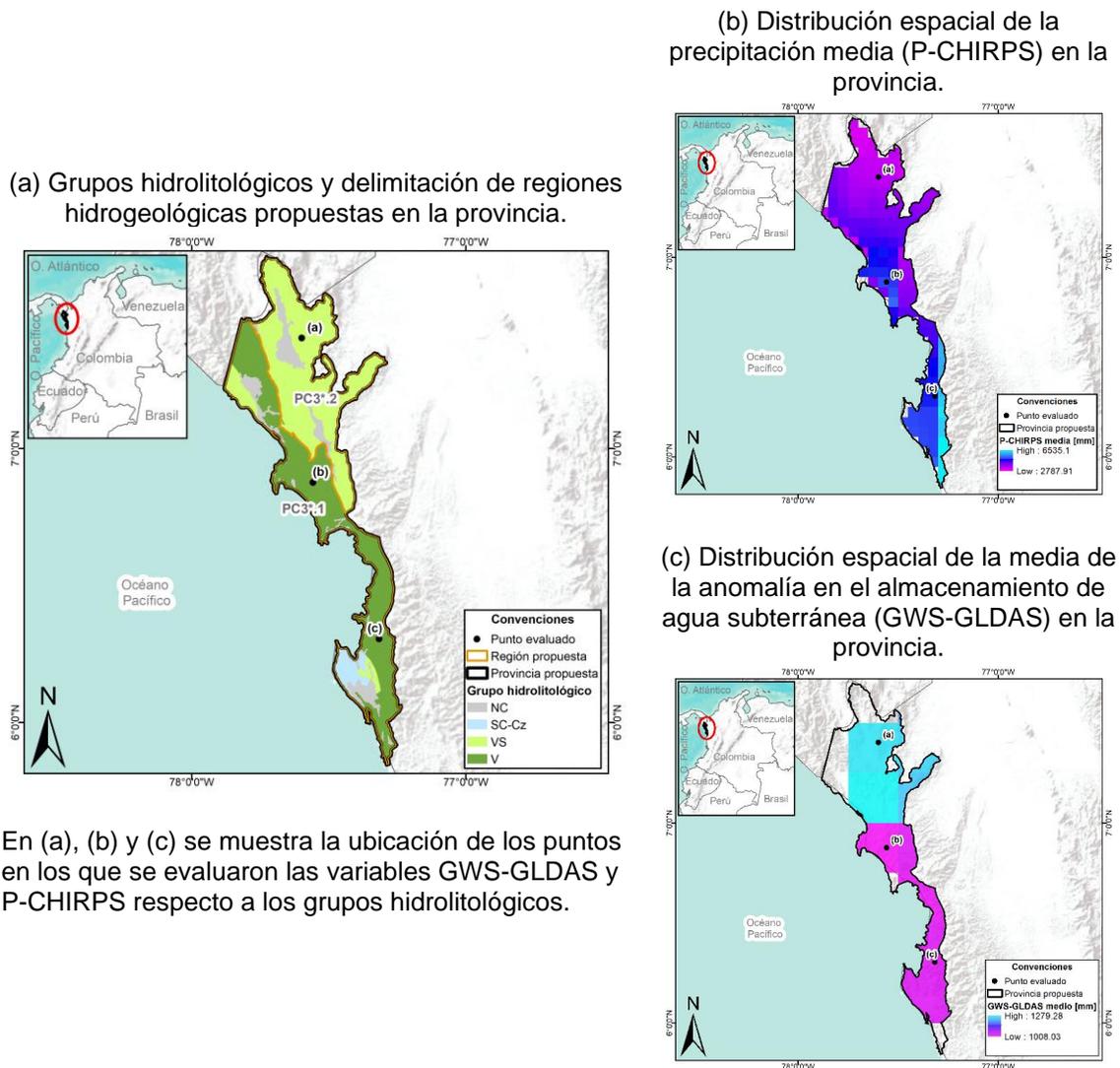


Figura 3-17. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.3 PC3* Serranía de Baudó

Compuesta principalmente por rocas volcánicas y vulcano-sedimentarias, en IDEAM (2010) considerada basamento. Se ajusta la delimitación de IDEAM (2010) siguiendo límites estratigráficos, aumenta su extensión al este delimitada por unidades vulcano-sedimentarias. Al norte se limita por la división política con Panamá, al oeste está limitada por la línea de costa (Figura 3-18).

Figura 3-18. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Serranía de Baudó - PC3*.

En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-19), se observa que los tres (3) puntos tienen tendencia similar, con valores más altos y mayor amplitud en el punto (a) en rocas vulcano-sedimentarias. La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da en los tres (3) puntos para un (1) mes de rezago (Figura 3-20).

En el ciclo anual de GWS-GLDAS se observa el mismo comportamiento temporal, en febrero, marzo y abril se presentan los valores más bajos en los tres (3) puntos y de junio a diciembre los valores son más altos y constantes (Figura 3-21).

La amplitud de las series de tiempo (Figura 3-22) es mayor en el punto (a) relacionado con el grupo hidrolitológico de rocas vulcano-sedimentarias, que en los otros dos (2) puntos asociados a rocas volcánicas.

Regiones propuestas (Figura 3-18): una zona al norte y otra zona al sur delimitadas por el contacto entre unidades vulcano-sedimentarias y volcánicas.

Figura 3-19. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia y representan la variable P-CHIRPS.

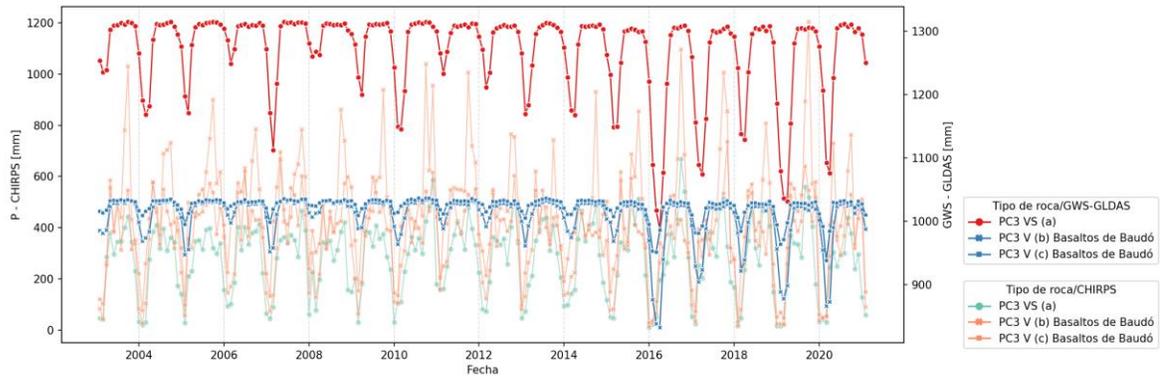


Figura 3-20. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

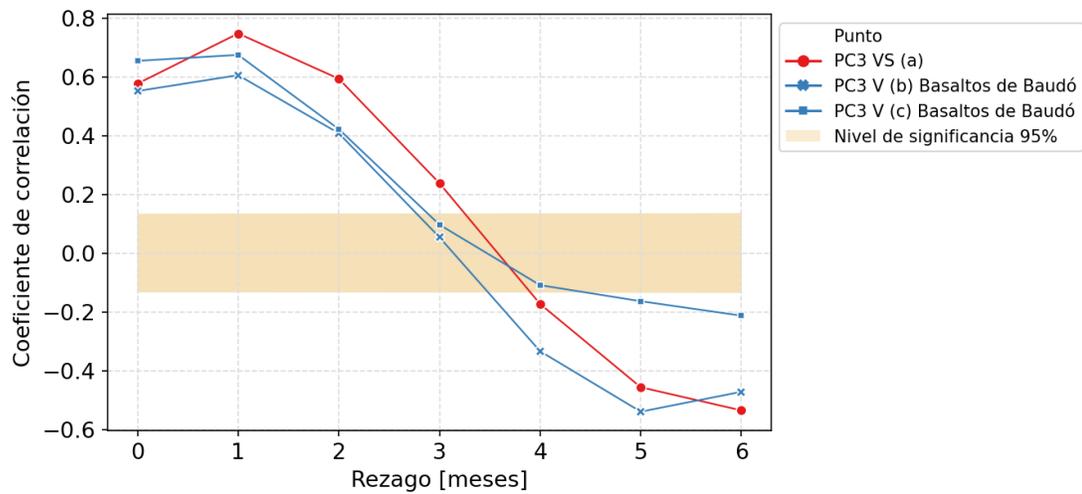


Figura 3-21. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

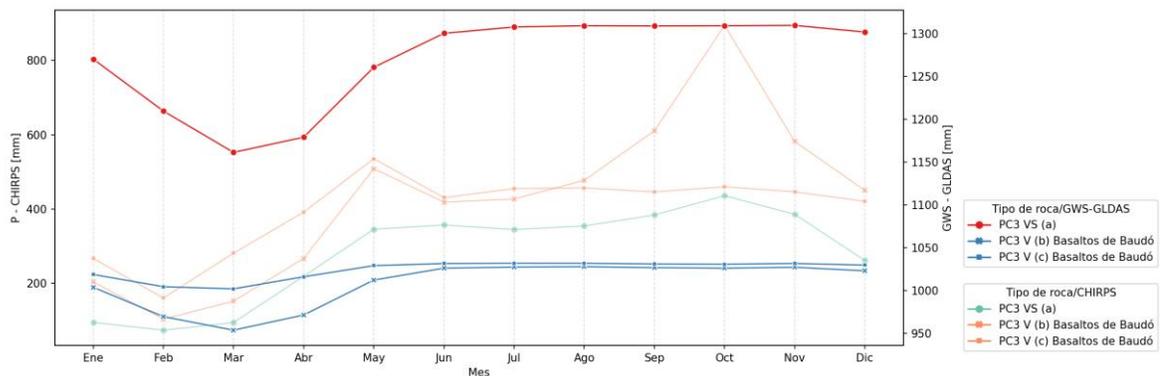
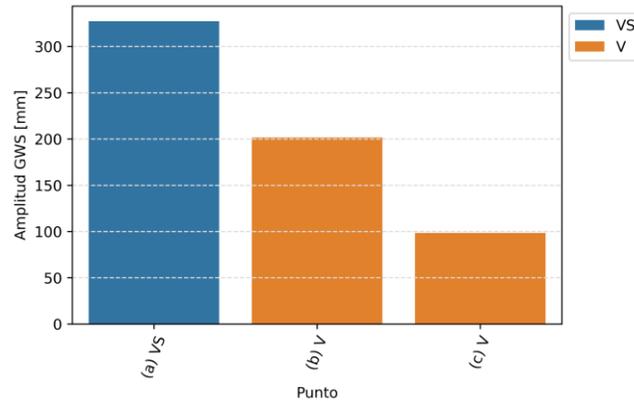


Figura 3-22. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.

3.1.4 PC4* Serranía del Darién

Se ajusta la delimitación de IDEAM (2010) siguiendo límites estratigráficos, aumenta su extensión al este delimitada por unidades vulcano-sedimentarias y plutónicas félsicas. Al norte y oeste se limita por la división política con Panamá, al este y sur está limitada por la línea de costa y límites estratigráficos (Figura 3-23).

Provincia compuesta principalmente por rocas vulcano-sedimentarias y plutónicas félsicas, en IDEAM (2010) considerada basamento. En los dos (2) puntos evaluados las series de tiempo (de GWS-GLDAS) tienen tendencia y valores similares, mostrando en general un valor un pico mínimo y un máximo por año, con mayor amplitud en el punto (b) en rocas vulcano-sedimentarias (Figura 3-24, Figura 3-27). La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da en los dos (2) puntos para dos (2) meses de rezago (Figura 3-25).

El ciclo anual de P-CHIRPS (Figura 3-26) exhibe una tendencia unimodal con valores más altos de abril a diciembre. El ciclo anual de GWS-GLDAS (Figura 3-26) tiene el mismo comportamiento en los dos (2) puntos y muestra tendencia unimodal, con valores mínimos en abril y máximos en noviembre y diciembre.

Figura 3-23. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Serranía del Darién - PC4*.

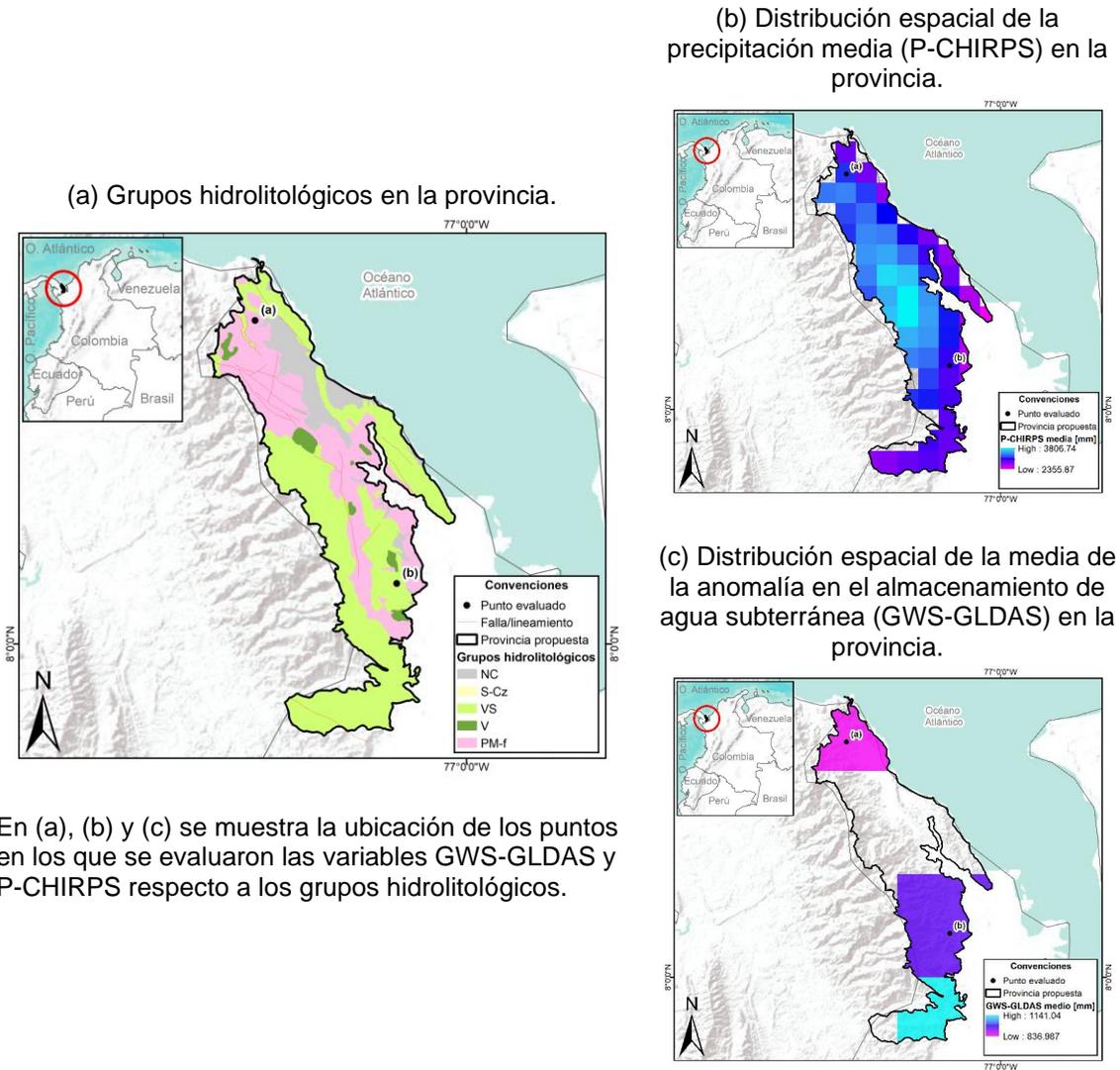


Figura 3-24. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

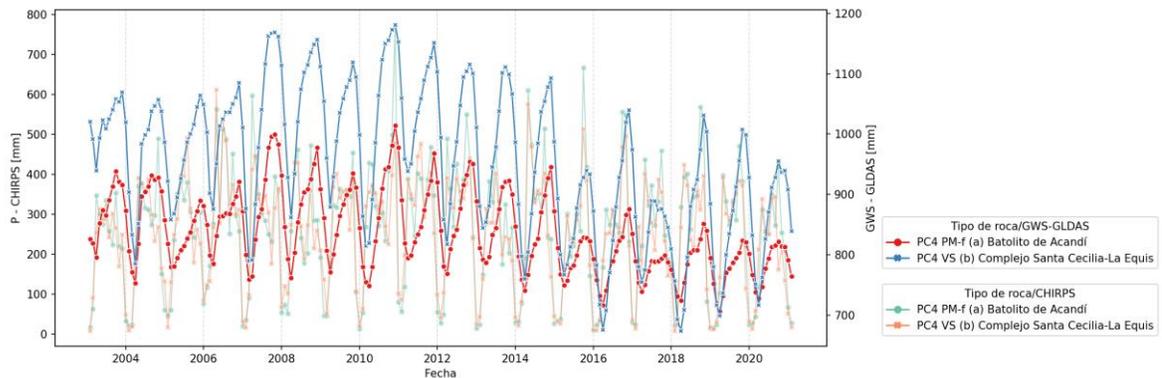


Figura 3-25. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

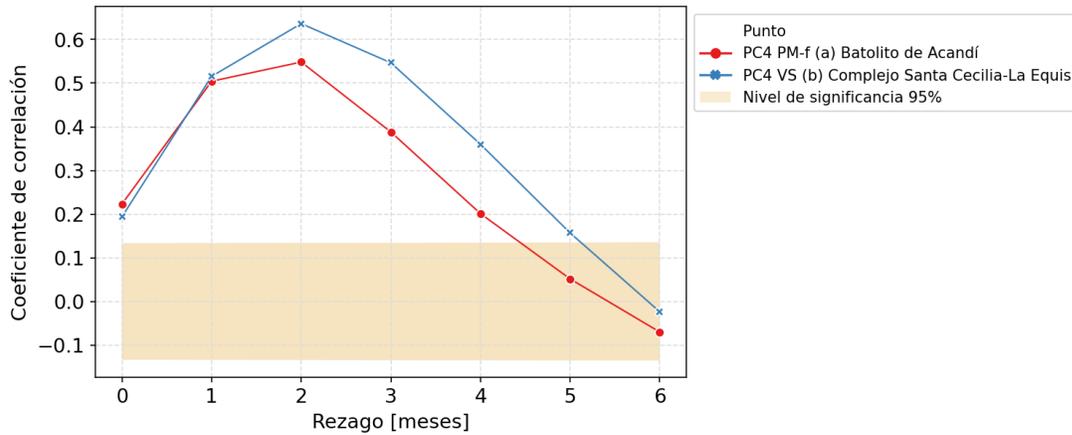


Figura 3-26. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

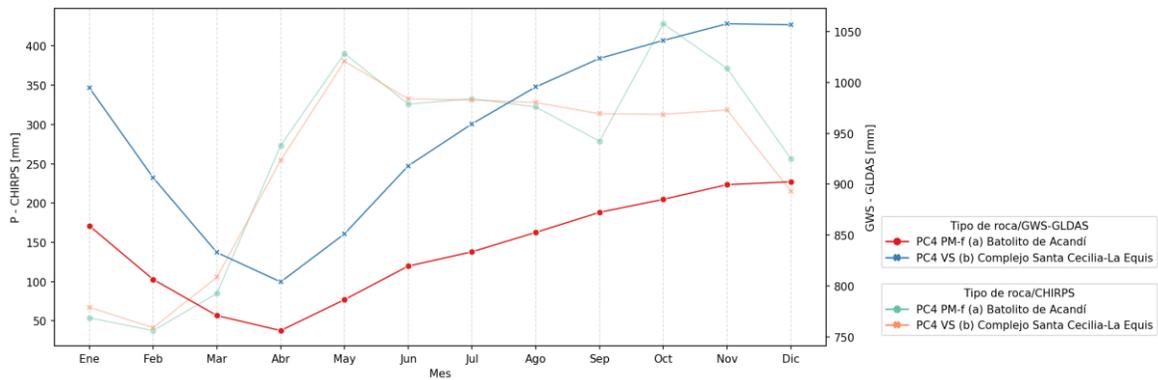
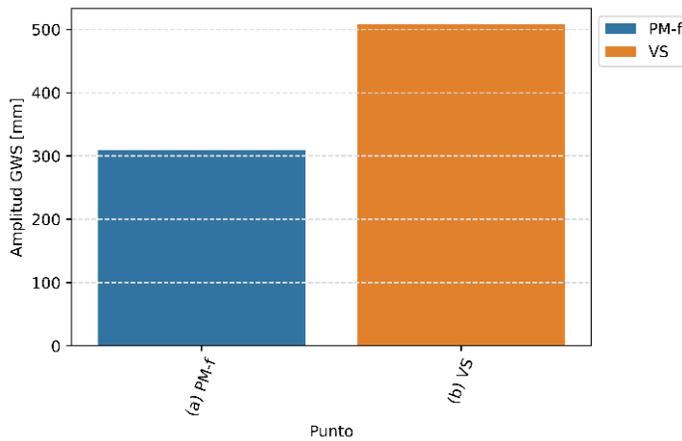


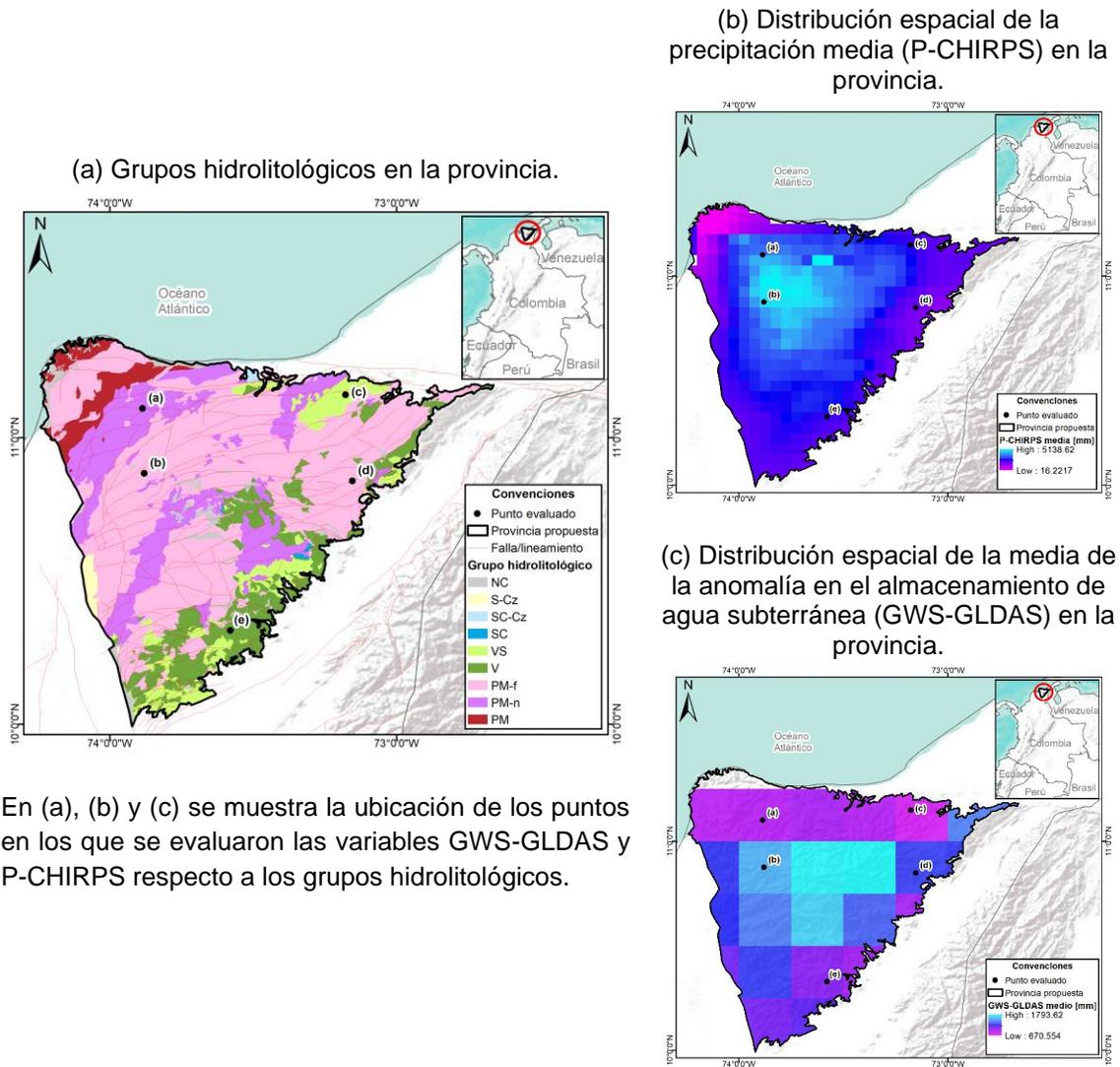
Figura 3-27. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.5 PC5* Sierra Nevada de Santa Marta

Esta provincia reúne principalmente rocas ígneas plutónicas y metamórficas, en IDEAM (2010) nombrada como basamento. Los límites norte y este fueron ajustados con límites estratigráficos del AGC versión 2020 y en el oeste se conserva el límite fallado como se describe en IDEAM (2010), pero ajustado a las fallas del AGC (Figura 3-28).

Figura 3-28. Delimitación de la provincia hidrogeológica costera Sierra Nevada de Santa Marta - PC5*.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-29) se observa un comportamiento similar en los cinco (5) puntos, los valores más altos y con menor amplitud se dan en el punto (b) en rocas plutónicas félsicas. Sobresale el punto (e) con mayor amplitud y picos máximos sobresaliente finalizando 2011 y 2012, por la gruesa resolución de los datos

nativos de GRACE, este punto puede estar influenciado por los sedimentos de la provincia Costera – Atlántico en la zona Cesar Ranchería.

La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da para un (1) mes de rezago, a excepción del punto (e) con correlación más alta a los dos (2) meses (Figura 3-30). En el ciclo anual de GWS-GLDAS los puntos siguen una tendencia similar con disminución en el periodo de febrero a mayo (Figura 3-31). El ciclo anual de P-CHIRPS (Figura 3-31) es bimodal y se observa que la disminución de lluvia en mitad de año no se refleja en el ciclo de anual de GWS-GLDAS.

En la Figura 3-32 se presenta un diagrama de barras que relacionada la amplitud de las series de tiempo de GWS-GLDAS con el tipo de roca asociado a cada punto, se observan mayores valores en los puntos (e) (roca volcánica) y (a) (roca neísica).

Gráficamente, se puede ver que los valores más altos de GWS-GLDAS hacia el centro de la provincia coinciden con mayores valores de precipitación P-CHIRPS y mayor densidad de lineamientos.

Figura 3-29. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

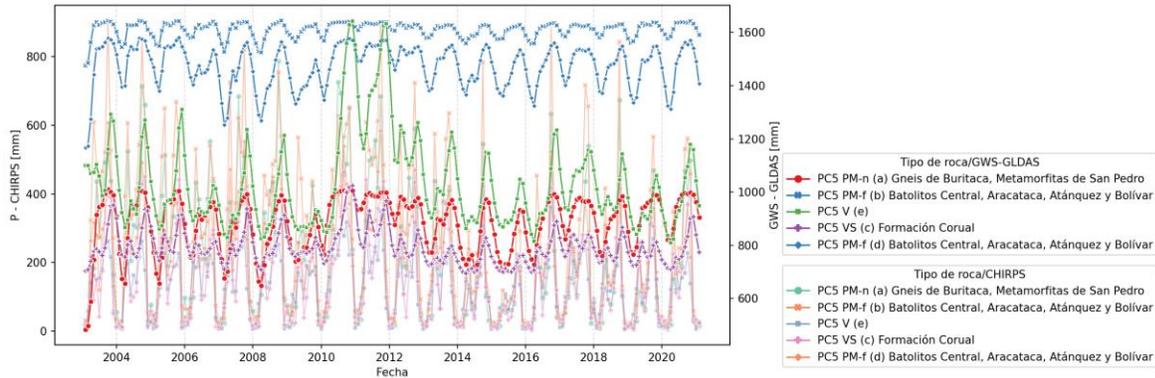


Figura 3-30. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

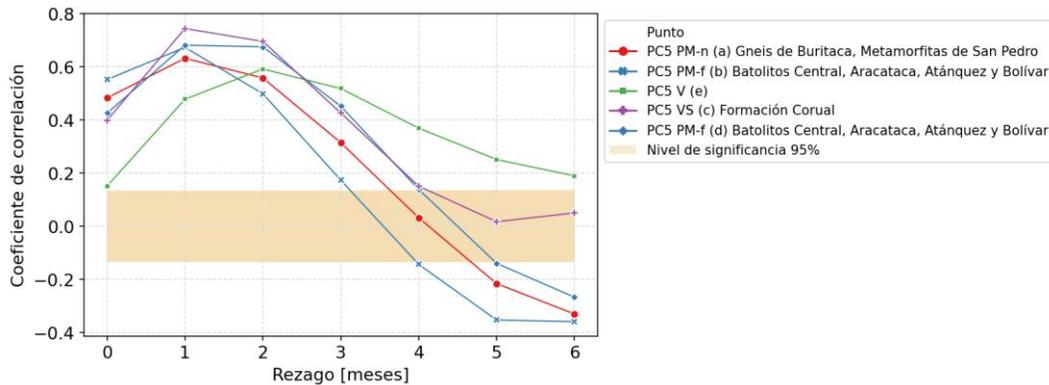


Figura 3-31. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

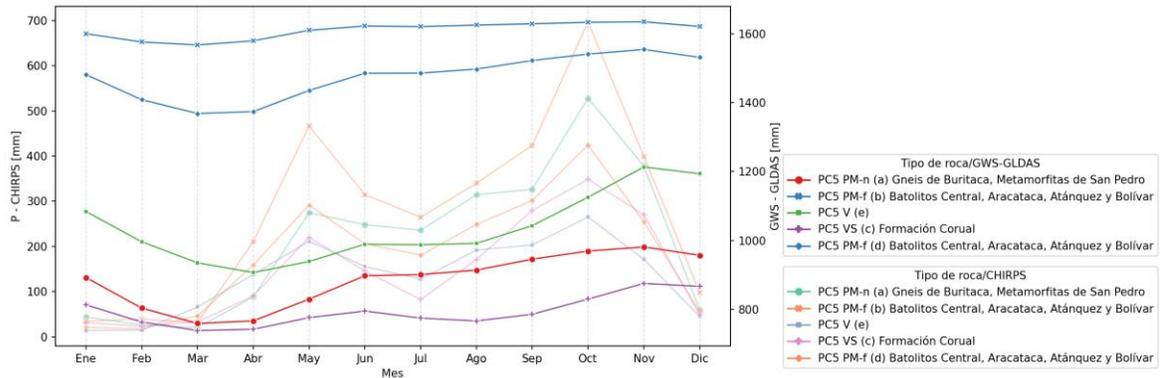
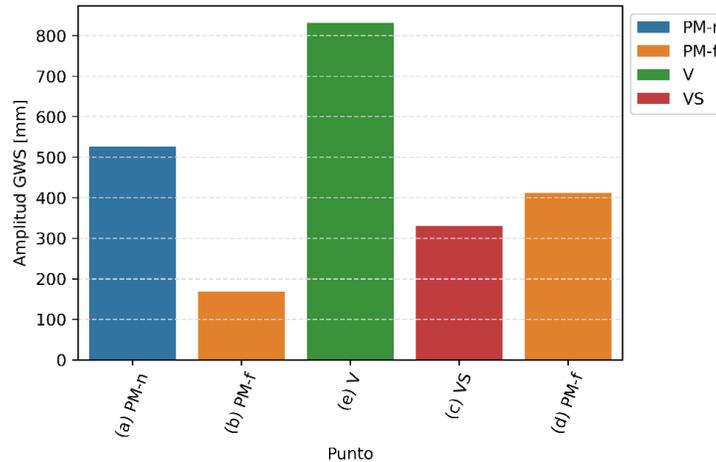


Figura 3-32. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.

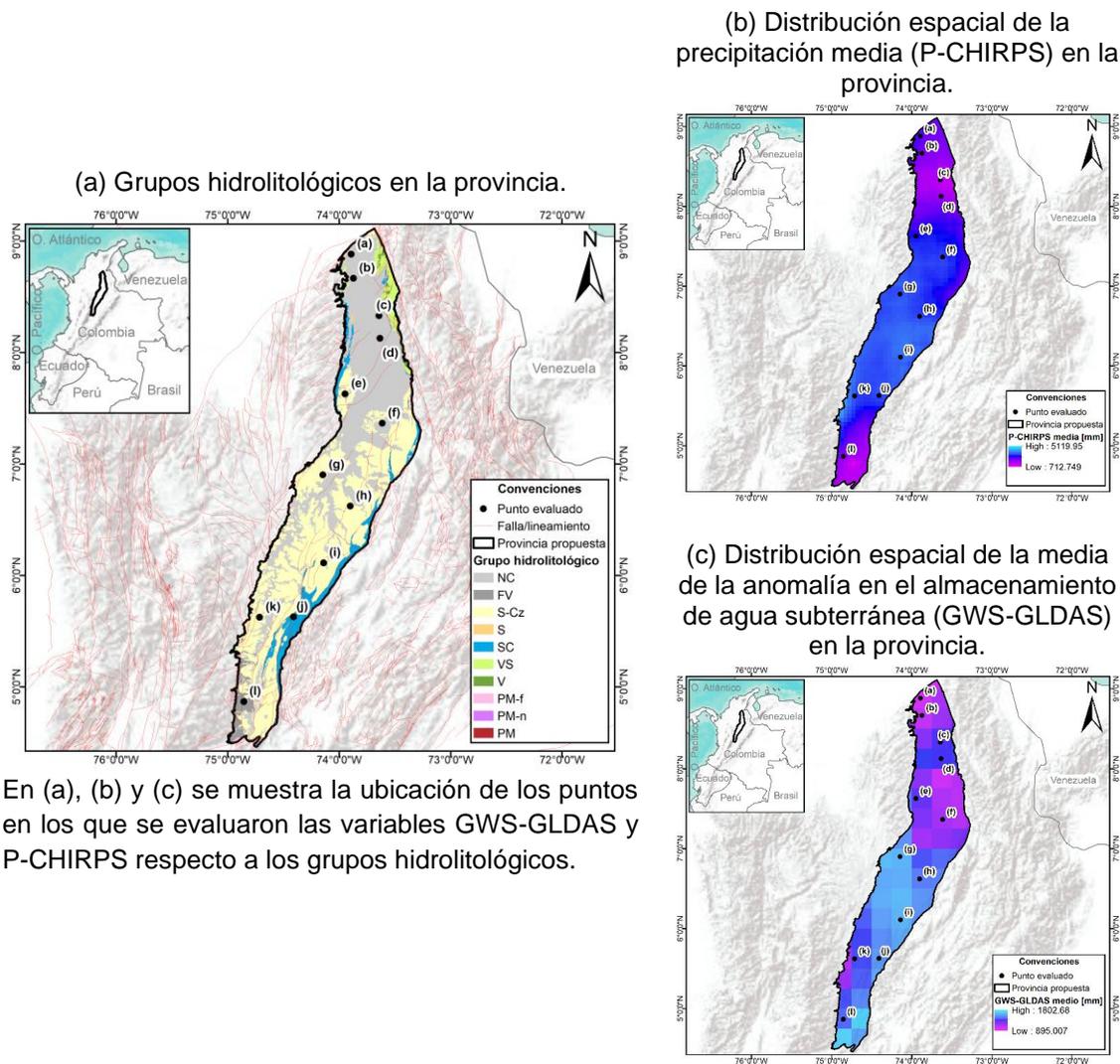


3.1.6 PM1 Valle Medio del Magdalena

Provincia compuestamente principalmente por depósitos no consolidados y sedimentos cenozoicos. Se ajustaron los límites descritos en IDEAM (2010) con las unidades y fallas del AGC v2020. Al norte, oriente y sur los límites son principalmente fallados, en el oeste y noroeste los límites son estratigráficos con rocas cristalinas y vulcano-sedimentarias de la cordillera Central (Figura 3-33).

En este caso, el límite fallado al norte prevalece, este límite divide los sistemas acuíferos de La Mojana y Cesar incumpliendo el principio de herencia, porque no se observa una relación clara entre límite estratigráfico en las unidades cronoestratigráficas del AGC v2020 y los sistemas acuíferos. En un trabajo futuro, es necesario revisar con geología más detallada y otros estudios para ajustar este límite.

Figura 3-33. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Valle Medio del Magdalena - PM1.



En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-34 y Figura 3-35), se observa que la mayoría de los puntos tienen un comportamiento temporal similar, excepto los puntos (g), (i) y (j) en los que los cambios no son tan pronunciados. Los puntos (a) y (b) al norte presentan valores bajos y máximas amplitudes, en depósitos no consolidados; mientras que los puntos (i) y (j) presentan valores altos y las mínimas amplitudes.

En general, los valores más bajos, las amplitudes más altas y una mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS para los dos (2) meses de rezago se da en los puntos (a) a (f) en el norte de la provincia donde predominan depósitos no consolidados. Por otro lado, en los puntos (g) a (l), en el centro y sur de la provincia, predominan los valores de GWS-GLDAS, las amplitudes son menores y la correlación más

alta entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS es con un (1) mes de rezago, a excepción del punto (l) que es a los dos (2) meses (en flujos volcánicos) (Figura 3-36).

En el ciclo anual de GWS-GLDAS (Figura 3-37, Figura 3-38) se observa, en general, un comportamiento similar, la mayoría de los puntos tienen valores más bajos en febrero, marzo y abril y mayores en noviembre y diciembre. El ciclo anual de P-CHIRPS muestra una tendencia bimodal (Figura 3-37, Figura 3-38).

Gráficamente, se puede ver que los valores más altos de GWS-GLDAS coinciden con mayores valores de precipitación P-CHIRPS en el centro del polígono. En la Figura 3-39 se observa que en general, las mayores amplitudes en la serie de tiempo de GWS-GLDAS se dan en los puntos asociados a depósitos no consolidados.

A partir de los valores de GWS-GLDAS en los puntos evaluados, podría pensarse en dividir la provincia en regiones norte y sur, pero no coincide con los tres (3) sistemas acuíferos actualmente delimitados en esta provincia.

Figura 3-34. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

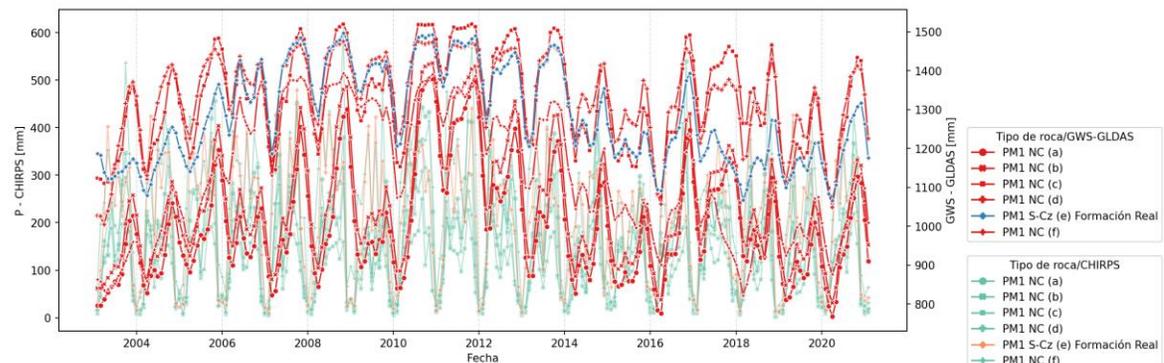


Figura 3-35. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas con transparencia y escala de colores de azul a verde representan la variable P-CHIRPS.

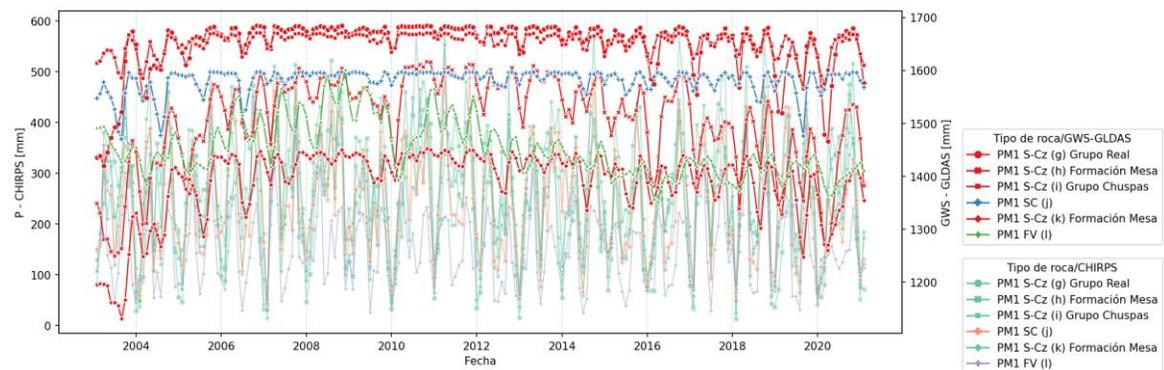


Figura 3-36. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

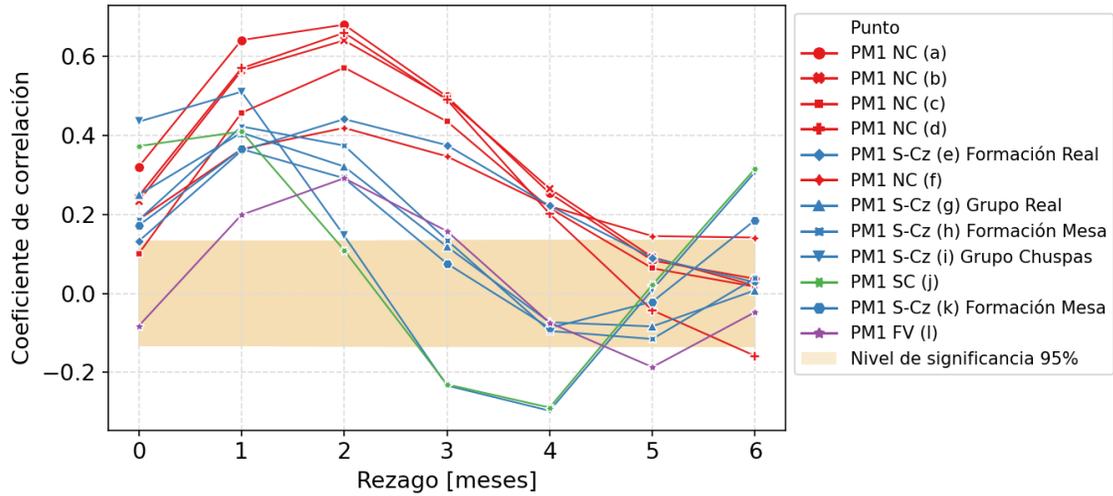


Figura 3-37. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

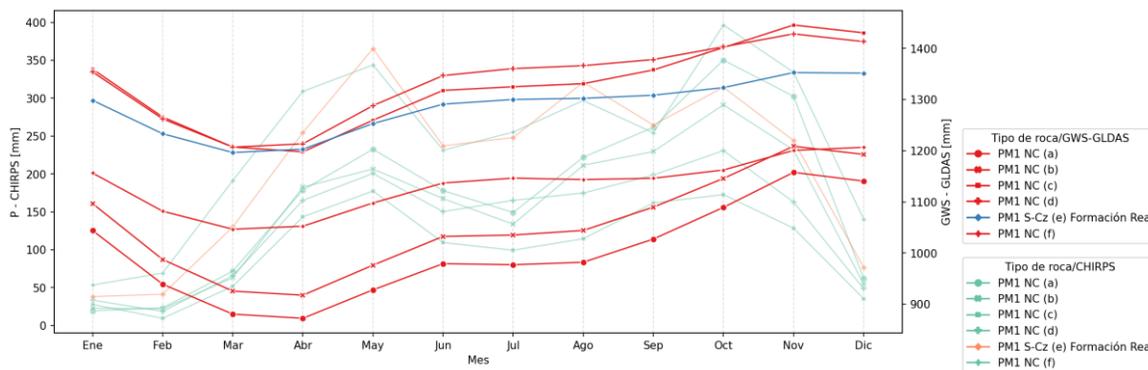


Figura 3-38. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

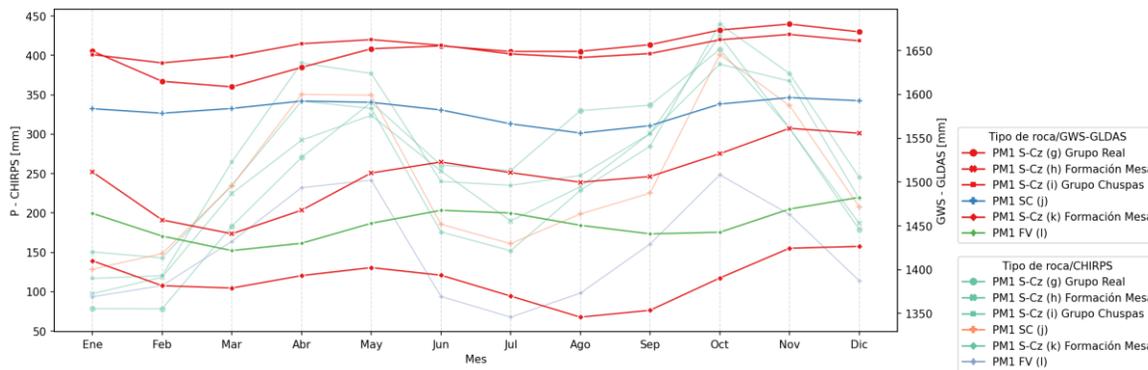
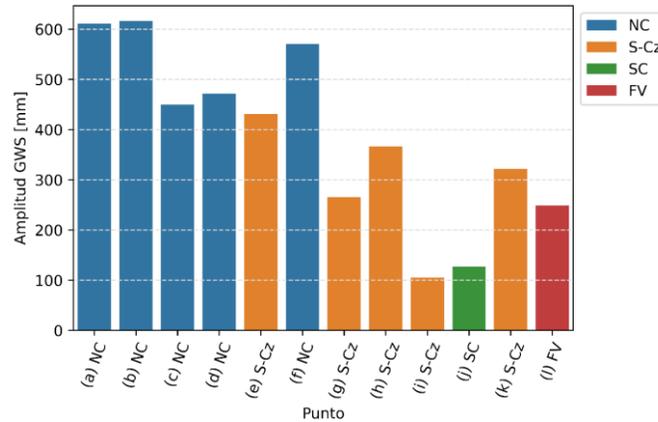


Figura 3-39. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.7 PM2 Valle Alto del Magdalena

Se ajustaron los límites descritos en IDEAM (2010) con las unidades y fallas del AGC v2020. Los límites corresponden principalmente a fallas y en menor medida a cambios estratigráficos. Provincia compuesta principalmente por rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias (Figura 3-40).

En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-41, Figura 3-42) los puntos siguen una tendencia similar, (i) y (j) presentan menores variaciones (baja amplitud) en UC vulcano-sedimentarias. Los valores más altos se dan en los puntos (a) y (b) al norte en rocas sedimentarias que incluyen rocas calcáreas y flujos volcánicos, presentan también amplitudes altas.

La mayor correlación rezagada entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS es para dos (2) meses en la mayoría de los puntos y para un (1) mes en los puntos (d), (i) y (j). Casi todos los puntos tienen valores bajos indicando correlación débil (Figura 3-43).

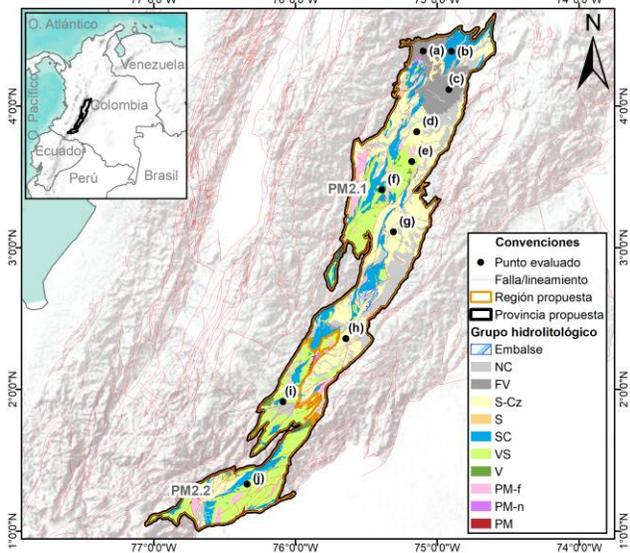
El ciclo anual de P-CHIRPS muestra una marcada tendencia bimodal (Figura 3-44 y Figura 3-45). En el ciclo anual de GWS-GLDAS se observa, en general, un comportamiento similar, con una tendencia estacional que se aproxima a bimodal con valores altos de mayo a junio y diciembre-enero.

En la Figura 3-46 se observa que la amplitud en la serie de tiempo de GWS-GLDAS, en general, disminuye de norte a sur. Los valores más altos se asocian a flujos volcánicos y los más bajos a rocas vulcano-sedimentarias.

Regiones propuestas (Figura 3-40): se proponen dos (2) regiones separando las rocas vulcano-sedimentarias que tienen bajos valores de GWS-GLDAS al sur (puntos i, j).

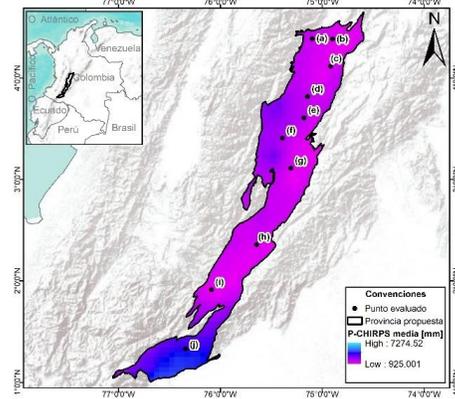
Figura 3-40. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Vallo Alto del Magdalena - PM2.

(a) Grupos hidrolitológicos y delimitación de regiones hidrogeológicas propuestas en la provincia.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

(b) Distribución espacial de la precipitación media (P-CHIRPS) en la provincia.



(c) Distribución espacial de la media de la anomalía en el almacenamiento de agua subterránea (GWS-GLDAS) en la provincia.

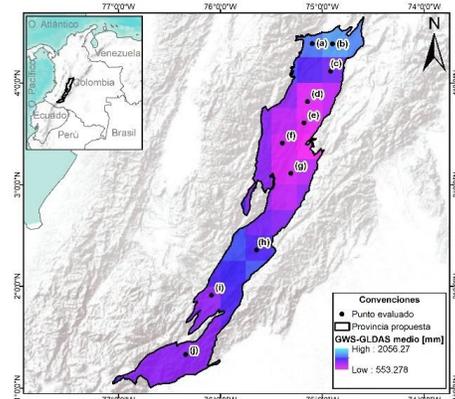


Figura 3-41. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

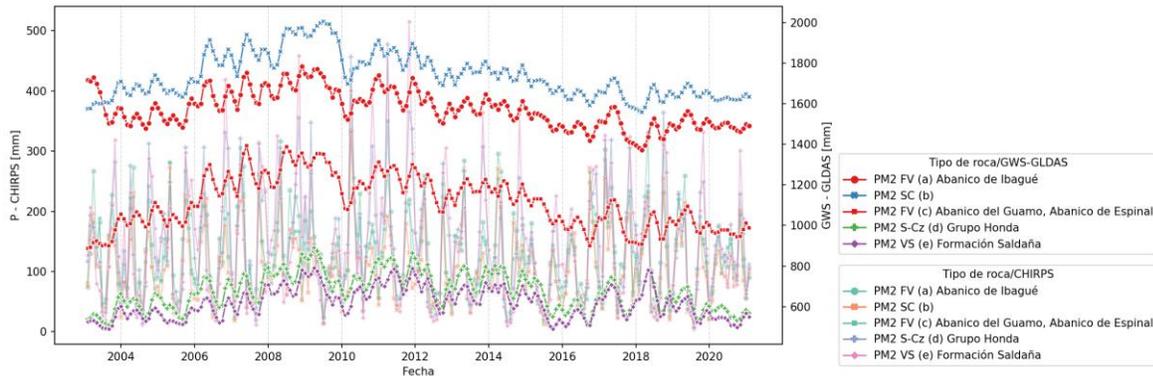


Figura 3-42. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

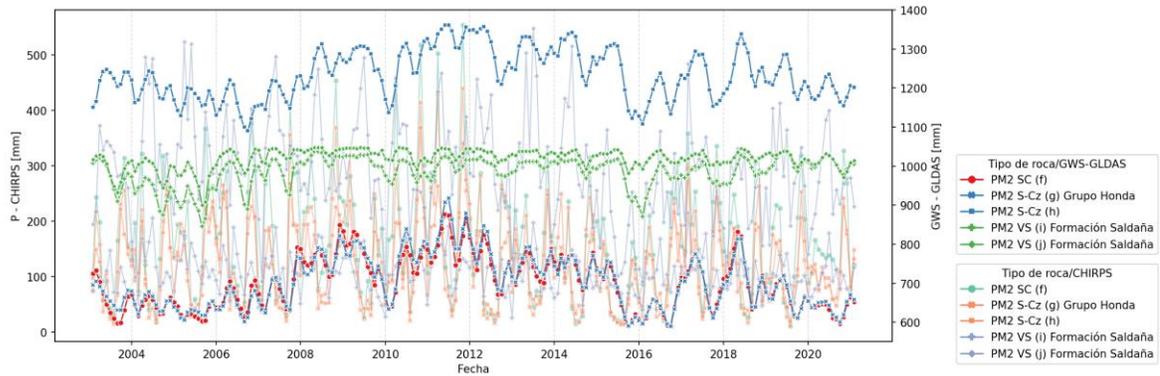


Figura 3-43. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

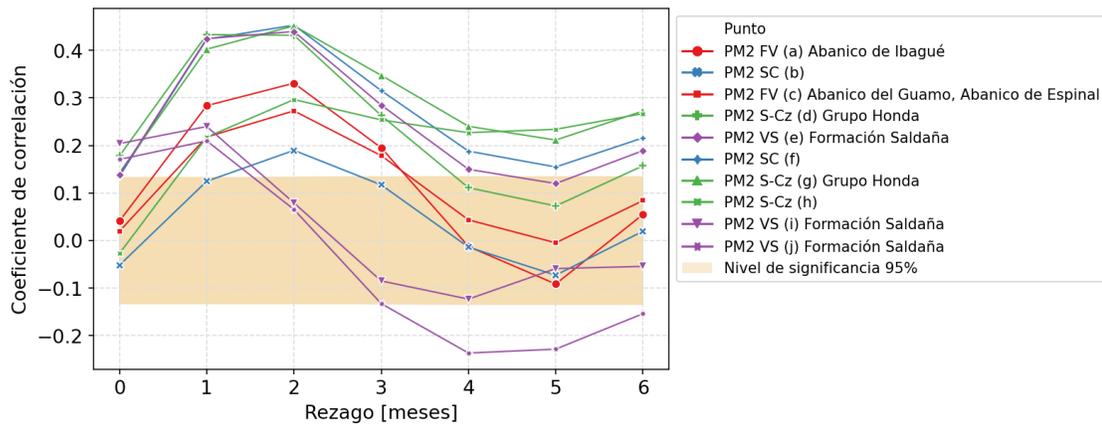


Figura 3-44. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

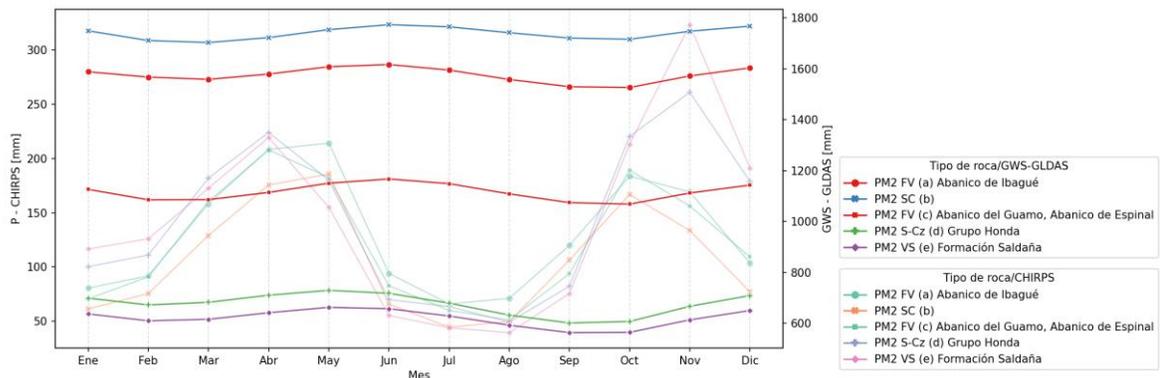


Figura 3-45. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

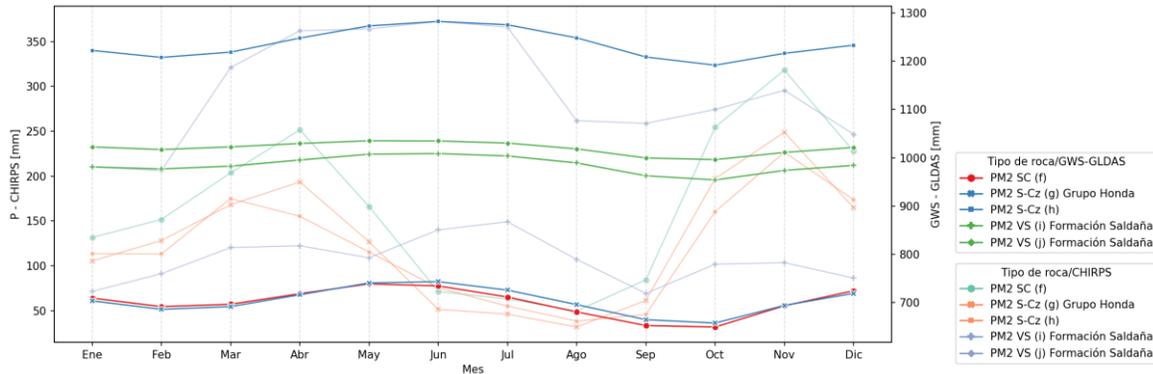
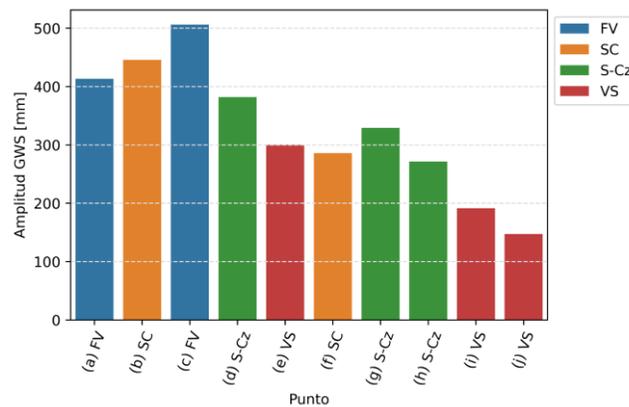


Figura 3-46. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.8 PM3 Cauca - Patía

Se ajustaron los límites descritos en IDEAM (2010) con las unidades y fallas del AGC v2020. Los límites corresponden principalmente a fallas y a cambios estratigráficos en el noroccidente y norte (Figura 3-47).

Provincia compuesta principalmente por depósitos no consolidados, flujos volcánicos, rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias. En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-48, Figura 3-49) se observa que los puntos (a), (g) y (f) tienen una tendencia similar con valores máximos casi constantes entre 2006 y 2010. Los puntos (d) y (e) son los que tienen menores amplitudes y los valores de GWS más altos. El comportamiento de los puntos (b) y (c) se asemeja con una sobresaliente disminución en el año 2018 (el punto (b) se ubica en el sistema acuífero del Valle del Cauca y el (c), al sur de este).

Entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS los coeficientes de correlación son muy bajos o no son estadísticamente significativos, excepto para el punto (e) donde la mayor correlación se da para un (1) mes de rezago (Figura 3-50).

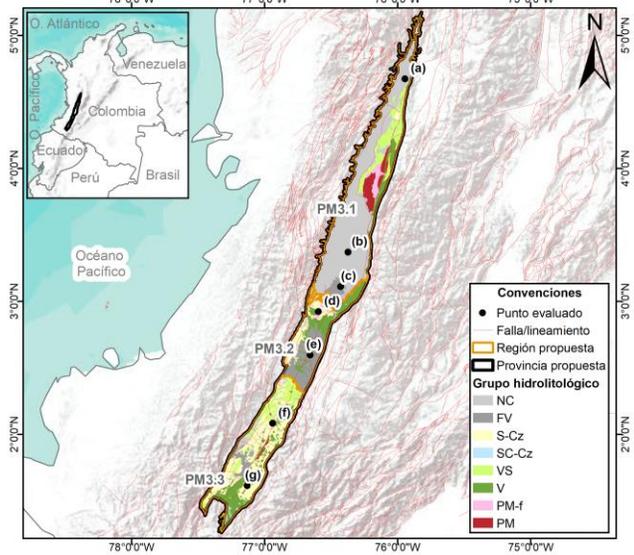
En el ciclo anual de GWS-GLDAS (Figura 3-51 y Figura 3-52) sobresalen los mínimos, en los puntos (a), (e), (f) y (g) coinciden en septiembre, mientras que en los puntos (b) y (c) el valor mínimo se da en abril. El punto (e) tiene poca variación estacional, disminuye levemente en marzo y septiembre.

De la figura Figura 3-53 que muestra las amplitudes de los puntos en la serie de tiempo de GWS-GLDAS sobresalen los puntos (d) y (e) ubicados hacia el centro de la provincia.

Regiones propuestas (Figura 3-47): se divide en tres (3) regiones por el tipo de roca que predomina y que reflejan las diferencias entre los puntos, (f) y (g) al sur; (d) y (e) en el centro; y (a), (b) y (c) al norte.

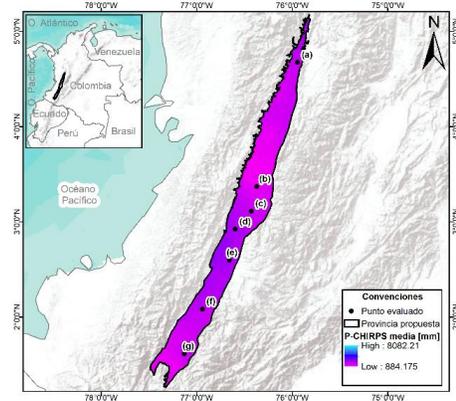
Figura 3-47. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Cauca – Patía - PM3.

(a) Grupos hidrolitológicos y delimitación de regiones hidrogeológicas propuestas en la provincia.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

(b) Distribución espacial de la precipitación media (P-CHIRPS) en la provincia.



(c) Distribución espacial de la media de la anomalía en el almacenamiento de agua subterránea (GWS-GLDAS) en la provincia.

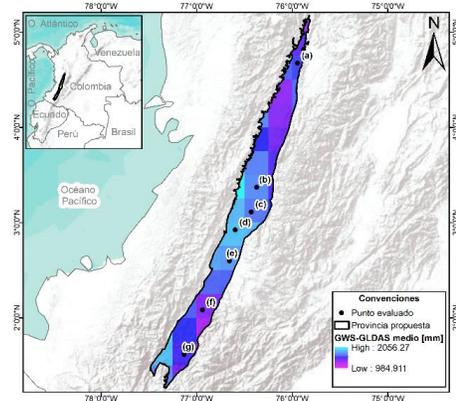


Figura 3-48. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

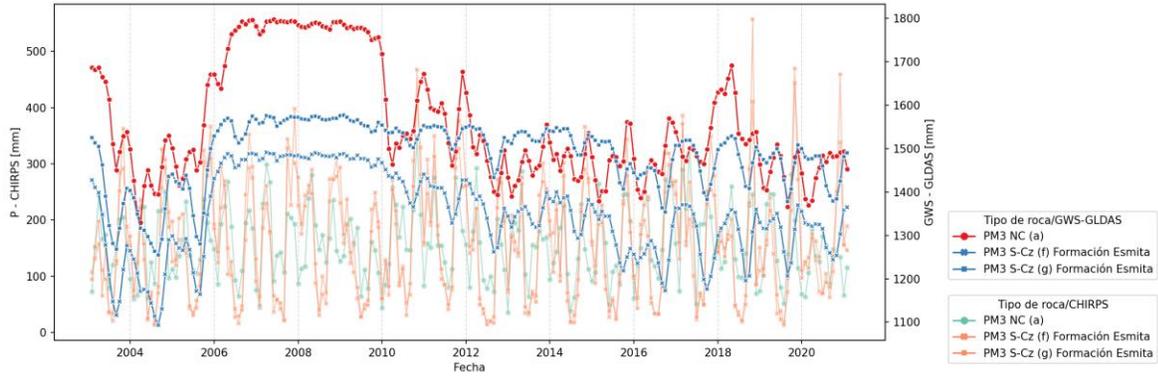


Figura 3-49. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

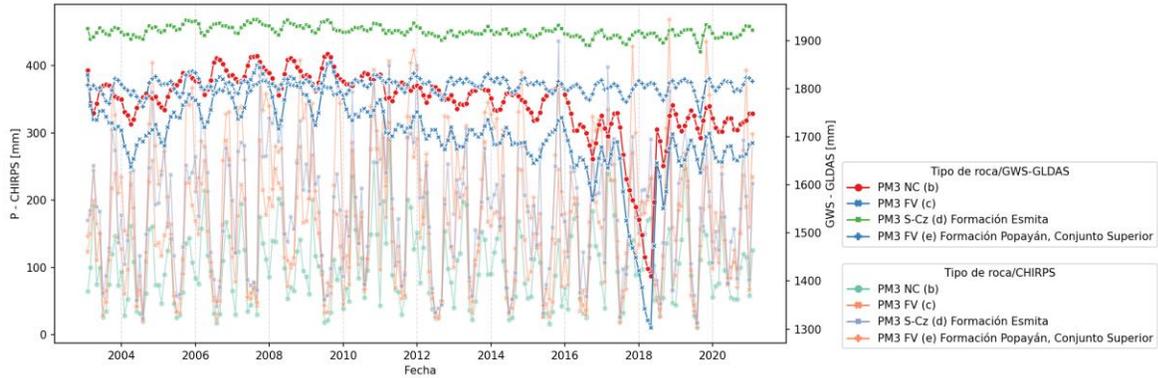


Figura 3-50. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

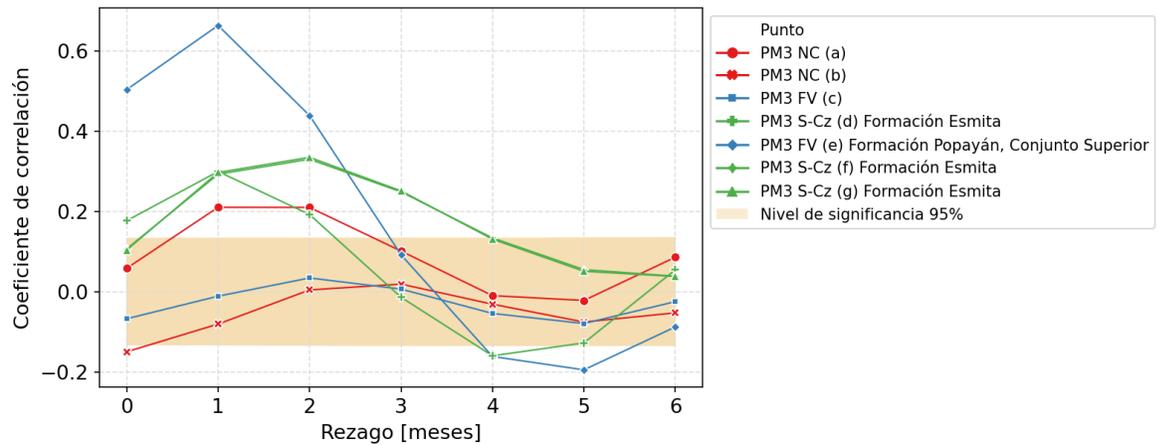


Figura 3-51. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

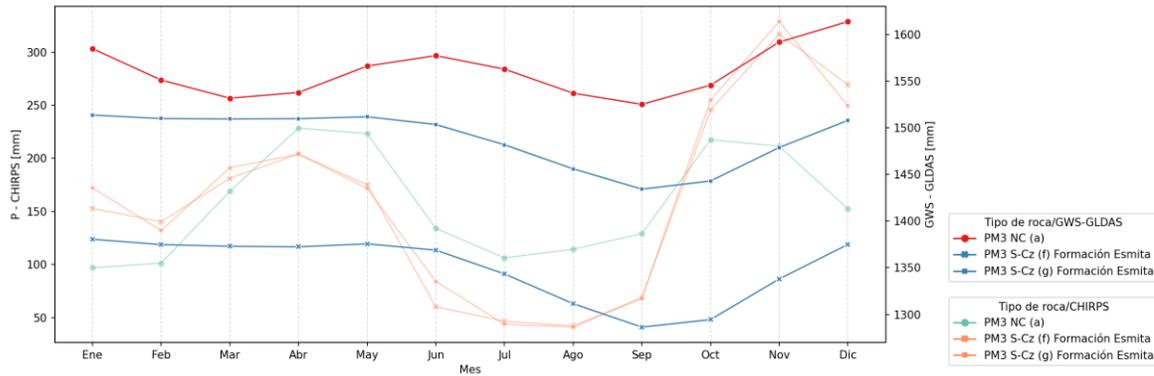


Figura 3-52. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

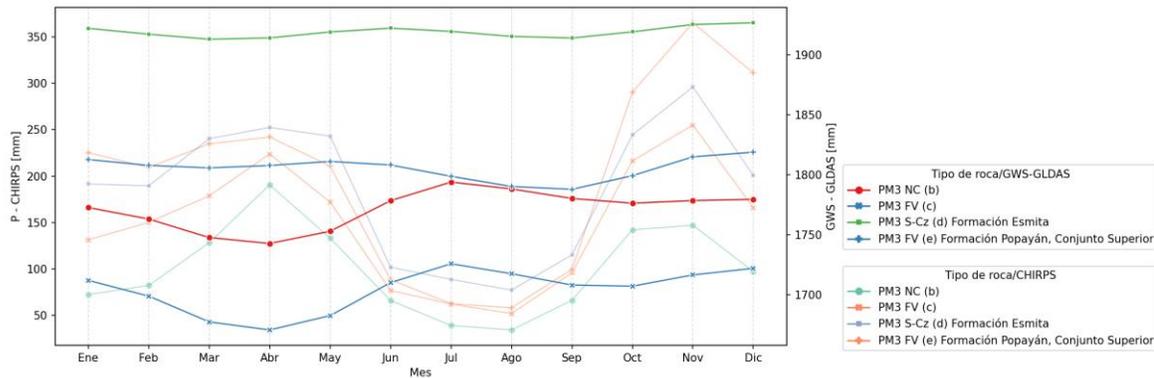
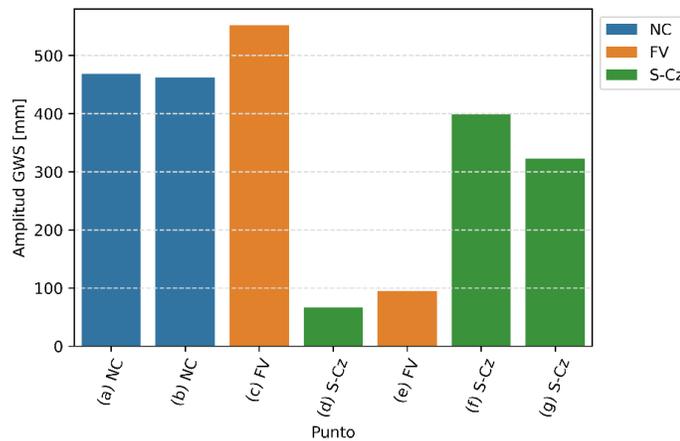


Figura 3-53. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.

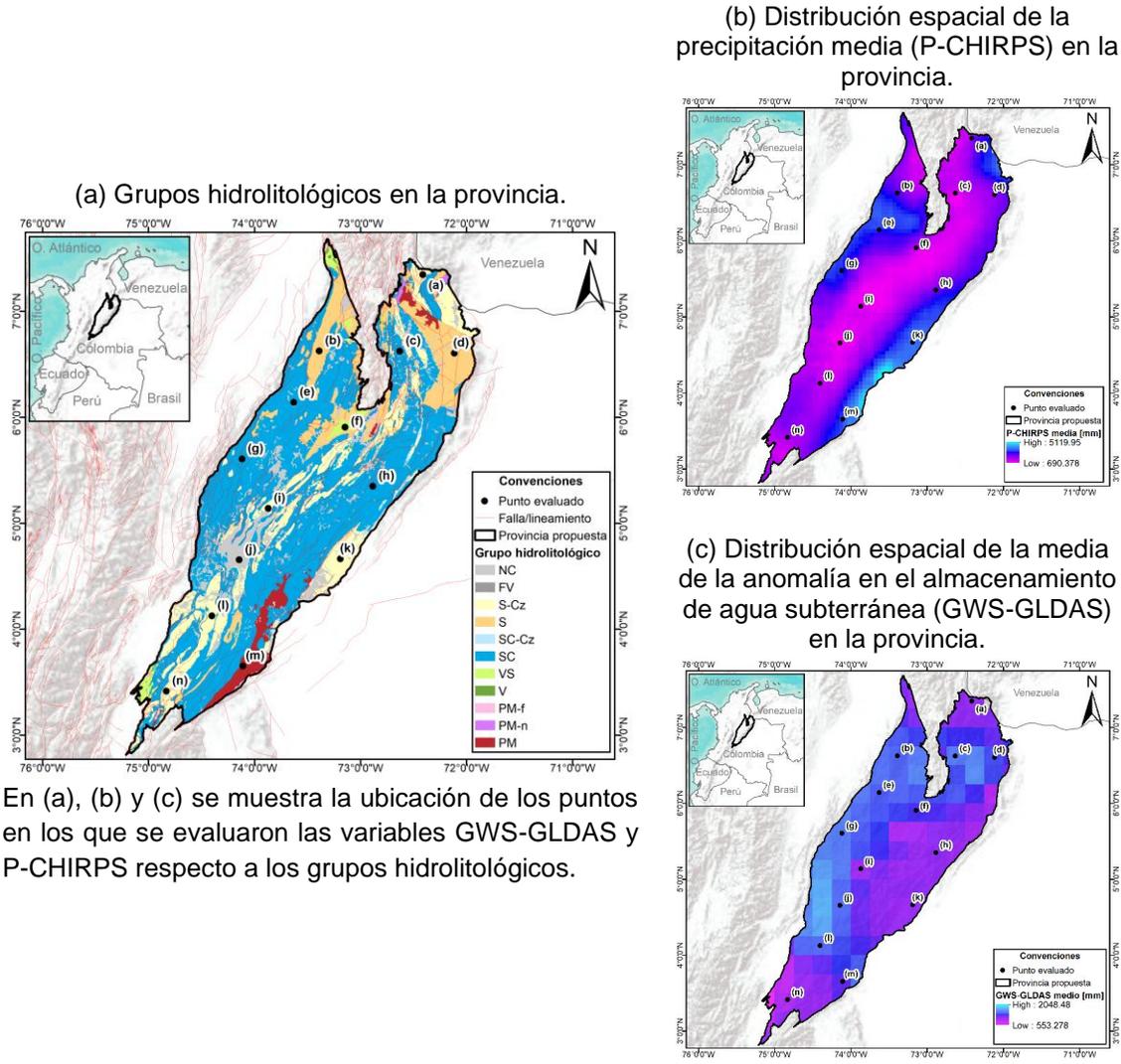


3.1.9 PM4 Cordillera Oriental

Se ajustaron los límites descritos en IDEAM (2010) con las unidades y fallas del AGC v2020. Los límites corresponden principalmente a fallas y a cambios estratigráficos al sur

y norte. En esta provincia predominan las rocas sedimentarias que incluyen rocas calcáreas (Figura 3-54).

Figura 3-54. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Cordillera Oriental - PM4.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-55 y Figura 3-56) se observa un comportamiento similar en todos los puntos con diferencias en la magnitud. Los valores más altos se dan en el punto (g) y los más bajos en (k) y (n). Sobresalen los máximos del punto (i) en el 2011.

Figura 3-55. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

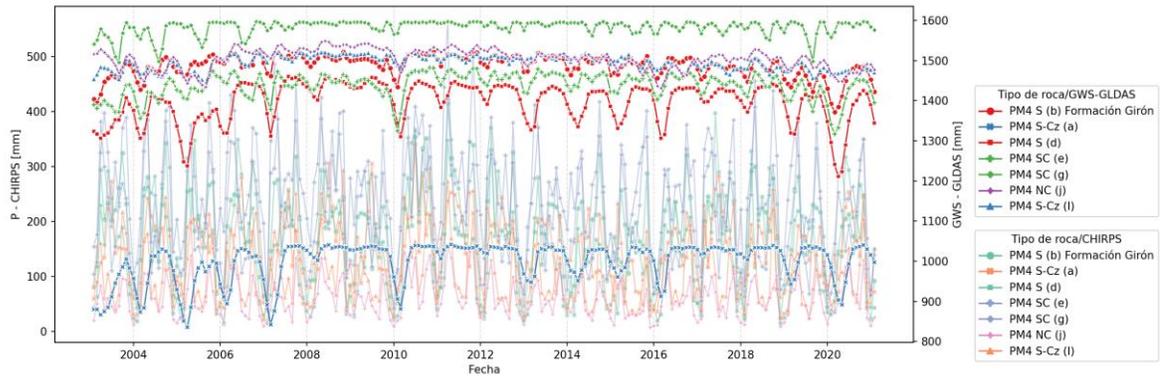
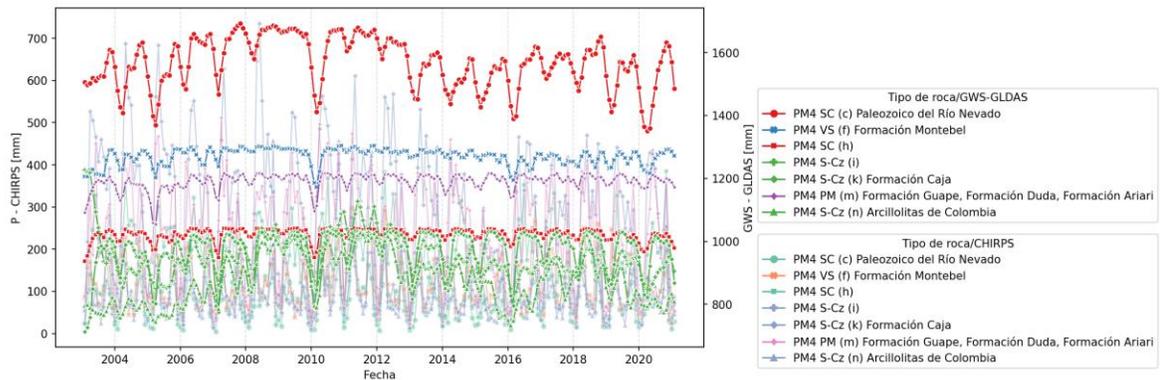


Figura 3-56. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.



La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da para un (1) mes de rezago en nueve (9) puntos y para el resto, se da para dos (2) meses de rezago (Figura 3-57). En el ciclo anual de GWS-GLDAS (Figura 3-58, Figura 3-59) sobresalen los mínimos, en febrero y marzo. Los puntos (i) y (n) muestra además valores más bajos también en octubre.

En la Figura 3-60 se presenta un diagrama de barras con las amplitudes en la serie de tiempo de GWS-GLDAS para los puntos evaluados, donde los valores más altos se dan en los puntos asociados a rocas sedimentarias.

Figura 3-57. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

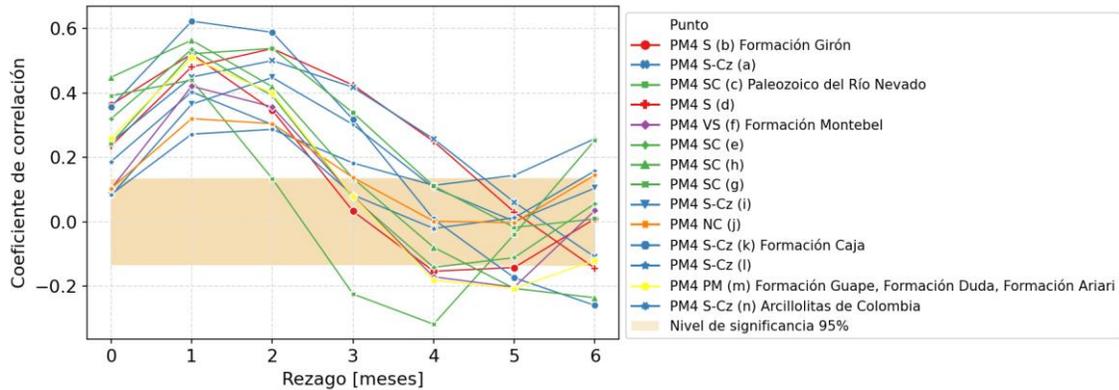


Figura 3-58. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

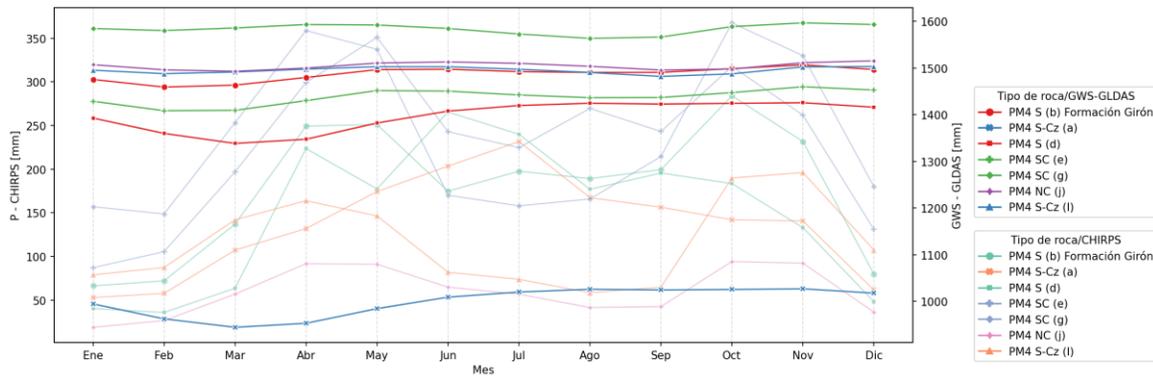


Figura 3-59. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

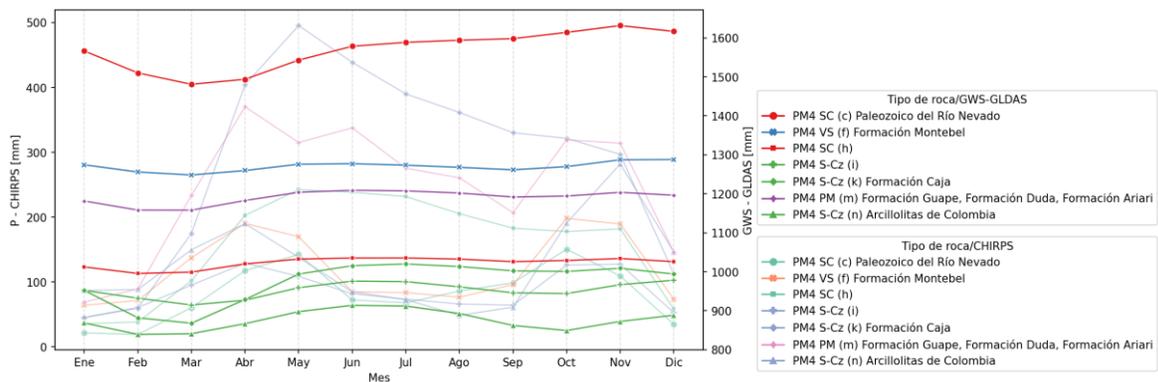
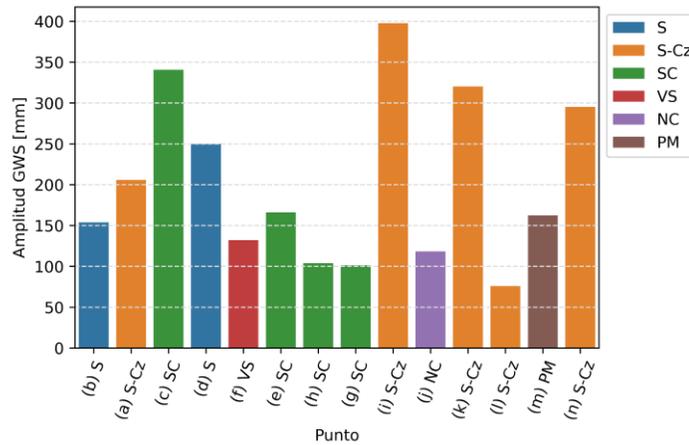


Figura 3-60. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.10 PM5 Catatumbo

Se ajusta la delimitación de IDEAM (2010) siguiendo límites estratigráficos y fallas del AGC v2020, aumenta su extensión al sur donde se delimitó por la divisoria de aguas de la zona hidrográfica Catatumbo (Caribe). En esta provincia predominan las unidades sedimentarias de edad reciente (Figura 3-61).

En los cuatro (4) puntos evaluados las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-62) tienen tendencia similar, los valores más altos y la mayor amplitud se presentan en los puntos (a) y (b) en depósitos (no consolidados) y sedimentos cenozoicos (Figura 3-65). Los valores más bajos se dan en los puntos (d) y (c) en rocas sedimentarias que incluyen rocas calcáreas.

La correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS es débil, para dos (2) meses de rezago y un (1) mes en el punto (d) que tiene los menores valores y la más baja amplitud (Figura 3-63). El ciclo anual de GWS-GLDAS tiene el mismo comportamiento en los cuatro (4) puntos y muestra tendencia bimodal con cambios no muy pronunciados, con valores más altos en mayo/junio y diciembre (Figura 3-64).

Figura 3-61. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Catatumbo - PM5.

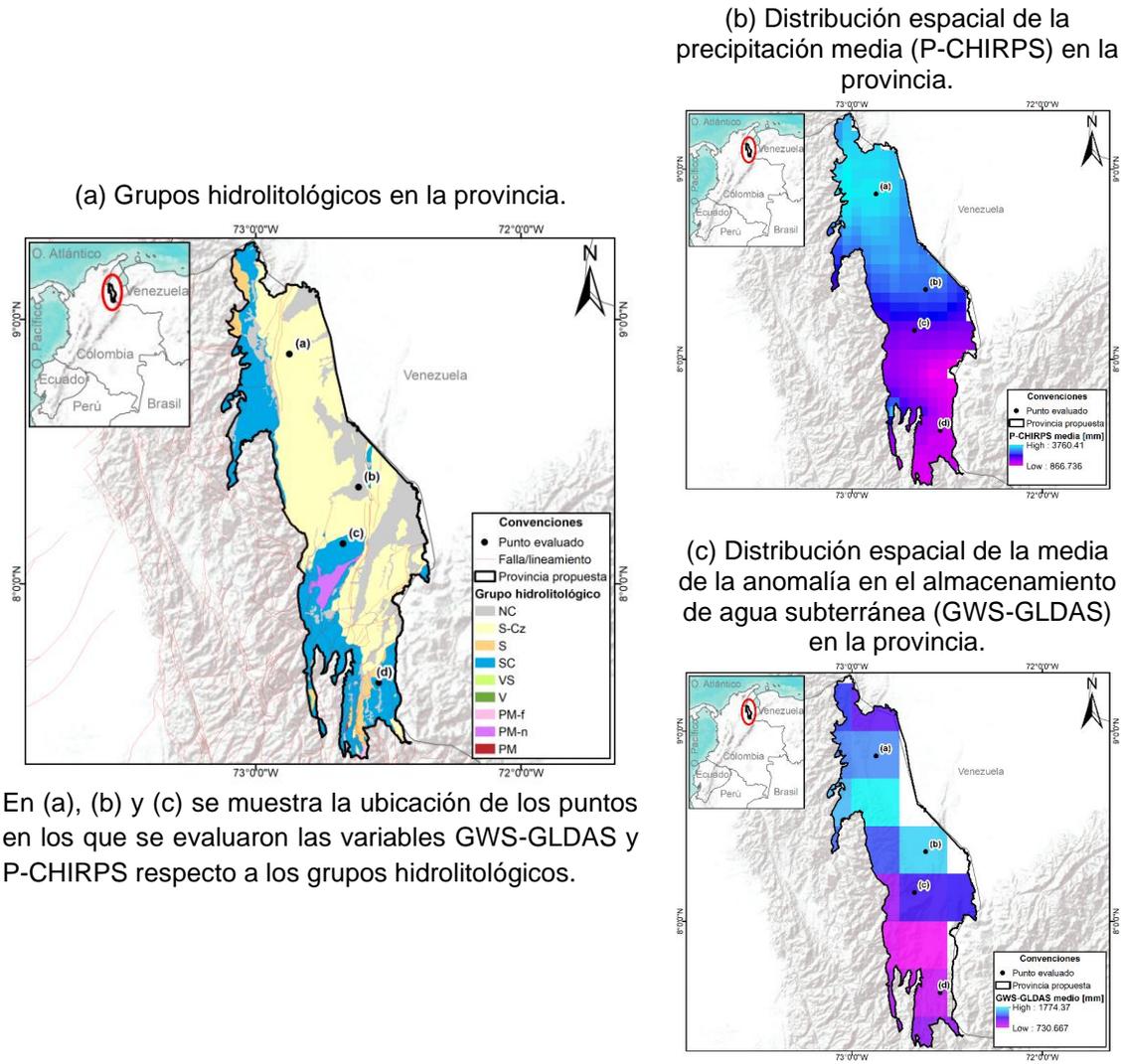


Figura 3-62. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

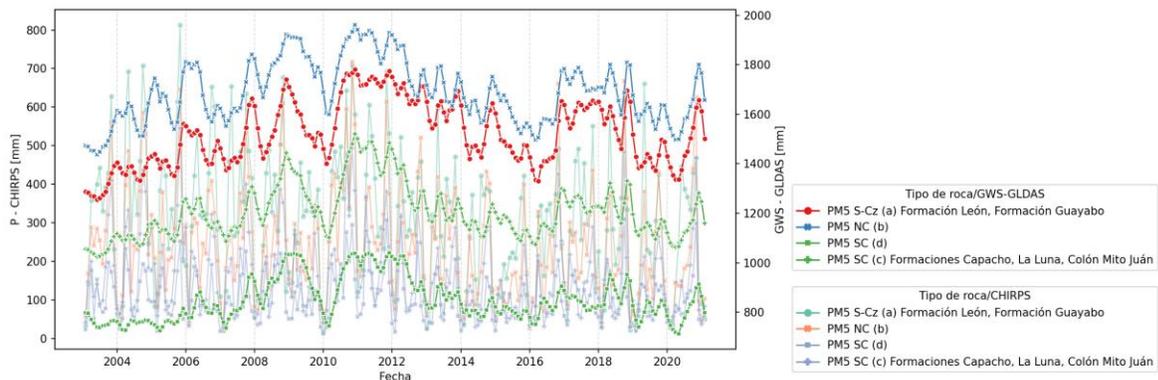


Figura 3-63. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

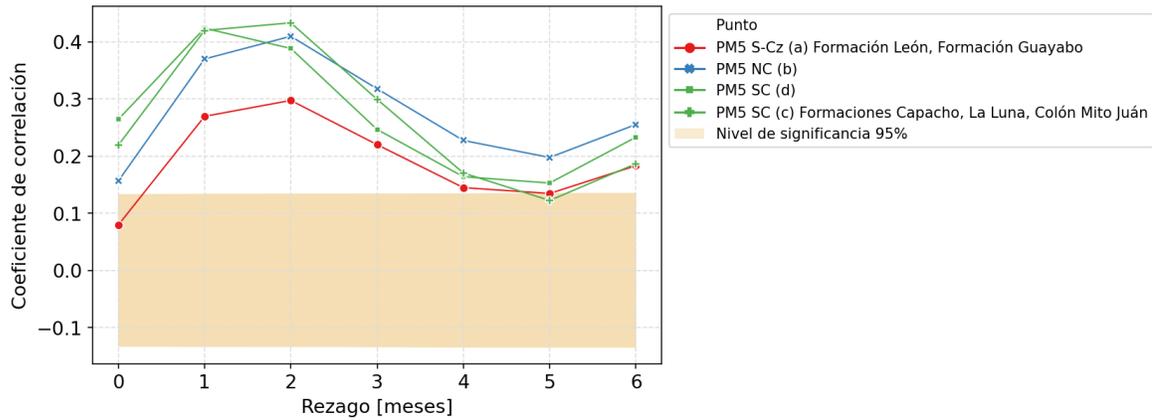


Figura 3-64. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

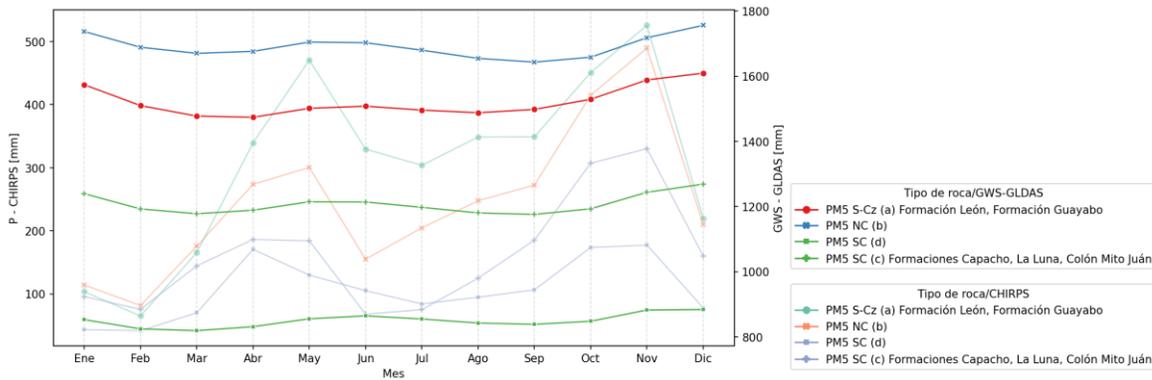
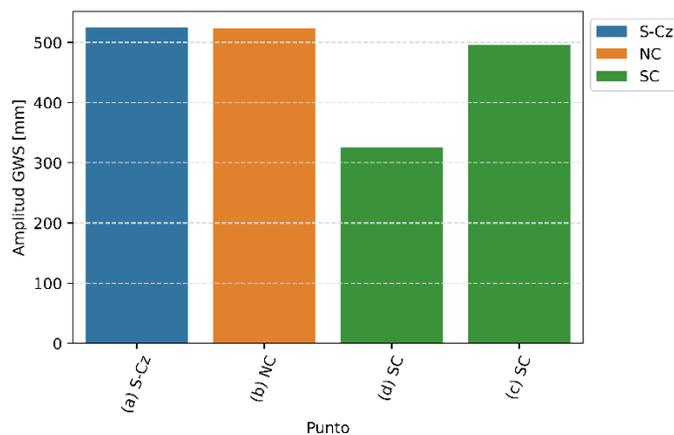


Figura 3-65. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.11 PM6 Cordilleras Central y Occidental

Compuesta principalmente por rocas cristalinas que predominan en la cordillera Central y volcánicas, vulcano-sedimentarias que prevalecen en la cordillera Occidental, en IDEAM (2010) considera basamento. Se ajusta la delimitación de IDEAM (2010), al norte, noroccidente y suroccidente los límites se actualizan a cambios estratigráficos (Figura 3-66, Figura 3-73).

Para evaluar la anomalía de almacenamiento de agua subterránea GWS-GLDAS, los puntos se separan en cordillera Central y Occidental.

3.1.11.1 Cordillera Central

En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-67 y Figura 3-68) los valores más altos se presentan en el punto (j) asociado a flujos volcánicos y los más bajos en el punto (f) que tiene la mayor amplitud, este punto representa rocas sedimentarias recientes. Se observa una tendencia similar en los puntos (e), (f), (g), (h) en el norte y (n) y (o) en el sur, marcado por mínimos que sobresalen al inicio y al final de la serie. Los puntos (i), (k), (l), (m), (d) y (j) presentan las menores amplitudes, con cambios leves en la serie de tiempo y un comportamiento semejante, la mayoría ubicados hacia el centro de la provincia. Finalmente, los puntos (a), (b) y (c) ubicados al noreste, muestran una tendencia similar entre ellos.

La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da para un (1) mes de rezago en la mayoría de los puntos (Figura 3-69). El punto (e) en roca félsica tiene una correlación débil para seis (6) meses de rezago.

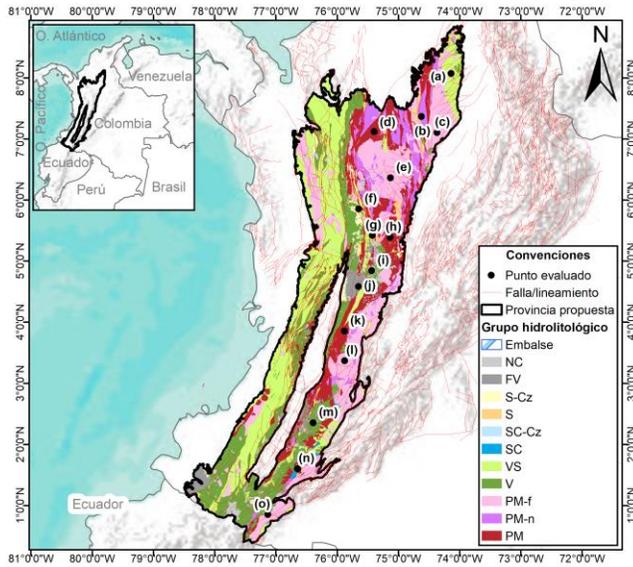
En el ciclo anual de GWS-GLDAS se observa que para los puntos ubicados en el centro y sur (Figura 3-71) los valores son casi constantes durante el año sin tendencia estacional marcada. En los puntos del norte, (a), (b) y (c) tienen valores mínimos en marzo; mientras que en los puntos (e) y (h) los mínimos se presentan en agosto y septiembre. El punto (f) presenta valores mínimos en marzo y septiembre (Figura 3-70 y Figura 3-71).

En la Figura 3-72 se puede ver un diagrama de barras para las amplitudes de las series de tiempo de GWS-GLDAS en cada uno de los puntos, se observa que los diversos tipos de roca muestran tanto valores altos como bajos, en general.

De acuerdo con los puntos se marcan tendencias al norte, centro y sur, sin embargo, por la heterogeneidad en la geología debería considerarse información con mayor detalle para marcar una división en regiones hidrogeológicas.

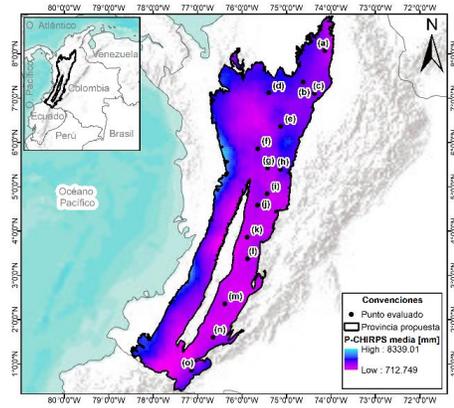
Figura 3-66. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Cordillera Central y Occidental - PM6.

(a) Grupos hidrolitológicos en la provincia, para la zona de la cordillera Central.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

(b) Distribución espacial de la precipitación media (P-CHIRPS) en la provincia, para la zona de la cordillera Central.



(c) Distribución espacial de la media de la anomalía en el almacenamiento de agua subterránea (GWS-GLDAS) en la provincia, para la zona de la cordillera Central.

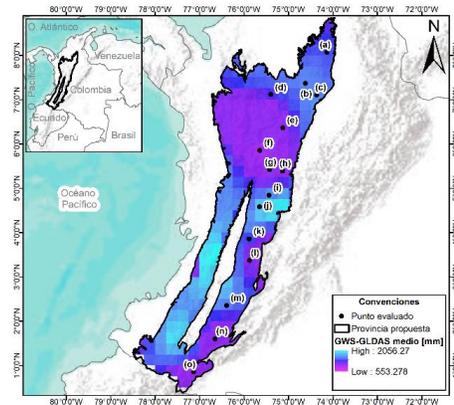


Figura 3-67. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

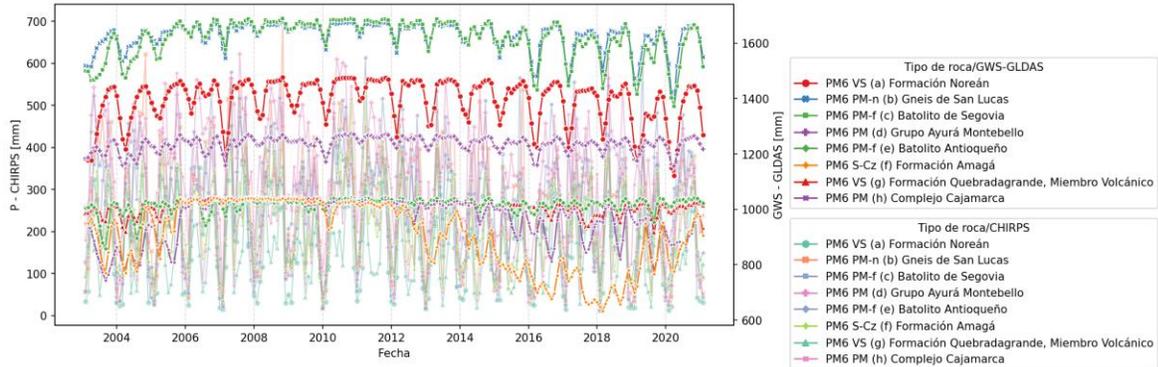


Figura 3-68. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

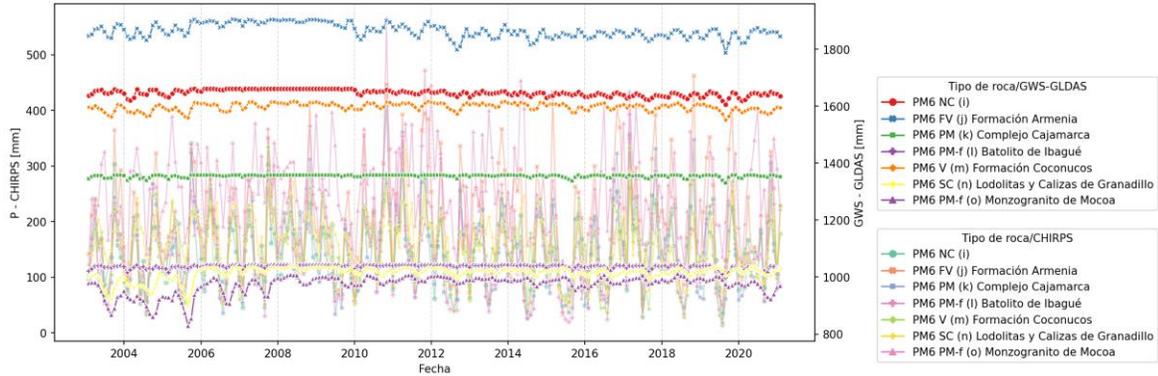


Figura 3-69. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

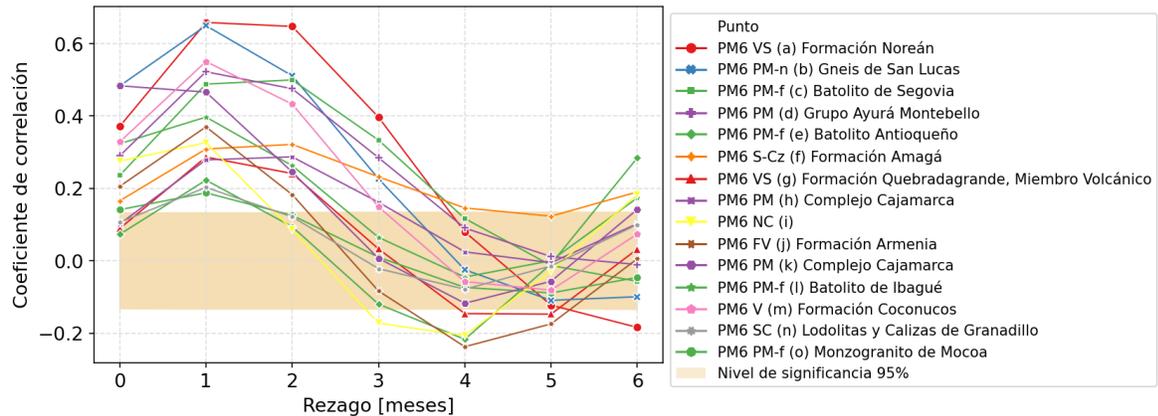


Figura 3-70. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

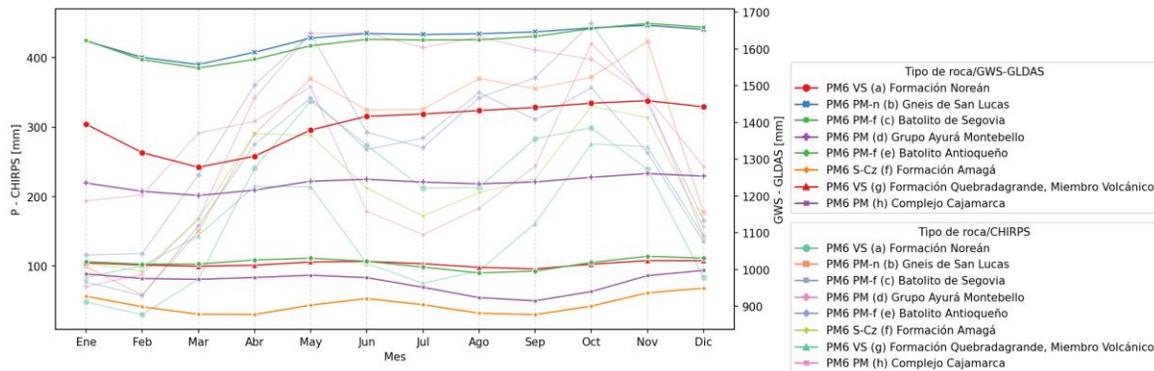


Figura 3-71. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

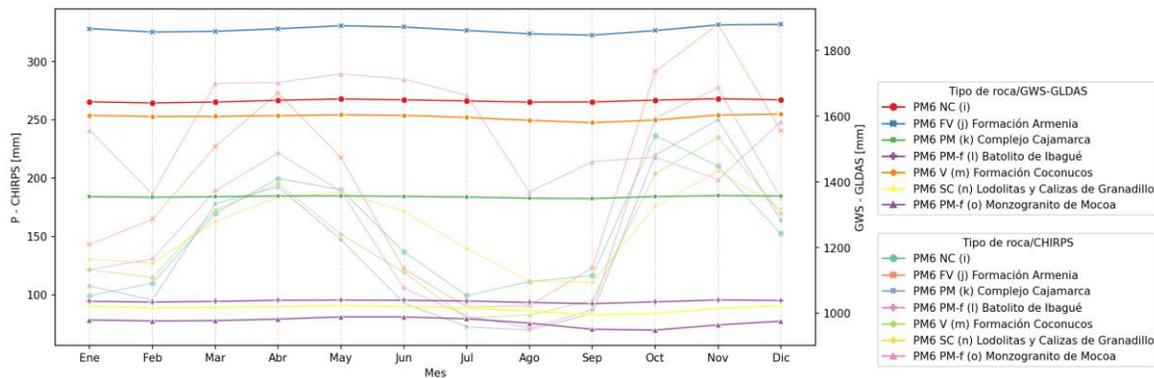
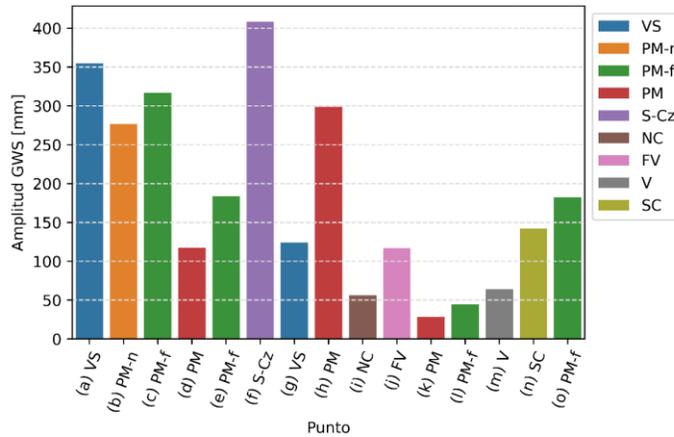


Figura 3-72. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



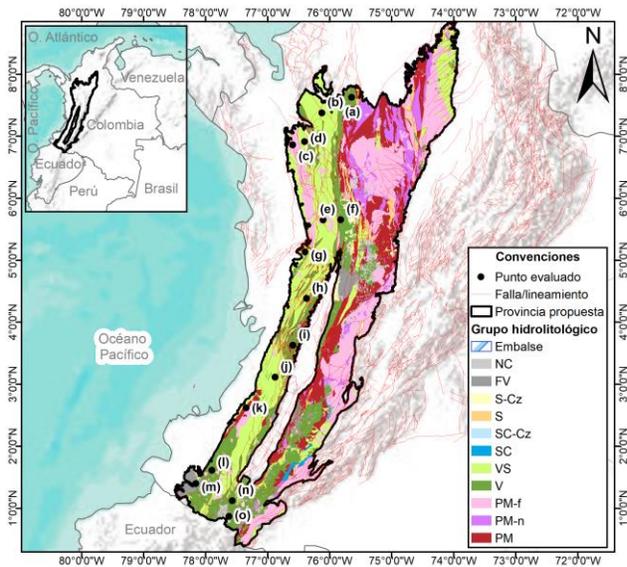
3.1.11.2 Cordillera Occidental

En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-74, Figura 3-75) todos los puntos tienen una tendencia semejante con bajas amplitudes. En los puntos (a), (b), (c), (d) al norte y (n)

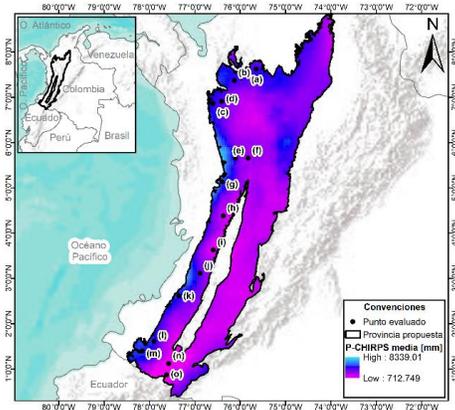
y (o) al sur sobresalen valores mínimos pronunciados que aumentan la amplitud de estos puntos.

Figura 3-73. Delimitación de la provincia hidrogeológica Cordillera Central y Occidental - PM6.

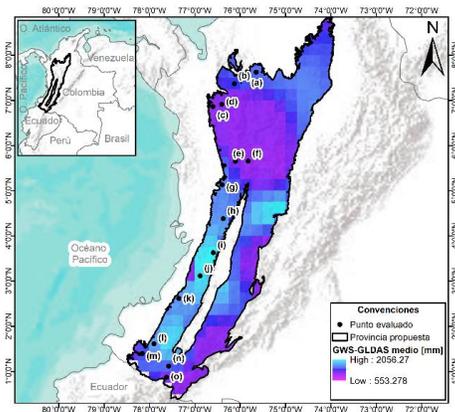
(a) Grupos hidrolitológicos en la provincia, para la zona de la cordillera Occidental.



(b) Distribución espacial de la precipitación media (P-CHIRPS) en la provincia, para la zona de la cordillera Occidental.



(c) Distribución espacial de la media de la anomalía en el almacenamiento de agua subterránea (GWS-GLDAS) en la provincia, para la zona de la cordillera Occidental.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da para un (1) mes de rezago en la mayoría de los puntos. Solo el punto (i) tiene una muy baja correlación para dos (2) meses de rezago y en el punto (j) la correlación no es estadísticamente significativa (Figura 3-76).

En el ciclo anual de GWS-GLDAS se observan valores casi constantes durante el año sin tendencia estacional marcada, a excepción de los puntos (a), (b), (c) y (d) con mínimos en marzo; (n) y (o) con mínimos en septiembre (Figura 3-77, Figura 3-78). La Figura 3-79 muestra un diagrama de barras para la amplitud de las series de tiempo de GWS-GLDAS, sobresalen los valores altos de los puntos (a) asociado a roca volcánica y (c) asociado a roca félsica. Para la mayoría de los puntos los valores son similares.

De acuerdo con los puntos evaluados, se marcan tendencias al norte, centro y sur, sin embargo, por la heterogeneidad en la geología debería considerarse información con mayor detalle para marcar una división.

Figura 3-74. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

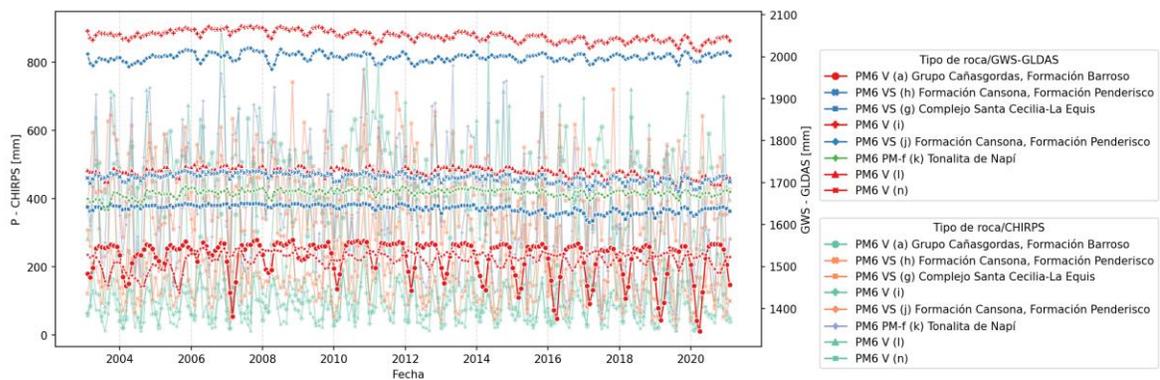


Figura 3-75. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

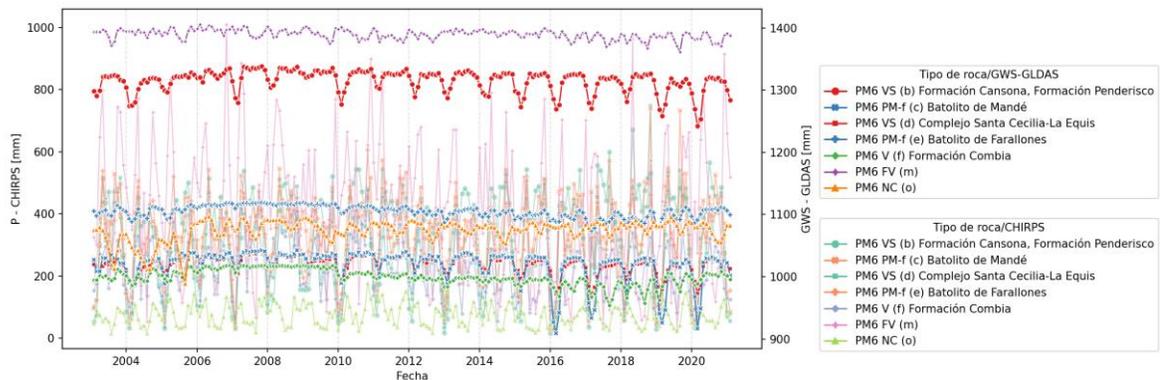


Figura 3-76. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

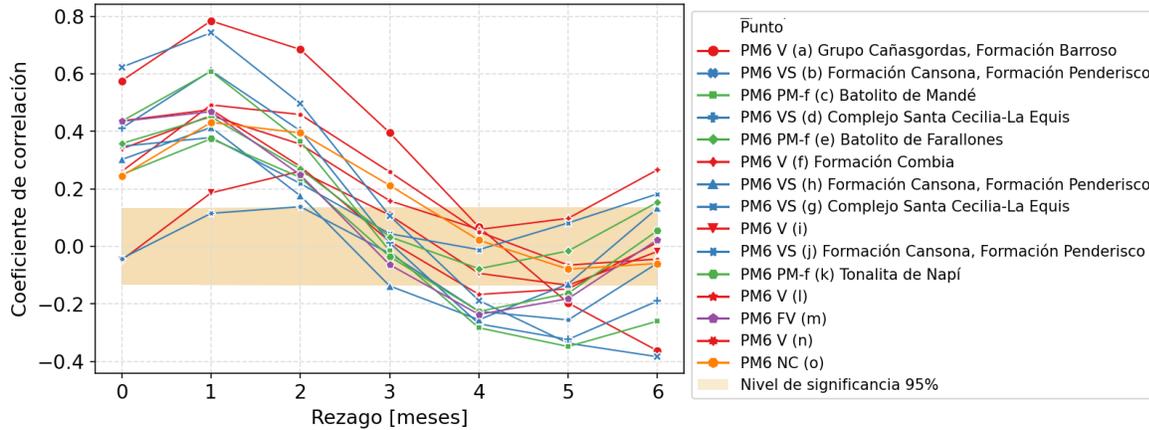


Figura 3-77. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

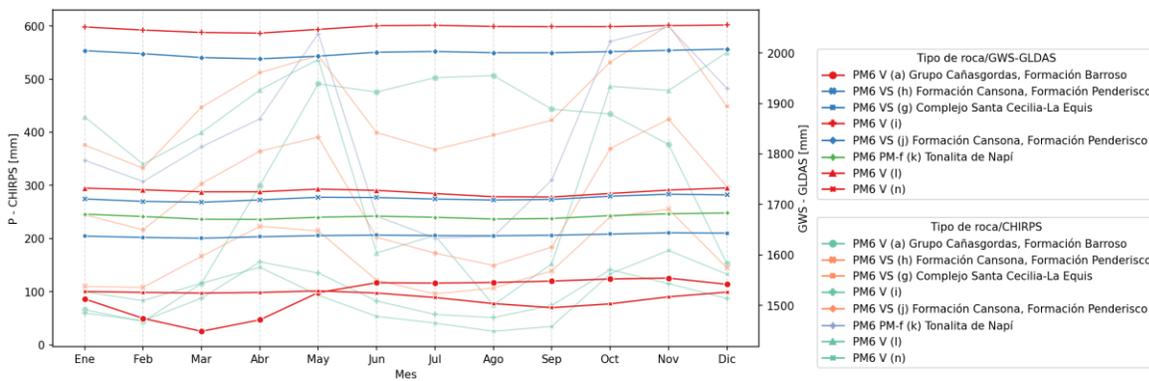


Figura 3-78. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

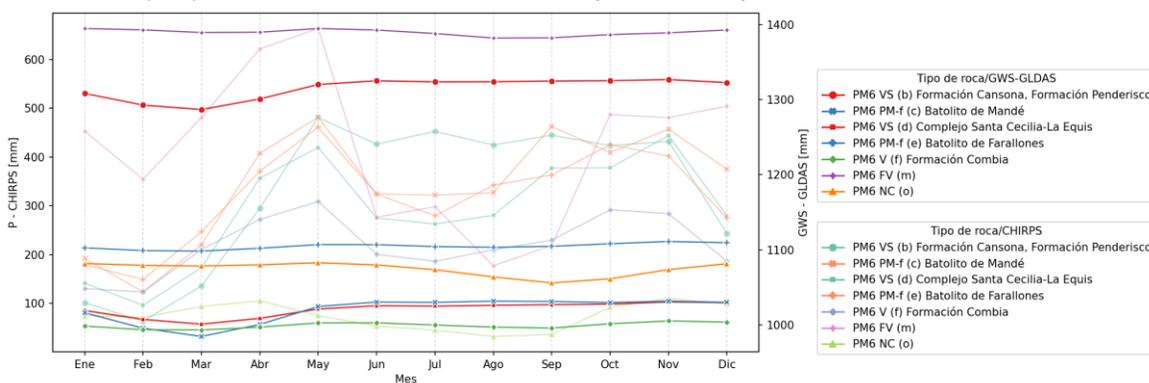
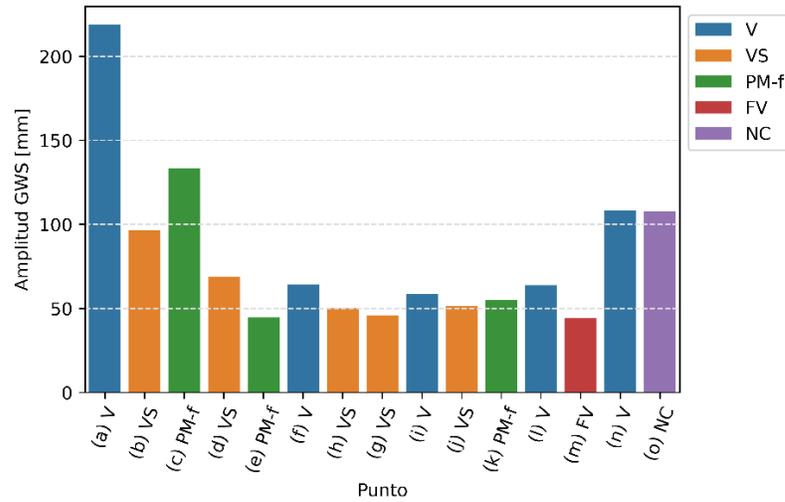


Figura 3-79. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.

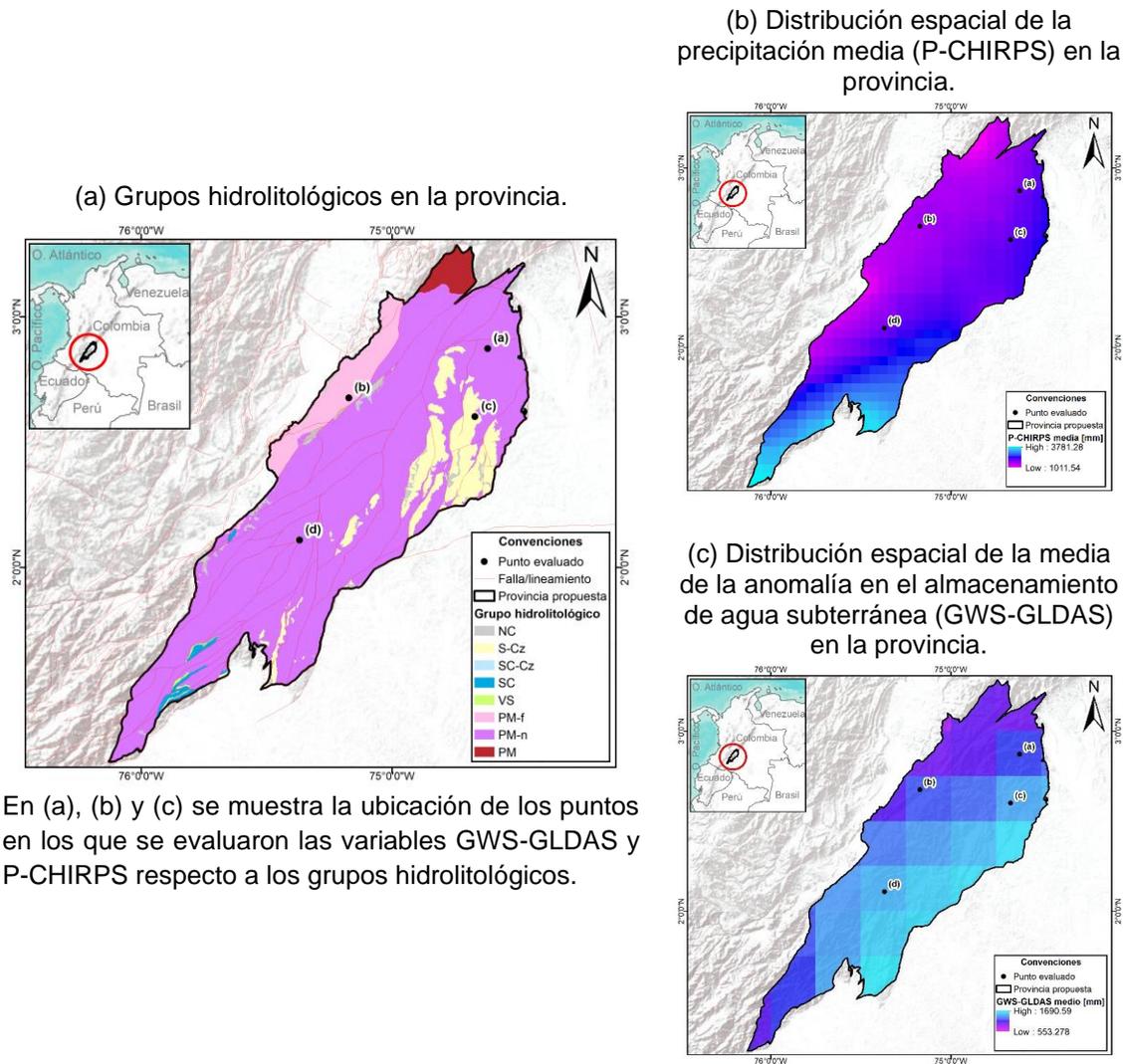


3.1.12 PM7* Macizo de Garzón

Se ajusta la delimitación de IDEAM (2010) siguiendo límites estratigráficos y fallados según la cartografía del AGC v2020. Compuesta principalmente por rocas neísicas, en IDEAM (2010) considerada basamento (Figura 3-80).

En los cuatro (4) puntos evaluados las series de tiempo (de GWS-GLDAS) tienen la misma tendencia con menores amplitudes en los puntos (b) y (d) (Figura 3-81, Figura 3-84). La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da en los cuatro (4) puntos para un (1) mes de rezago (Figura 3-82). El ciclo anual de GWS-GLDAS en los puntos (b) y (d) no tiene cambios sobresalientes y ellos puntos (a) y (c) se observan valores mínimos en febrero (Figura 3-83).

Figura 3-80. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Macizo de Garzón - PM7*.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

Figura 3-81. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

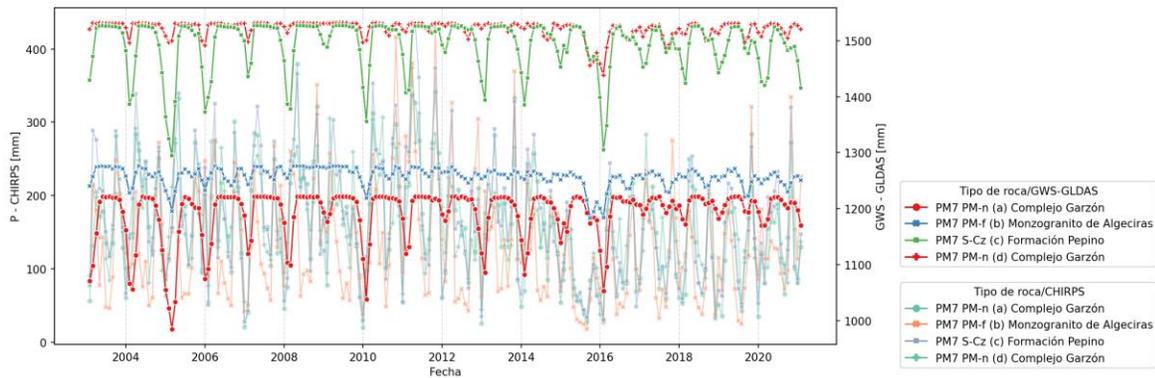


Figura 3-82. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

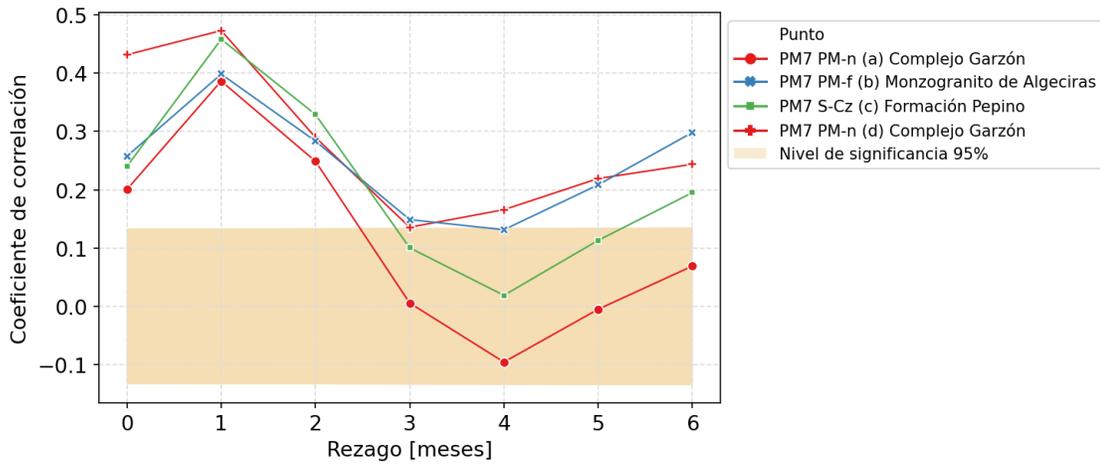


Figura 3-83. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

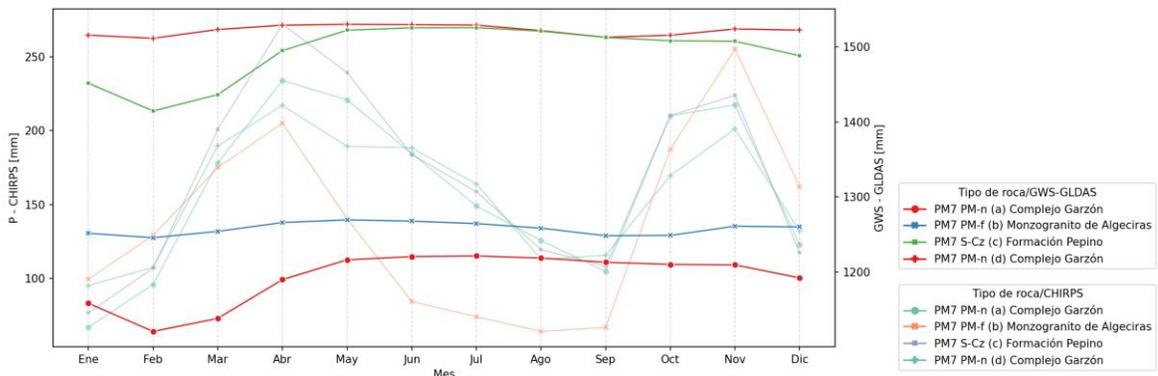
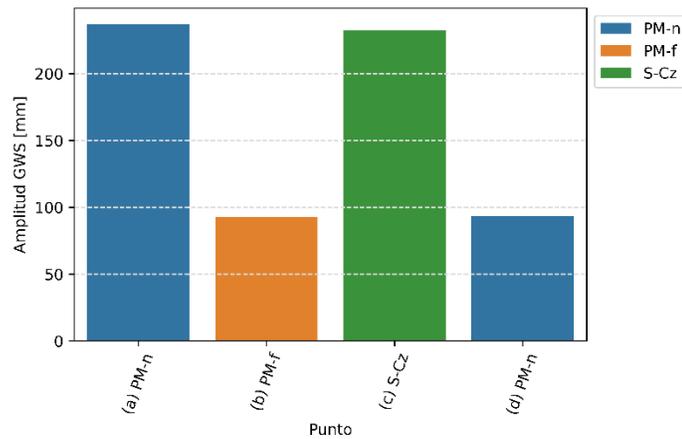


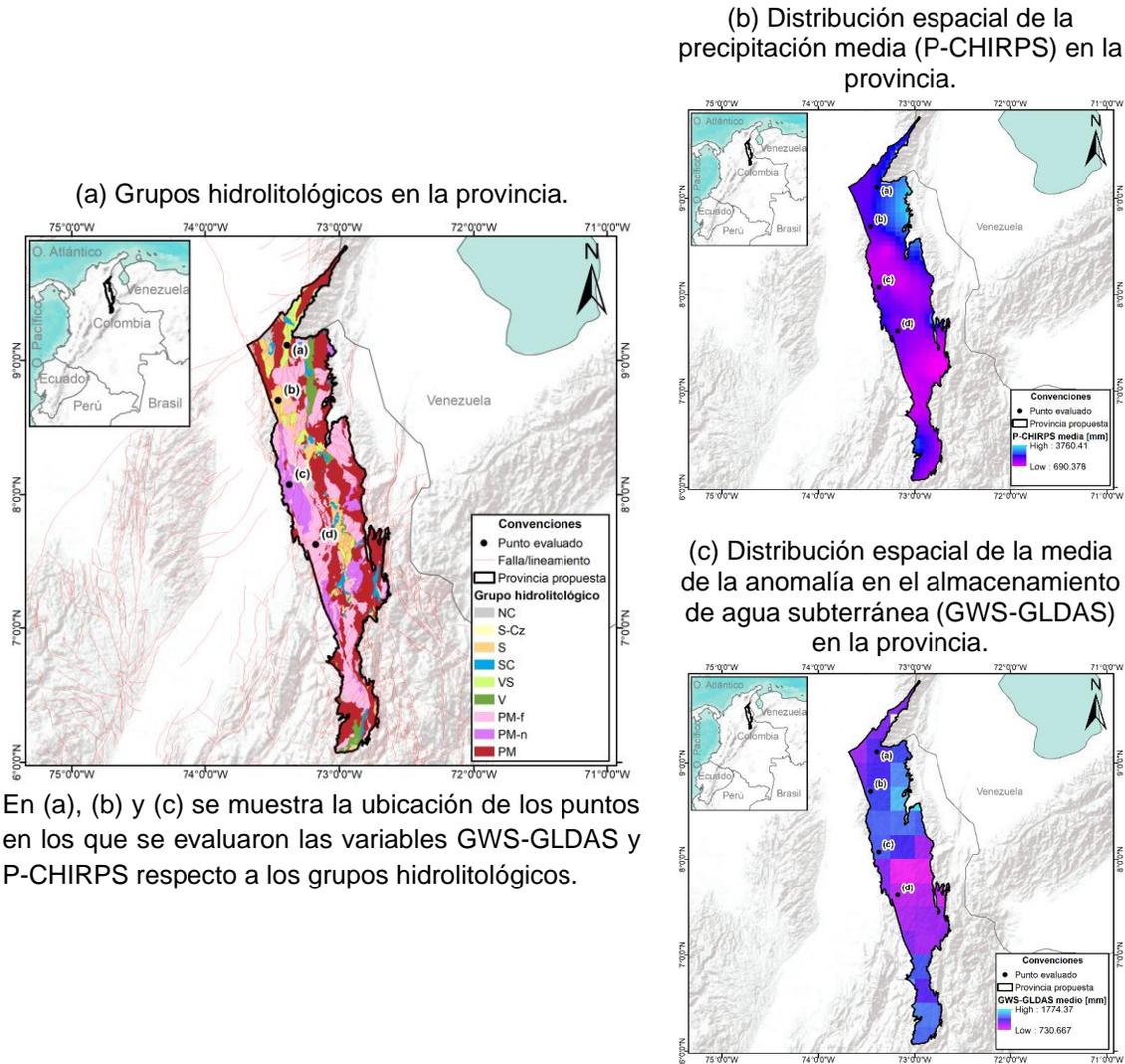
Figura 3-84. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.13 PM8* Macizo de Santander

Esta provincia reúne principalmente rocas cristalinas, en IDEAM (2010) nombrada como basamento. Los límites fueron ajustados con límites estratigráficos y fallas del AGC versión 2020 (Figura 3-85).

Figura 3-85. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Macizo de Santander - PM8*.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-86) se observa, en general, una misma tendencia con una menor amplitud en el punto (c). La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da para dos (2) meses de rezago en tres (3) puntos y en el punto (d) la correlación es baja para un (1) mes de rezago (Figura 3-87). En el ciclo anual de GWS-GLDAS sobresalen valores mínimos en marzo y abril y máximos en noviembre (Figura 3-88).

En la Figura 3-89 se puede ver un diagrama de barras con las amplitudes de las series de tiempo de GWS-GLDAS, donde los valores más altos están asociados a rocas sedimentarias y vulcano-sedimentarias y los menores a rocas plutónicas.

Figura 3-86. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

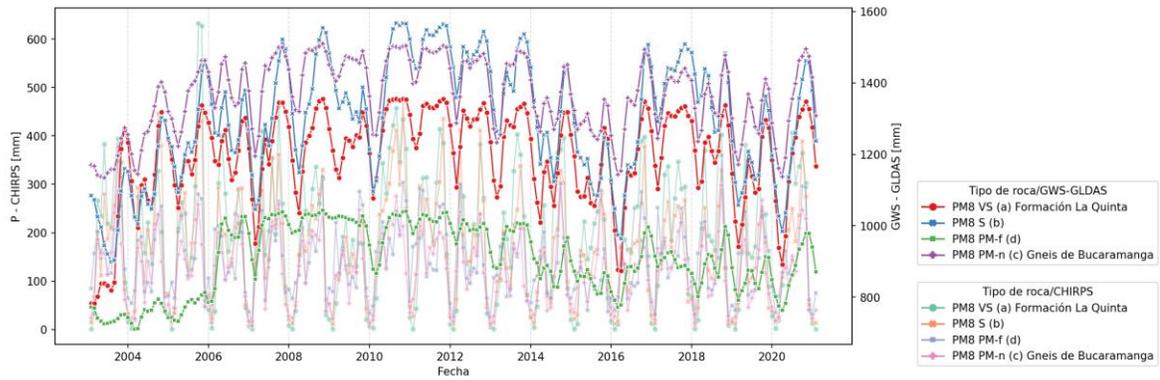


Figura 3-87. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

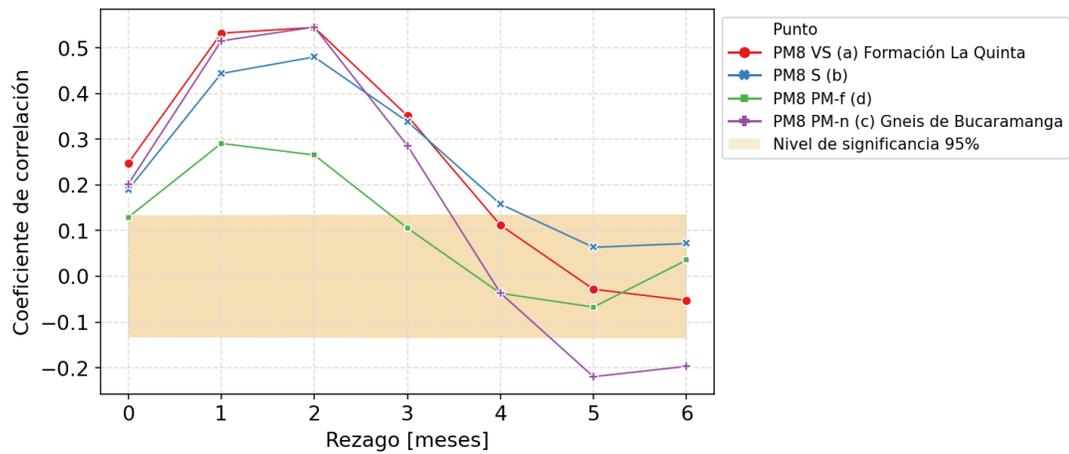


Figura 3-88. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

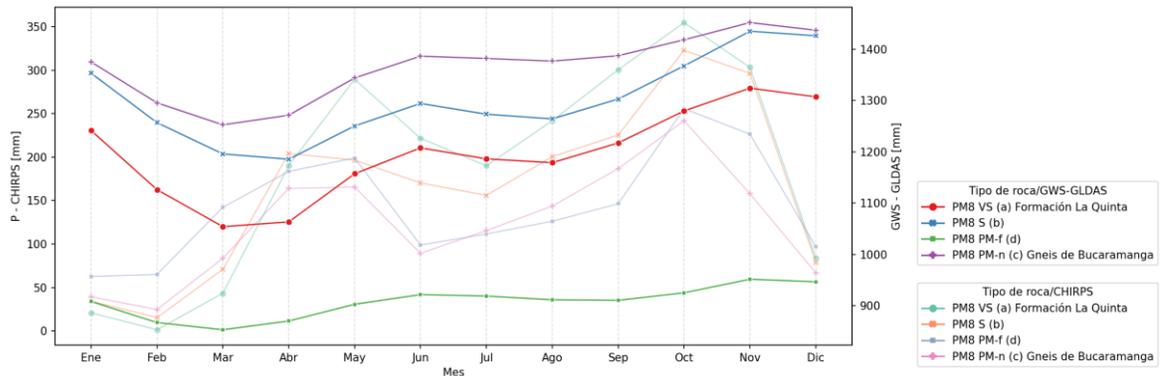
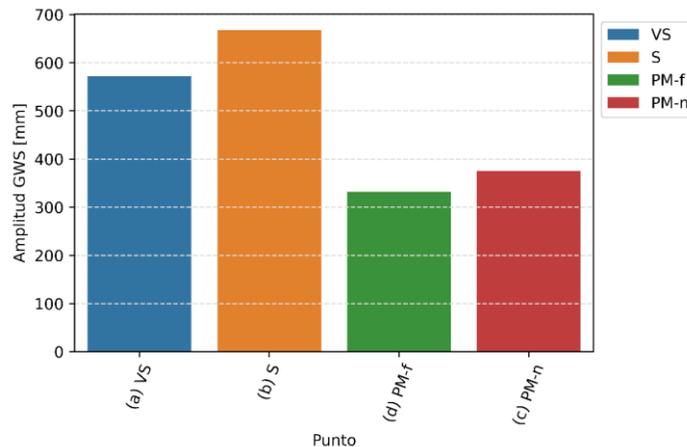


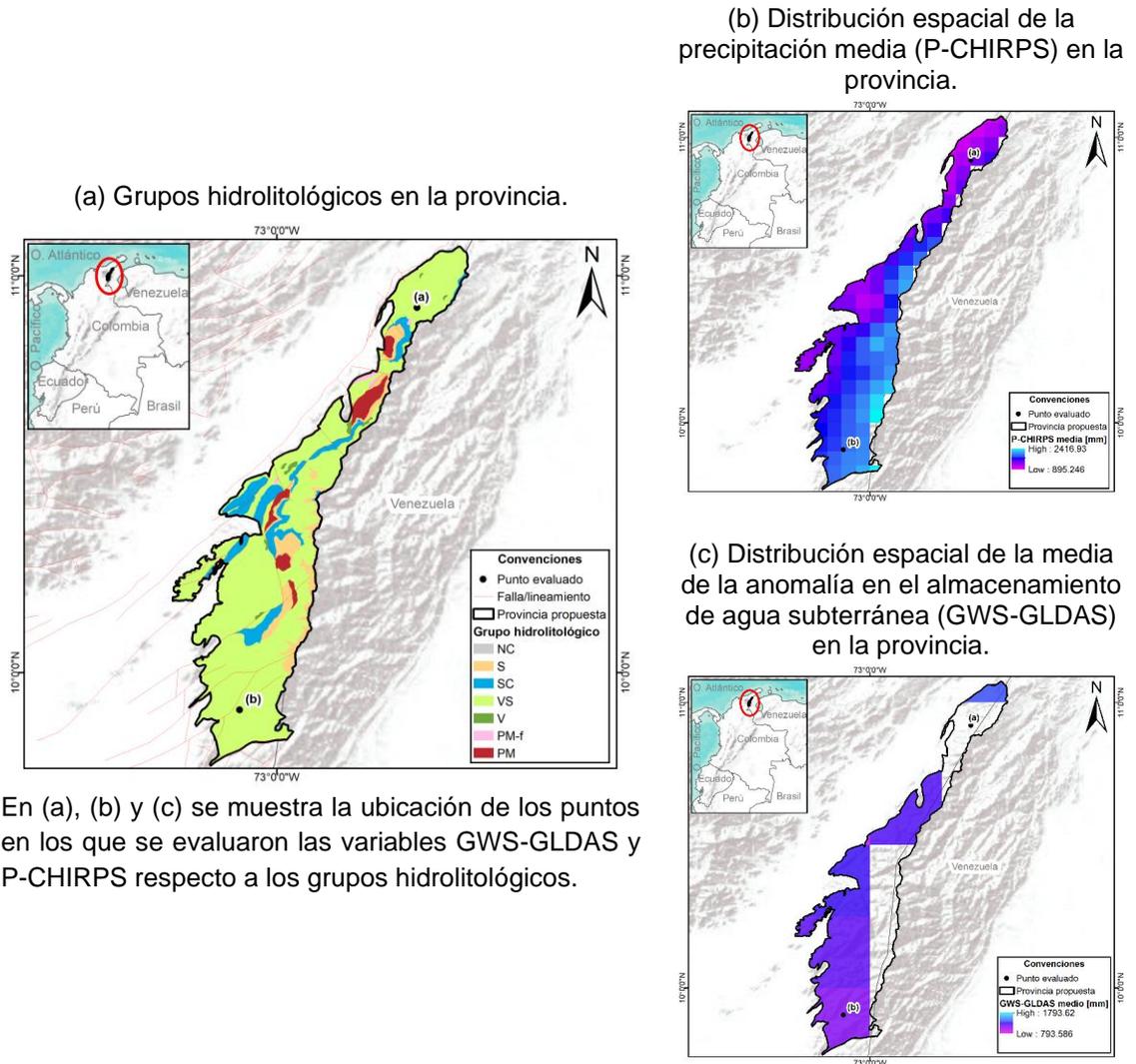
Figura 3-89. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.

3.1.14 PM9* Serranía del Perijá

Esta provincia abarca principalmente rocas vulcano-sedimentarias, en IDEAM (2010) nombrada como basamento. Los límites fueron ajustados con límites estratigráficos y fallas del AGC versión 2020, aumentando su extensión hacia el occidente (Figura 3-90).

Los 2 puntos evaluados abarcan la misma unidad cronoestratigráfica. Las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-91) muestran el mismo comportamiento con diferente magnitud y amplitud semejante (Figura 3-94). La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da para dos (2) meses de rezago (Figura 3-92) y en el ciclo anual de GWS-GLDAS sobresalen valores mínimos en abril y máximos en noviembre y diciembre (Figura 3-93).

Figura 3-90. Delimitación de la provincia hidrogeológica intramontana Serranía del Perijá - PM9*.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

Figura 3-91. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

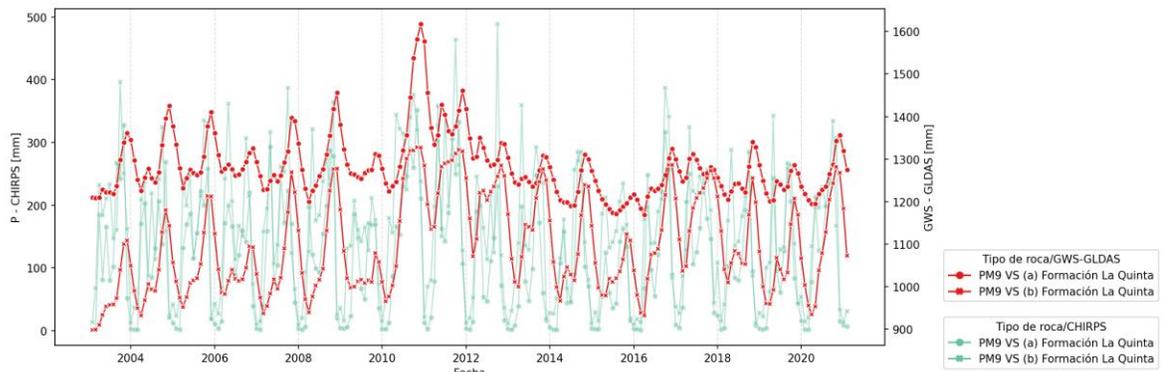


Figura 3-92. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

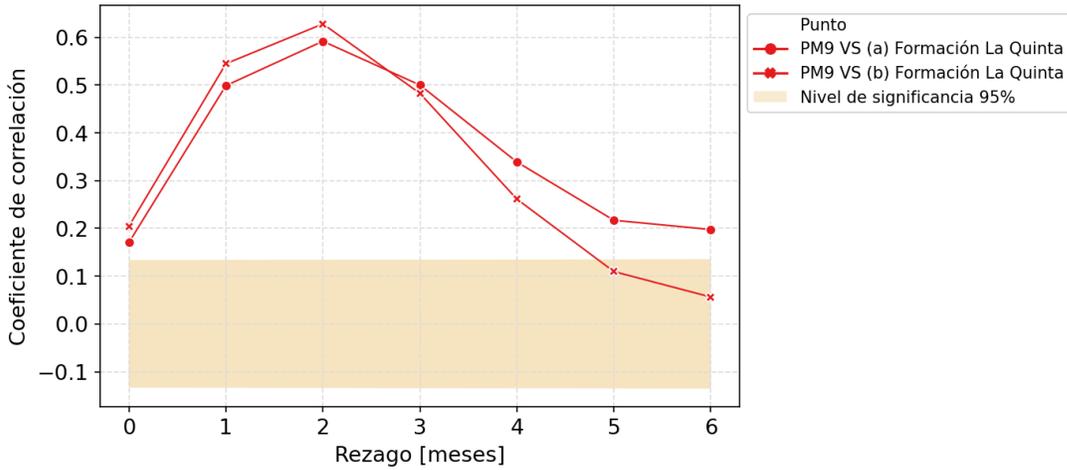


Figura 3-93. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

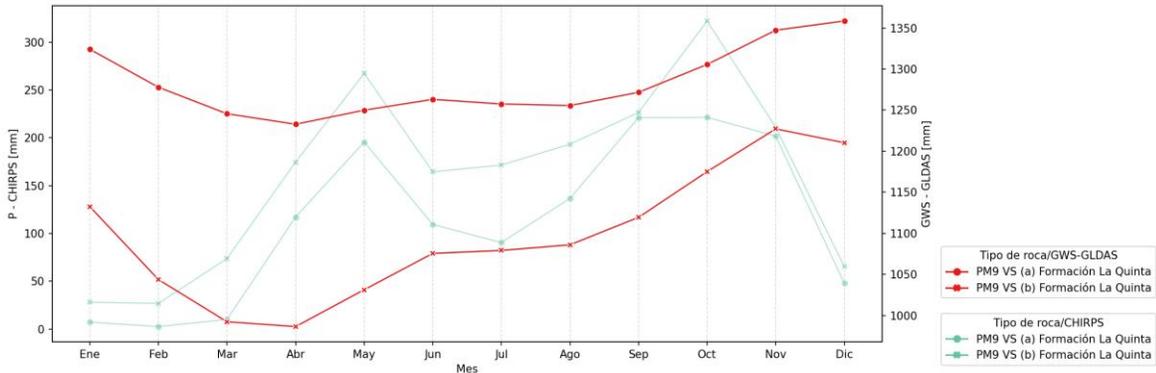
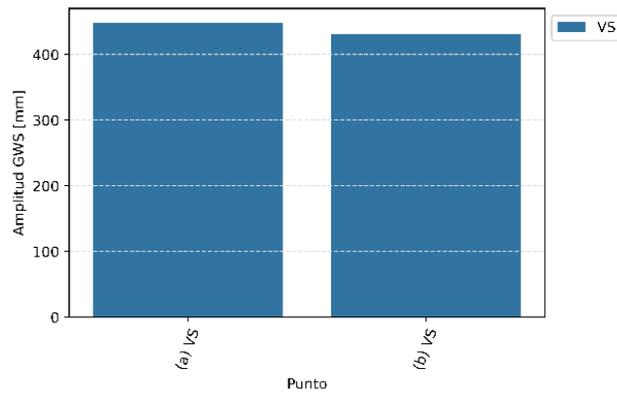


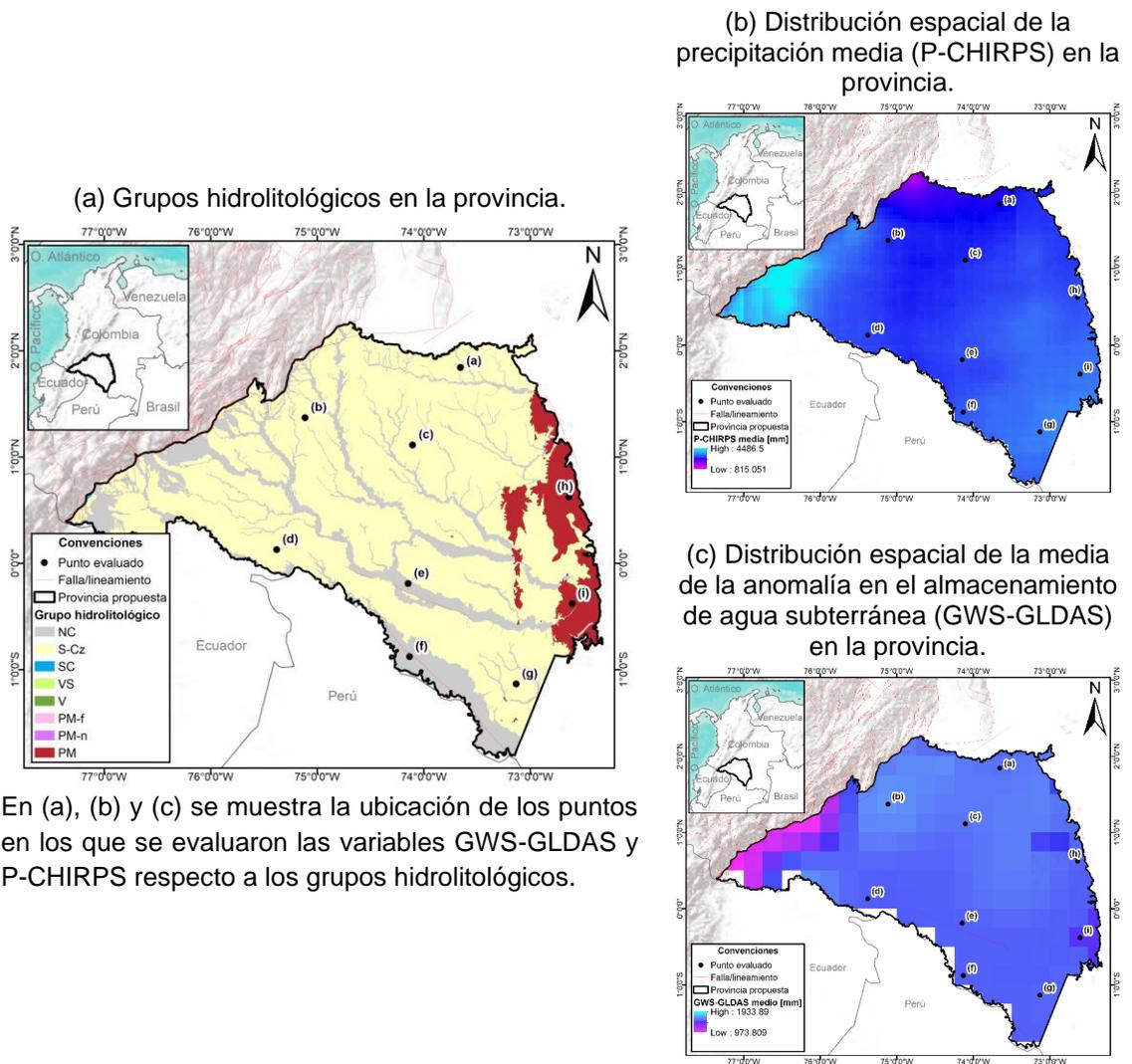
Figura 3-94. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.15 PP1 Caguán - Putumayo

El límite occidental fue actualizado con los trazados de las fallas del AGC v2020, hacia el norte se propone un nuevo límite dado por la divisoria de aguas de las áreas hidrográficas Orinoco y Amazonas (Figura 3-95). Al este se conserva el límite marcado por un alto estructural delimitado en IDEAM (2010) y Barrero et al. (2007), refinado en donde afloran los metasedimentos ordovícicos de la serranía de Chiribiquete. En el extremo sureste se conserva el límite trazado en IDEAM (2010), ya que en superficie no hay elementos geológicos o geomorfológicos que permitan refinar este límite (establecido como un alto estructural en IDEAM, 2010).

Figura 3-95. Delimitación de la provincia hidrogeológica pericratónica Caguán – Putumayo - PP1.



En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-96, Figura 3-97), todos los puntos muestran un comportamiento similar con diferentes magnitudes y amplitudes. Las mayores amplitudes se dan en los puntos (a) y (c) que representan rocas sedimentarias cenozoicas y en los puntos (h) e (i) ubicados en metasedimentos catalogados como rocas metamórficas en la agrupación por tipos de roca (PM).

La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da en todos los puntos para un (1) mes de rezago (Figura 3-98). En el ciclo anual de GWS-GLDAS sobresalen valores mínimos en febrero para todos los puntos (Figura 3-99, Figura 3-100).

Las amplitudes de las series de tiempo de GWS-GLDAS varían para un mismo grupo hidrogeológico, los valores más altos y también más bajos se asocian a sedimentos cenozoicos (Figura 3-101).

Figura 3-96. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

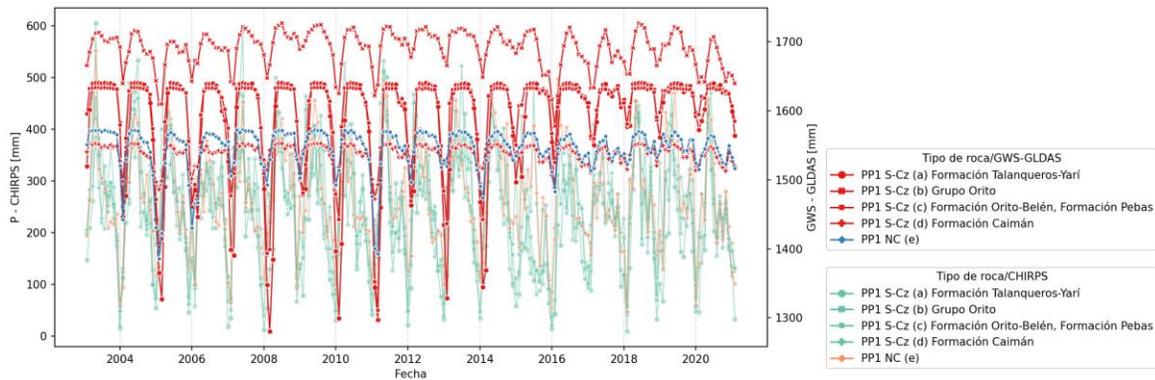


Figura 3-97. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

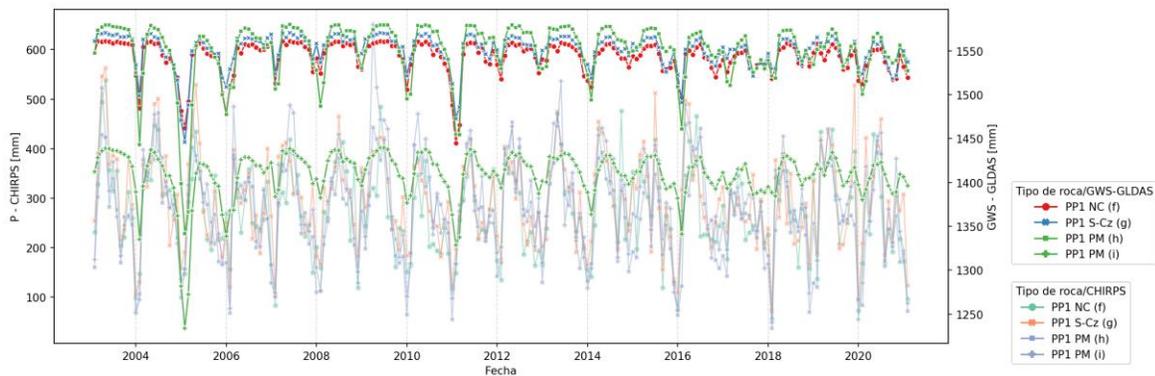


Figura 3-98. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

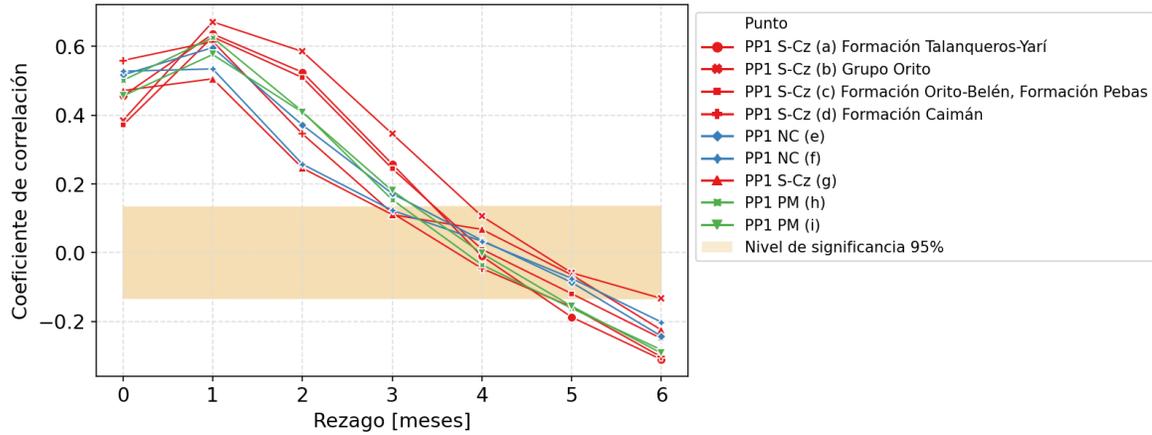


Figura 3-99. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (1/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

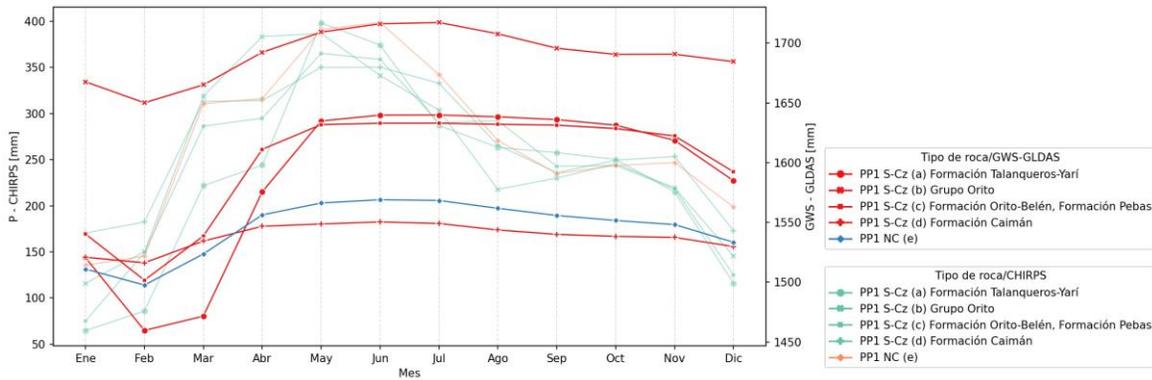


Figura 3-100. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados (2/2). Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

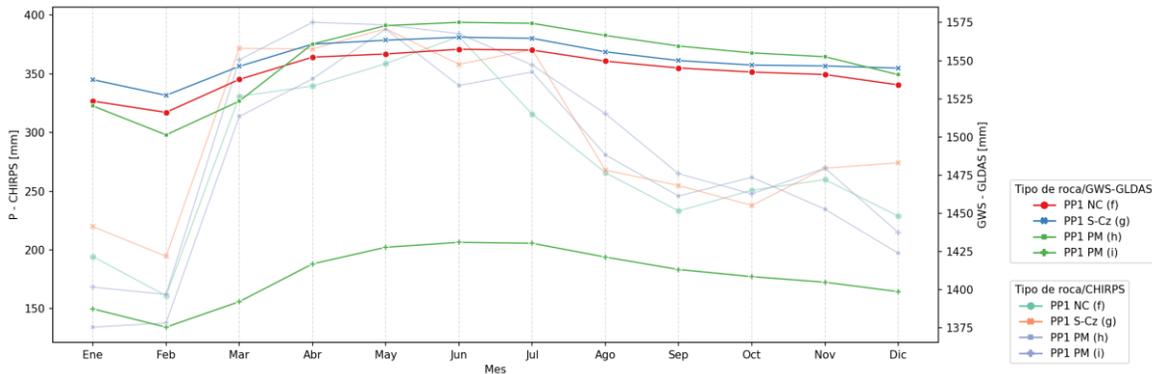
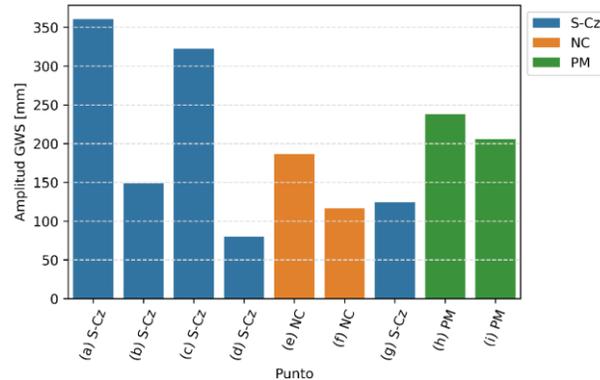


Figura 3-101. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.16 PP2 Vaupés - Amazonas

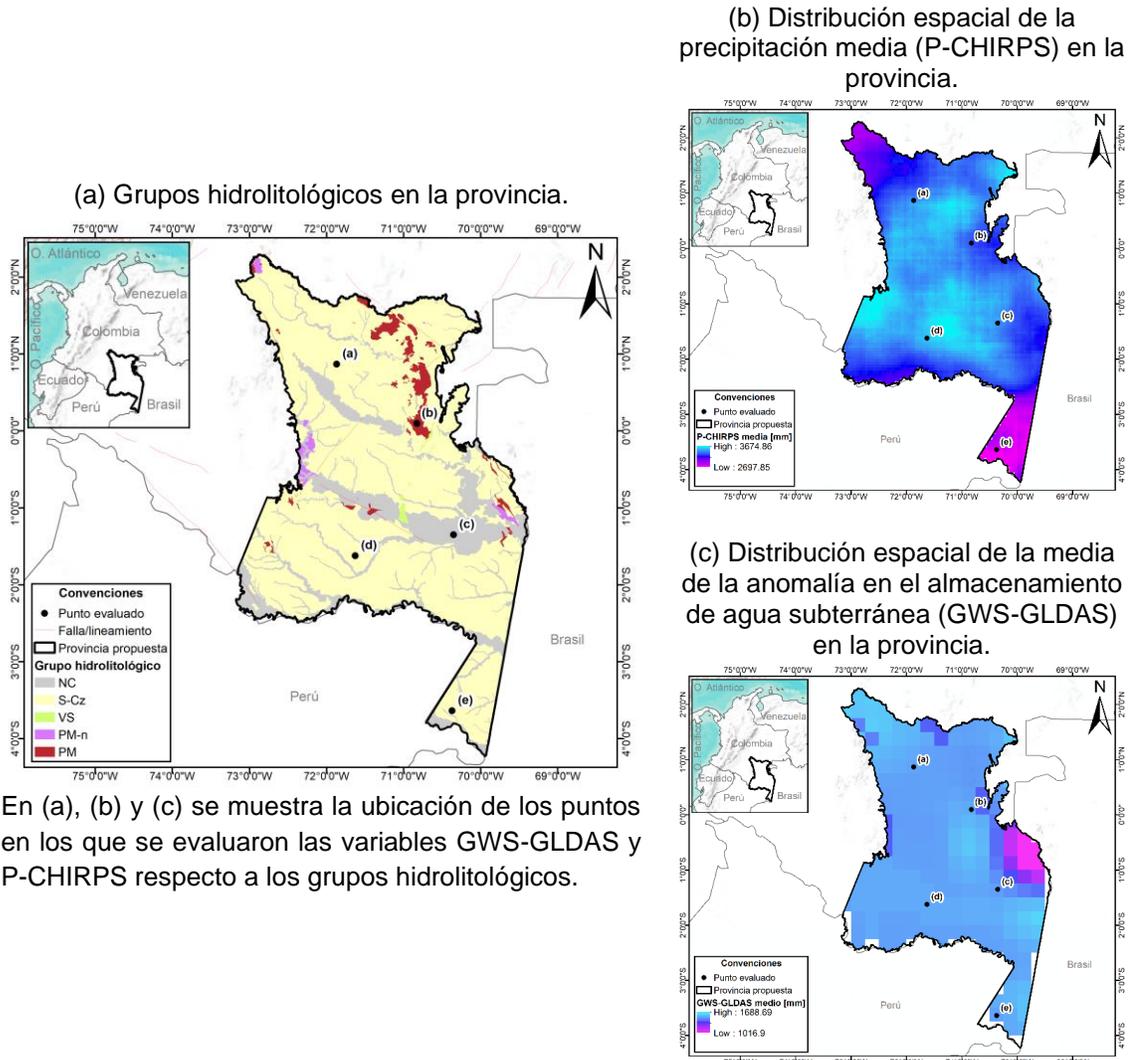
Los límites al occidente y oriente fueron actualizados con los límites estratigráficos del AGC v2020, hacia el norte se propone un nuevo límite dado por la divisoria de aguas de las áreas hidrográficas Orinoco y Amazonas (Figura 3-102).

Al oeste se conserva el límite marcado por un alto estructural delimitado en IDEAM (2010) y Barrero et al. (2007), refinado en donde afloran los metasedimentos ordovícicos de la Serranía de Chiribiquete. En el extremo suroeste se conserva el límite trazado en IDEAM (2010), ya que en superficie no hay elementos geológicos o geomorfológicos que permitan refinar este límite (establecido como un alto estructural en IDEAM, 2010).

En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-103) todos los puntos muestran, en general, un comportamiento similar con mayor amplitud en el punto los puntos (a) y (b) y menor en el punto (c) (Figura 3-106). La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS (Figura 3-104) se da para un (1) mes de rezago en los puntos (a), (b) y (d); para dos (2) meses en el punto (e) y para las series simultáneas (sin rezago) en el punto (c).

En el ciclo anual de GWS-GLDAS (Figura 3-105) sobresalen valores mínimos en febrero para los puntos (a) y (b); en octubre para los puntos (c) y (e). El punto (d) presenta los valores más bajos en febrero y de septiembre a noviembre.

Figura 3-102. Delimitación de la provincia hidrogeológica Vaupés – Amazonas - PP2.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

Figura 3-103. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

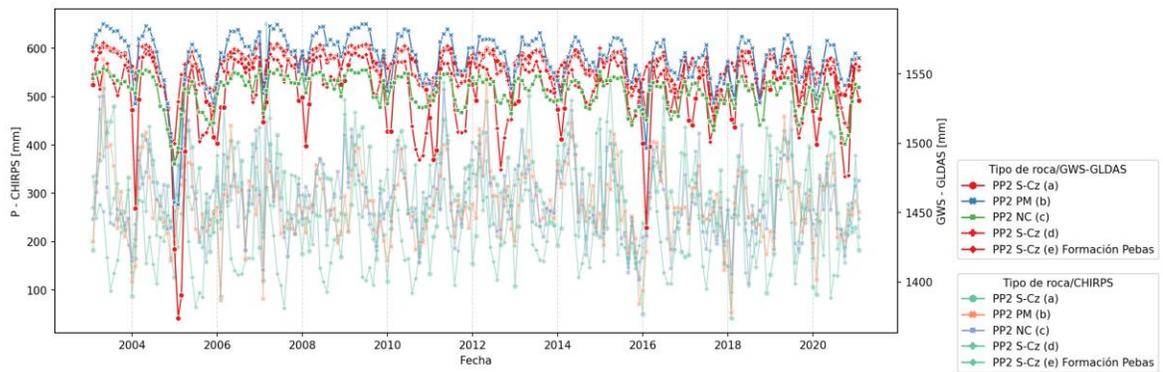


Figura 3-104. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

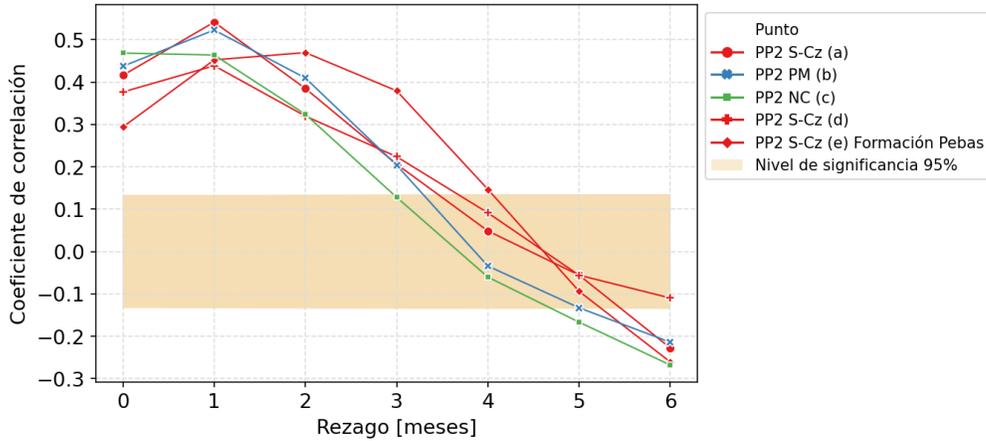


Figura 3-105. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

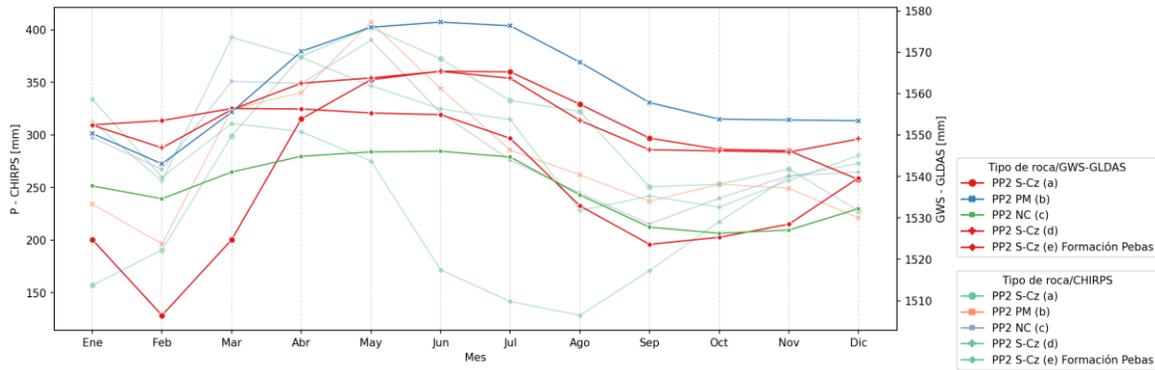
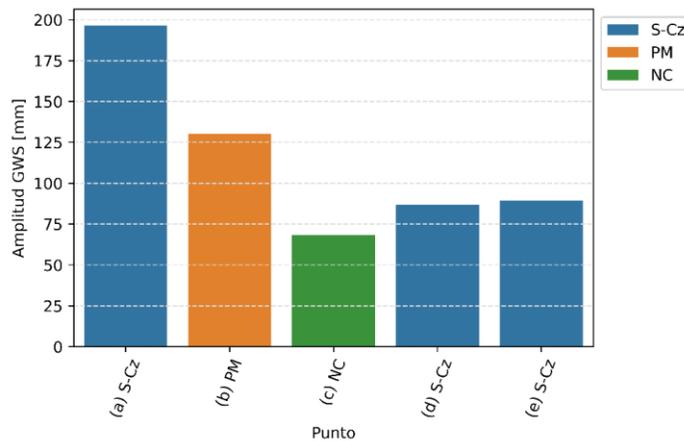


Figura 3-106. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.17 PP3 Orinoquía (Llanos Orientales)

El límite oriental se ajusta con límites estratigráficos y fallas del AGC v2020, hacia el sur se propone un nuevo límite dado por la divisoria de aguas de las áreas hidrográficas Orinoco y Amazonas (Figura 3-107).

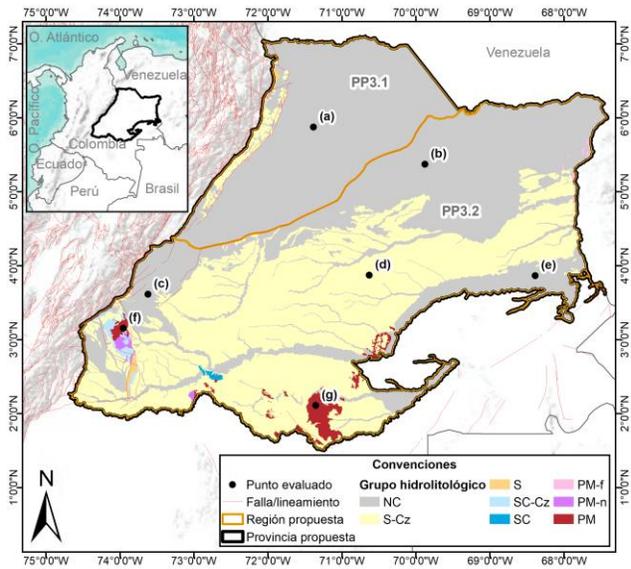
En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-108) todos los puntos muestran, en general, un comportamiento similar con mayor amplitud en el punto los puntos (d) y (b) y menor en los puntos (f) y (g). Los valores más altos se dan en el punto (c) y los más bajos en el punto (a)

La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS (Figura 3-109) se da para dos (2) meses (a, b, d, e) y un (1) mes de rezago (c, f, g). En el ciclo anual de GWS-GLDAS se observa una tendencia similar, con valores mínimos en febrero en los puntos (c), (f) y (g); y en marzo para el resto de los puntos (Figura 3-110). La amplitud de las series de tiempo de GWS-GLAS (Figura 3-111) muestra valores más altos en puntos asociados a depósitos no consolidados y a rocas sedimentarias y más bajos en los que se relacionaron con rocas cristalinas.

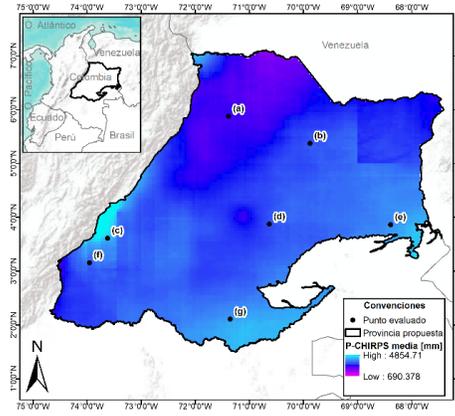
Regiones propuestas (Figura 3-107): se propone dividir la provincia al norte y al sur de la falla del Meta, de acuerdo con el contraste en la distribución espacial de GWS-GLDAS. Se delimita por el trazado de la falla del Meta y límites estratigráficos entre depósitos aluviales y eólicos.

Figura 3-107. Delimitación de la provincia hidrogeológica pericratónica Orinoquía - PP3.

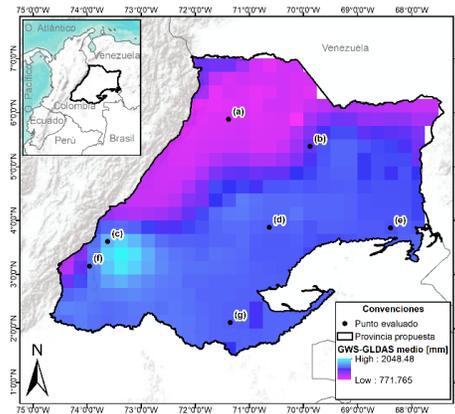
(a) Grupos hidrolitológicos y delimitación de regiones hidrogeológicas propuestas en la provincia.



(b) Distribución espacial de la precipitación media (P-CHIRPS) en la provincia.



(c) Distribución espacial de la media de la anomalía en el almacenamiento de agua subterránea (GWS-GLDAS) en la provincia.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

Figura 3-108. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

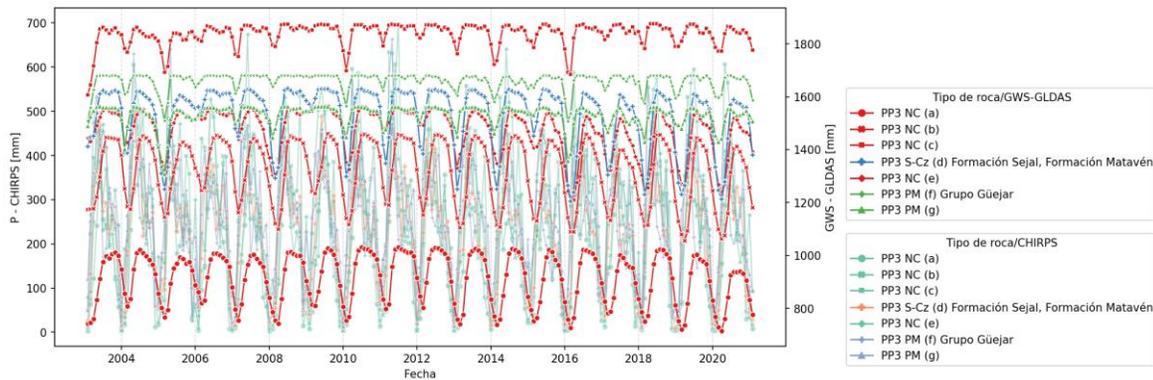


Figura 3-109. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

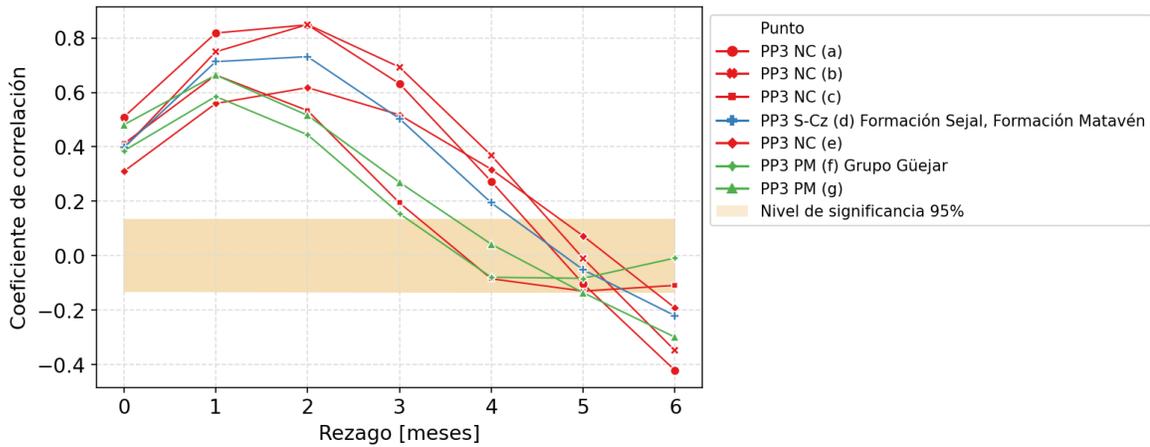


Figura 3-110. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

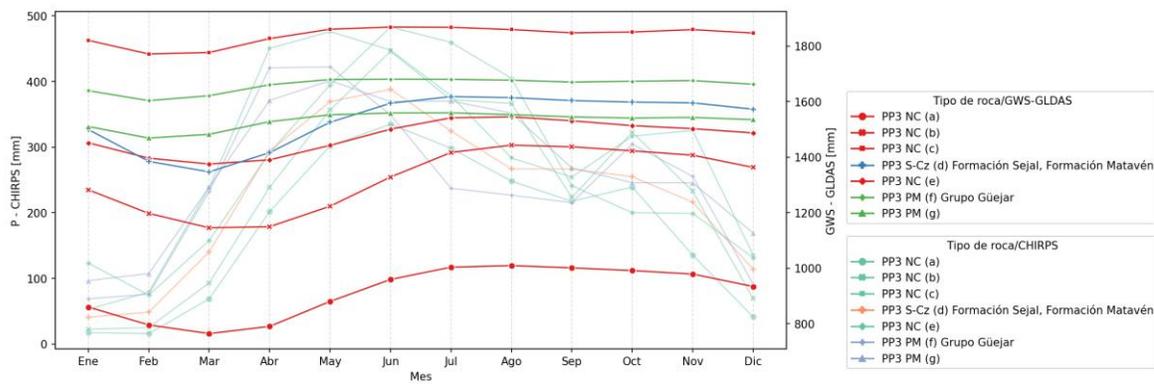
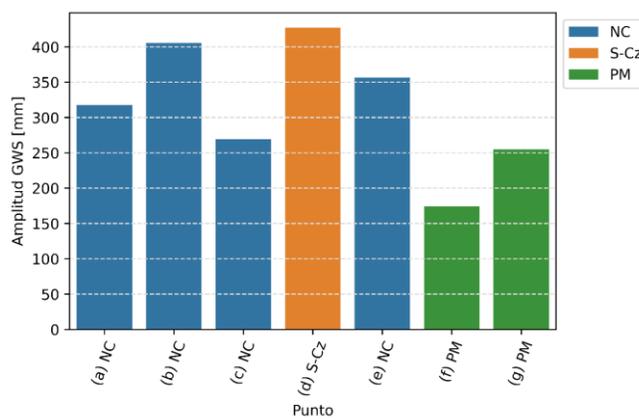


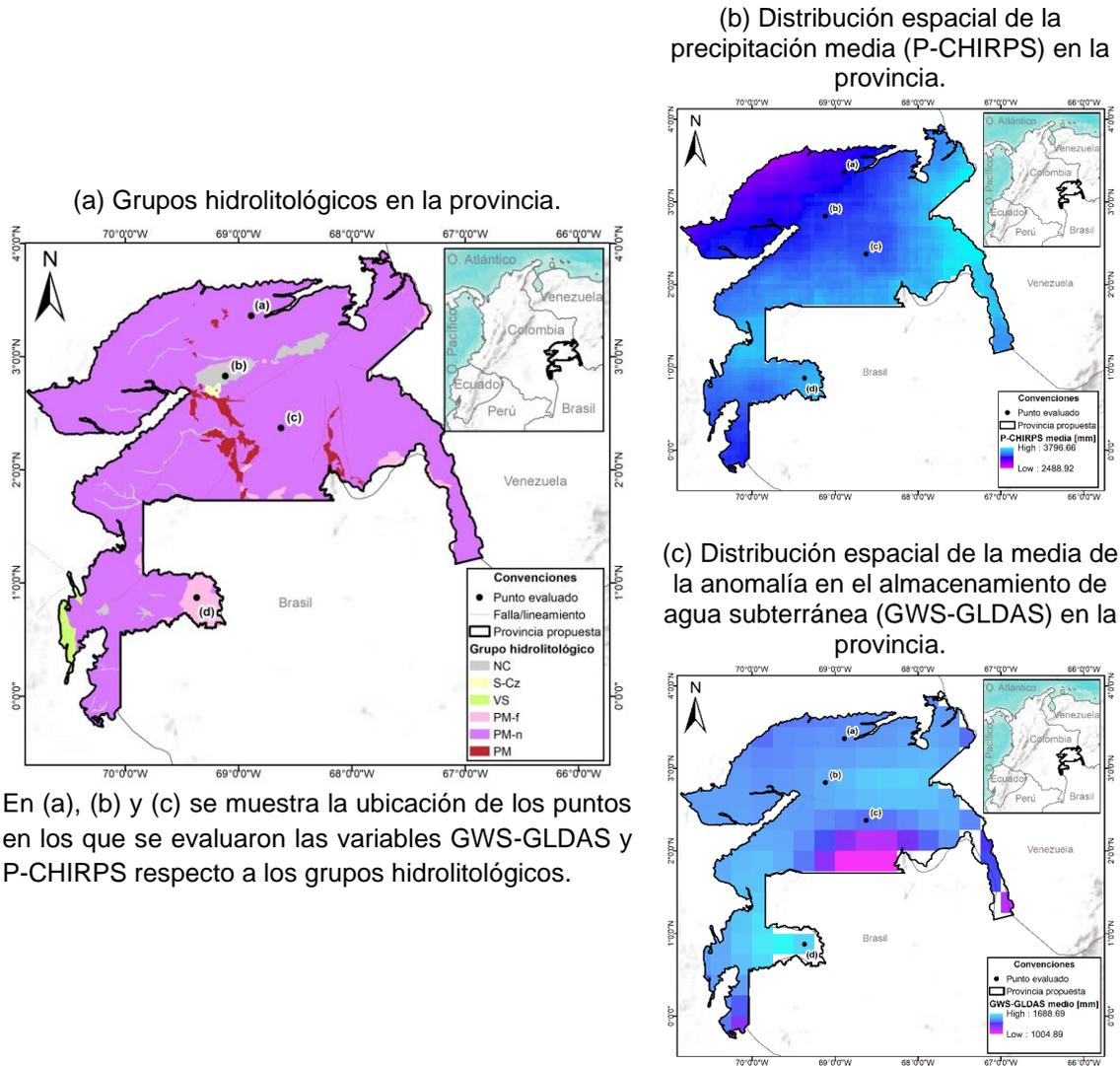
Figura 3-111. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



3.1.18 PP4* Escudo de Guyana

Los límites se ajustaron con las unidades cronoestratigráficas del AGC v2020. En esta provincia predominan las rocas neísicas (Figura 3-112).

Figura 3-112. Delimitación de la provincia hidrogeológica pericratónica Escudo de Guyana - PP4*.



En (a), (b) y (c) se muestra la ubicación de los puntos en los que se evaluaron las variables GWS-GLDAS y P-CHIRPS respecto a los grupos hidrolitológicos.

En las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-113) se observa una tendencia similar con menor amplitud en el punto (d) que tiene los valores más altos. La mayor correlación entre las series de tiempo de P-CHIRPS y GWS-GLDAS se da para un (1) mes de rezago en los puntos (a), (b) y (c) y sin rezago en el punto (d) (Figura 3-114). En el ciclo anual de GWS-GLDAS, los cuatro (4) puntos coinciden con valores mínimos en febrero y marzo (Figura 3-115).

Los valores de amplitud de las series de tiempo de GWS-GLDAS (Figura 3-116) son menores en el punto asociado a roca félsica y más altos en los relacionados con depósitos no consolidados y rocas neísicas.

Figura 3-113. Serie de tiempo de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

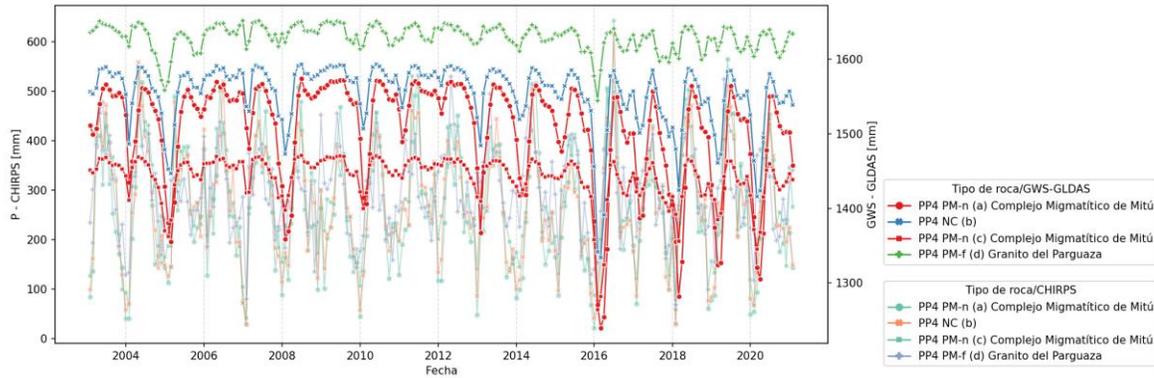


Figura 3-114. Coeficientes de correlación rezagada entre las series de tiempo de GWS-GLDAS y P-CHIRPS para los puntos evaluados.

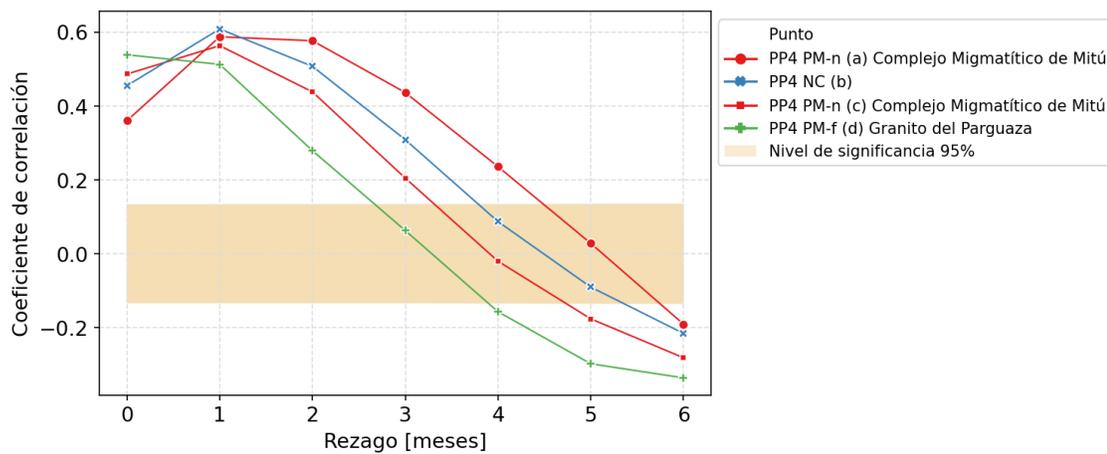


Figura 3-115. Ciclo anual de GWS-GLDAS [mm] y P-CHIRPS [mm] para los puntos evaluados. Las líneas de fondo con transparencia representan la variable P-CHIRPS.

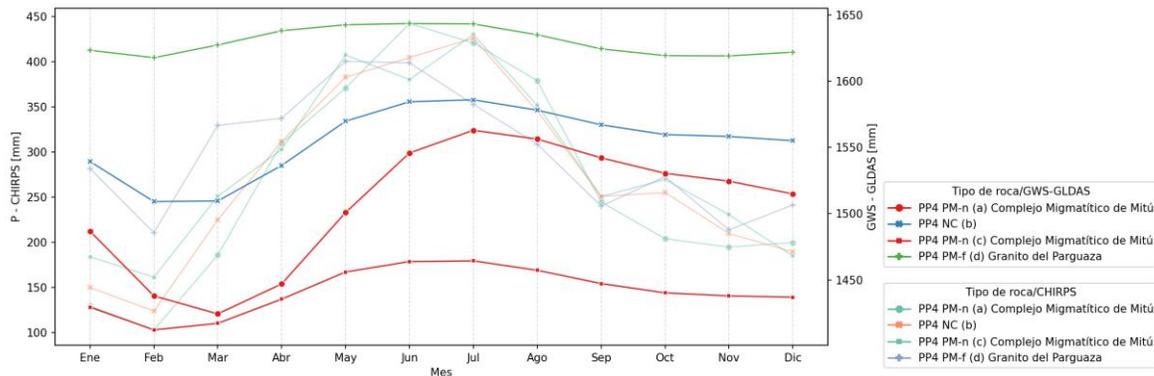
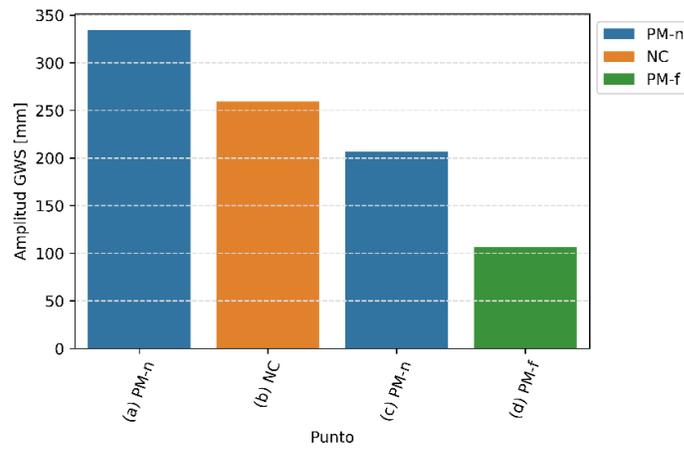


Figura 3-116. Amplitud de la serie de tiempo GWS-GLDAS [mm] para los puntos evaluados.



4. Análisis de resultados

El propósito de esta tesis es realizar una zonificación hidrogeológica de Colombia que incluya las áreas dominadas por rocas cristalinas (ígneas plutónicas y metamórficas) y volcánicas, con base en información existente y para dar continuidad al trabajo adelantado por el IDEAM en los últimos tres (3) Estudios Nacionales del Agua (IDEAM, 2010, 2015a, 2019) y en la Zonificación y Codificación de Unidades Hidrogeológicas de Colombia (IDEAM, 2013b), para lo cual se modifica la zonificación hidrogeológica propuesta por esta entidad. Lo anterior partiendo de la idea de que los estudios hidrogeológicos no deberían estar orientados solo a suministro de agua subterránea, enfocándose en las rocas sedimentarias y depósitos no consolidados, sino que es necesario reconocer que el agua subterránea tiene un papel fundamental en otros aspectos como la interacción con las aguas superficiales y los ecosistemas, además de la presencia de zonas de recarga, escenarios en los que las rocas ígneas y metamórficas tienen incidencia.

El principal ajuste a las provincias hidrogeológicas definidas por el IDEAM (2010), en la zonificación hidrogeológica propuesta en este estudio, se dio aplicando los principios de integridad, parentesco y herencia establecidos explícitamente en la zonificación hidrogeológica de Francia (Brugeron et al., 2018; Petit et al., 2003), pero también aplicados en los demás casos revisados. De esta manera, para cumplir con el principio de integridad que asegura que todo el territorio nacional esté incluido en la zonificación, las áreas constituidas por rocas ígneas y metamórficas denominadas “basamento” en IDEAM (2010) fueron clasificadas como provincias hidrogeológicas continuando la numeración y codificación de IDEAM (2013b) y caracterizadas de igual manera que las provincias en rocas sedimentarias y depósitos cuaternarios.

Aunque la geología usada no cuenta con el nivel de detalle suficiente para discretizar el potencial hidrogeológico de rocas ígneas y metamórficas, estas zonas fueron definidas como nuevas provincias y además de considerar el principio de herencia, el análisis de la anomalía de almacenamiento de agua subterránea somera (GWS-GLDAS) evidencia que las rocas cristalinas y volcánicas también tienen cambios importantes en esta variable,

evidenciando que es igualmente necesario prestar atención a estas rocas en el estudio del recurso hídrico subterráneo.

De acuerdo con los principios de parentesco y herencia, los sistemas acuíferos definidos como el nivel de menor jerarquía en la zonificación hidrogeológica de Colombia en 2013 (IDEAM, 2013b) deben estar contenidos en la unidad de siguiente jerarquía que corresponde a las provincias hidrogeológicas, además de heredar los límites con niveles intermedios y de mayor jerarquía. Siguiendo estos principios, las provincias “Cesar Ranchería”, “Guajira”, “Sinú San Jacinto”, “Urabá” y “Valle Bajo del Magdalena” de IDEAM (2010) se agrupan en una sola provincia denominada en este trabajo “Costera-Atlántico”, debido a que los sistemas acuíferos en estas zonas se ubicaban en dos (2) o tres (3) provincias. Igualmente se agruparon en la provincia denominada acá “Costera-Pacífico” las provincias “Chocó” y “Tumaco” de IDEAM (2010).

Se refinó también la delimitación entre la provincia “Cauca-Patía” y la cordillera Central, para que el sistema acuífero “Glacís del Quindío” estuviera contenido en la provincia “Cordilleras Central y Occidental”. Sin embargo y como se ha descrito en numerales anteriores, estos principios no se aplicaron con los sistemas acuíferos “Bajo Magdalena”, “Cesar” y “Valles aluviales y terrazas de grandes ríos” (este último en la cuenca del río Amazonas) por considerar necesario revisar información más detallada para establecer los límites tanto de los sistemas acuíferos como de las provincias hidrogeológicas.

Los límites de los sistemas acuíferos se consideraron con base en las unidades cronoestratigráficas a las que se asocian en el AGC 2020 (1:500.000), que fue la geología base usada en esta propuesta y puesto que la mayoría de los sistemas acuíferos cuenta con un nivel de conocimiento bajo (IDEAM, 2015a).

Adicionalmente se consideró actualizar los límites de algunas de las provincias hidrogeológicas del IDEAM (2010) ya que estas corresponden a cuencas sedimentarias delimitadas con base en geología del petróleo, cuyo interés radica en profundidades mayores a unos 200 m, mientras que hidrogeológicamente, en especial para apoyar los procesos de planificación y la toma de decisiones en el ordenamiento territorial, el interés está en los primeros cientos de metros. Se actualizó el límite entre las provincias Llanos Orientales y las dos (2) provincias en la zona del Amazonas (Caguán-Putumayo, Vaupés-Amazonas) por la divisoria de aguas de las cuencas Orinoco y Amazonas. Se conservó el límite establecido por un alto estructural entre las provincias “Caguán-Putumayo” y “Vaupés-Amazonas”, dado que hacia el centro y norte pudo asociarse a límites estratigráficos entre diferentes formaciones sedimentarias y metasedimentos. Como se ha sugerido en capítulos anteriores estas dos (2) provincias podrían agruparse en una sola revisando información más detallada.

Además de aplicar los principios mencionados, también se ajustaron límites de provincias hidrogeológicas que no estaban asociados a fallas o a altos estructurales. Dichos límites

se trazaron considerando las unidades cronoestratigráficas del AGC 2020 y divisorias de áreas o zonas hidrográficas. Asimismo, en las provincias que no tuvieron cambios en su delimitación, se actualizaron los límites con las unidades cronoestratigráficas y fallas del AGC 2020.

Con el planteamiento de este trabajo se pretendía que a partir de la información geológica existente podría caracterizarse el potencial hidrogeológico en rocas cristalinas y volcánicas para ser considerado en la zonificación propuesta. Después de revisar literatura especializada, se concluye que para lograr tal premisa es necesario contar con descripciones del perfil de meteorización o grado de fracturamiento en el caso de las rocas cristalinas y con datos precisos sobre la textura y evolución de las rocas volcánicas. Con la geología usada a escala 1:500.000 no se tienen estos niveles de detalle, por lo que este objetivo se abordó desde la definición de grupos hidrolitológicos para rocas ígneas félsicas y neísicas, por tener mayor potencial para desarrollar suelos arenosos y poder compararlos con otros grupos hidrolitológicos en la evaluación de la anomalía de almacenamiento de agua subterránea (GWS-GLDAS). Se evaluó la posibilidad de usar geología más detallada a escala 1:100.000, pero dicha cartografía es heterogénea, las descripciones en este sentido son también limitadas y no están presentes en todas las planchas, además de la inexistencia de mapas geológicos oficiales (1:100.000) para gran parte del oriente del país.

De acuerdo con los resultados del capítulo 3 de este trabajo, se infiere que la respuesta de la variable GWS-GLDAS está relacionada con los diferentes materiales geológicos, de manera que fue posible establecer un nuevo nivel en la zonificación hidrogeológica, denominado “región hidrogeológica”, con base en esta variable y en las variaciones en los tipos de rocas.

Por la gruesa resolución de los datos de la misión GRACE, para asociar los valores de la malla de GWS-GDLAS con la geología, se establecieron “grupos hidrolitológicos” agrupando unidades cronoestratigráficas del AGC 2020 conformadas con rocas similares en cuanto a la capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea. Además, la distribución espacial de los grupos hidrolitológicos permite visualizar como están conformadas las provincias, la homogeneidad o heterogeneidad geológica que las caracteriza.

Después de evaluar el uso de los indicadores de densidad de drenajes y densidad de lineamientos, estas variables fueron descartadas, pero en futuros ejercicios a escalas de trabajo más detalladas pueden ser aportes importantes.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

La propuesta metodológica para la zonificación hidrogeológica consistió en refinar las provincias hidrogeológicas del IDEAM (2010) y proponer una división en regiones hidrogeológicas con base en la información existente revisada, que consistió principalmente en el Atlas Geológico de Colombia a escala 1:500.000 versión 2020 y a la anomalía de almacenamiento de agua subterránea del modelo GLDAS (asimilación de datos de la misión GRACE).

A partir de la documentación y análisis de metodologías usadas en otros países para la zonificación hidrogeológica regional, se tomaron solo planteamientos generales y comunes en las experiencias revisadas, debido a que en los países consultados (Francia, Brasil, Italia, India, Canadá, Polonia, Nigeria y República Checa) se cuenta con información primaria como redes de monitoreo y caracterización hidráulica. De acuerdo con esto se tomó como punto de partida un marco geológico/estructural regional (IGRAC, Italia, Canadá, Nigeria, República Checa) dado por la delimitación de provincias hidrogeológicas del IDEAM (2010). Similar a la inclusión de excedentes o déficits de humedad en Canadá, en este caso se usan anomalías de almacenamiento de agua subterránea de la misión GRACE asimiladas en GLDAS v2.2 (GWS-GLDAS). Para el análisis de la variable GWS-GLDAS se definieron agrupaciones de tipos de rocas con formas semejantes de almacenar y transmitir agua subterránea (IGRAC, Francia, Brasil, Italia, India). Se acogieron los principios de integridad, parentesco y herencia definidos en Francia, para asegurar una zonificación continua en todo el territorio incluyendo formaciones acuíferas y no acuíferas.

Partiendo de las provincias hidrogeológicas de IDEAM (2010) se toma como referencia inicial un marco geológico/estructural regional como en la mayoría de las metodologías documentadas de otras regiones. Se refinaron los límites de dichas provincias usando como información base las unidades cronoestratigráficas y las fallas el AGC 2020 y acogiendo los principios de **integridad, parentesco y herencia** declarados explícitamente en Francia, pero considerados en todas las propuestas de zonificación hidrogeológica revisadas.

El potencial hidrogeológico en rocas cristalinas y volcánicas puede caracterizarse con base en información existente a partir de descripciones del perfil de meteorización o grado de

fracturamiento para las rocas cristalinas y datos precisos sobre la textura y evolución de las rocas volcánicas. Las unidades cronoestratigráficas del AGC 2020 que fue la información geológica base usada no cuentan con estas descripciones por lo que no fue posible caracterizar estos tipos de roca de acuerdo con su potencial hidrogeológico. De acuerdo con los patrones de meteorización, las rocas ígneas félsicas y neísicas poseen mayor potencial para desarrollar suelos arenosos y esto se consideró en el momento de definir los grupos hidrolitológicos usados para el análisis de la variable GWS-GLDAS.

Como complemento a la información geológica base se evaluó el uso de sensores remotos, se consultó información sobre el espesor de suelo a partir de imágenes satelitales y modelos de elevación digital; la densidad de fracturamiento y de drenajes usando modelos digitales de terreno y cambios en el almacenamiento de agua subterránea. Esta última variable fue la única que se usó, debido a que las primeras requieren procesamientos no contemplados en el alcance este trabajo.

Para determinar las regiones hidrogeológicas se tuvo en cuenta el uso de la variable GWS-GLDAS asociada a grupos hidrolitológicos. La inclusión de las rocas cristalinas y volcánicas se hizo nombrando las áreas de basamento de IDEAM (2010) como provincias hidrogeológicas nuevas, además de la evaluación de la variable GWS-GLDAS que mostró que en estos tipos de rocas también hay cambios en el almacenamiento de agua subterránea somera.

Respecto a la anomalía en el almacenamiento de agua subterránea obtenida de la asimilación de datos de la misión GRACE en el modelo GLDAS versión 2.2, esta se considera un valioso aporte para estudios hidrogeológicos especialmente en zonas con información escasa como es el caso de Colombia, aunque limitado por la gruesa resolución.

El principal aporte de esta propuesta al conocimiento hidrogeológico del país es incluir las rocas cristalinas y volcánicas en la zonificación hidrogeológica propuesta, además de basarse en aspectos geológicos e hidrológicos asociados a la anomalía de almacenamiento de agua subterránea (GWS-GLDAS). Con los resultados de la evaluación de la variable GWS-GLDAS se evidencia que las rocas ígneas y metamórficas no son ajenas a variaciones del agua subterránea y a respuesta a cambios en la precipitación.

Los productos de sensores remotos se han usado como indicadores de la presencia de agua subterránea, recientemente la misión GRACE ofrece la oportunidad de tener una variable directamente relacionada con el almacenamiento de agua en el subsuelo. Los valores de anomalía de almacenamiento de agua subterránea (GWS) del modelo GLDAS v2.2 en zonas asociadas a rocas cristalinas muestran cambios en el almacenamiento de agua, incluso con magnitudes parecidas a zonas con predominio de rocas sedimentarias como en el norte de la cordillera Central y el escudo de Guyana donde los valores de GWS-GLDAS en neises y rocas plutónicas félsicas son similares a valores asociados a rocas

sedimentarias en la cordillera Oriental o a rocas sedimentarias cenozoicas de la provincia Costera-Atlántico. En la provincia Serranía de Baudó se presentan diferencias claras en la magnitud de GWS-GLDAS, mayor en grupo hidrolítico vulcano-sedimentario que volcánico. En la Sierra Nevada de Santa Marta los valores en rocas plutónicas félsicas son mayores que en rocas volcánicas.

Con base en los resultados de la evaluación de la variable GWS-GLDAS se definieron regiones hidrogeológicas al interior de las provincias Costera - Atlántico, Costera - Pacífico, Serranía de Baudó, Alto Magdalena, Cauca-Patía y Llanos Orientales. La mayoría de las provincias conformadas por rocas cristalinas, a excepción de las cordilleras Central y Occidental, muestran cierta homogeneidad geológica y con la gruesa resolución de los datos de GWS-GLDAS v2.2 no es posible sugerir la delimitación de regiones. En algunas provincias, como en las cordilleras Central y Occidental se sugiere, para un trabajo futuro, revisar información geológica más detallada o estudios hidrogeológicos si es el caso, para refinar la delimitación o proponer regiones hidrogeológicas asegurando que se cumplan los principios de herencia y parentesco entre los diferentes niveles. Así mismo, a medida que se publique más información sobre los sistemas acuíferos o se definan nuevos cuerpos, sería necesario reevaluar los límites propuestos. La definición de las provincias, regiones y otras unidades que puedan ser establecidas en un trabajo futuro es un proceso repetitivo que debe actualizarse a medida que se cuente con nuevo conocimiento.

Al revisar la zonificación hidrogeológica en otros países, queda evidenciado el bajo nivel de conocimiento del agua subterránea en Colombia, que es un recurso inexplorado en la mayor parte del territorio y se ha desconocido el papel del agua subterránea en rocas con porosidad secundaria y en contextos distintos a suministro. En países tropicales de África y Asia se han caracterizado acuíferos en rocas cristalinas y son ampliamente explotados, en Colombia no debe darse por hecho el potencial limitado en estas rocas, además de reconocer su importancia en aspectos diferentes al aprovechamiento y entender su relación con el medio.

En Colombia, por las condiciones climáticas tropicales, el desarrollo de perfiles de meteorización es significativo, dando importancia al estudio de agua subterránea en rocas cristalinas con enfoque en el tipo y espesor de saprolito que pueden desarrollar, considerando además los diferentes tipos de rocas cristalinas ya que los productos de meteorización en sus distintas etapas dependen de la composición de la roca madre.

5.2 Recomendaciones

A la escala de este trabajo (1:500.000) se pueden incluir en un trabajo futuro de refinación y reevaluación otras variables que fueron revisadas, pero no incluidas en esta propuesta, relacionadas con las formas del terreno y los suelos, como la cartografía geomorfológica y geopedológica del IGAC, las unidades morfotectónicas del IDEAM e indicadores de la presencia de agua subterránea como la densidad de lineamientos, drenajes, patrones de

drenajes y otras variables usadas en la literatura, que en el caso del potencial hidrogeológico de rocas cristalinas y volcánicas pueden ser igual o más significativas que la geología.

Como trabajo futuro, complementario y de constante reevaluación se puede hacer una revisión de geología más detallada, ya sea publicada por el SGC o generada en diferentes proyectos, que contenga descripciones de perfiles de meteorización (saprolito y roca meteorizada), grado de fracturamiento y demás características que permitan caracterizar el potencial hidrogeológico de las rocas cristalinas y volcánicas. Igualmente debe considerarse la integración de otros factores importantes como la geomorfología, los suelos y las coberturas vegetales, de manera que puedan establecerse otros niveles jerárquicos de análisis y refinar los propuestos, pues la zonificación hidrogeológica es un proceso repetitivo que debe actualizarse a medida que se tengan nuevos conocimientos.

Como afirman Rodell & Famiglietti (2002), con la misión GRACE inició una nueva era para el monitoreo de almacenamiento de agua vía sensores remotos. La asimilación de los datos de la misión GRACE en el modelo GLDAS versión 2.2 facilita enormemente la obtención del componente de almacenamiento de agua subterránea a una resolución espacial y temporal más detallada. Con el propósito de validar los datos de la variable GWS-GLDAS para Colombia, puede realizarse un análisis de correlación entre niveles piezométricos medidos *in situ* y la anomalía de almacenamiento de agua subterránea somera (GWS-GLDAS) en zonas distribuidas a lo largo del país, a su vez estos resultados podrían ser usados para aplicar técnicas de *downscaling* y obtener datos de mayor detalle. Esta variable es una fuente de información valiosa que merece un análisis detallado y es especialmente útil en zonas con información escasa.

Con el fin de discretizar el potencial hidrogeológico de rocas cristalinas es necesario contar con estudios específicos en los que se caracterice el perfil de meteorización, grado de fracturamiento y detalles de la génesis, texturas y estructuras de las rocas volcánicas.

Para definir nuevas regiones hidrogeológicas y/o reevaluar las provincias hidrogeológicas acá propuestas se pueden llevar a cabo estudios específicos en las provincias, incluyendo el uso de varios productos de sensores remotos o técnicas más precisas como hidrogeoquímica, isotopía, balances hídricos, modelos de flujo, entre otros.

Es necesario aunar esfuerzos para consolidar redes de monitoreo hidrogeológico eficientes e integradas que permitan aportar a análisis más detallados y/o validaciones de los estudios como el desarrollado.

Anexo A: cartografía editable

El Anexo A contiene la cartografía editable de las capas temáticas generadas (provincias hidrogeológicas propuestas, regiones hidrogeológicas propuestas y grupos hidrolitológicos) en formato shapefile:

<https://drive.google.com/file/d/1BUDfZZMv1uQaA9wfV-cbc3dCeVFm0C2W/view?usp=sharing>

Bibliografía

- Abdelmohsen, K., Sultan, M., Ahmed, M., Save, H., Elkaliouby, B., Emil, M., Yan, E., Abotalib, A. Z., Krishnamurthy, R. V., & Abdelmalik, K. (2019). Response of deep aquifers to climate variability. *Science of the Total Environment*, 677, 530–544. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.316>
- Abdullah, A., Akhir, J. ., & Abdullah, I. (2010). Automatic Mapping of Lineaments Using Shaded Relief Images Derived from Digital Elevation Model (DEMs) in the Maran – Sungai Lembing Area, Malaysia. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 949–957.
- Ahmadi, H., & Pekkan, E. (2021). Fault-Based Geological Lineaments Extraction Using Remote Sensing and GIS—A Review. *Geosciences*, 11(5), 1–31. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES11050183>
- Ahmed, M., & Abdelmohsen, K. (2018). Quantifying Modern Recharge and Depletion Rates of the Nubian Aquifer in Egypt. *Surveys in Geophysics*, 39(4), 729–751. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9465-3>
- Alimi, J. (n.d.). *Groundwater Resources and Management in Nigeria*.
- ARSET. (n.d.). *Sinopsis del Satélite GRACE y Sus Datos y Aplicaciones. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET)*.
- Awange, J. L., Gebremichael, M., Forootan, E., Wakbulcho, G., Anyah, R., Ferreira, V. G., & Alemayehu, T. (2014). Characterization of Ethiopian mega hydrogeological regimes using GRACE, TRMM and GLDAS datasets. *Advances in Water Resources*, 74, 64–78. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.07.012>
- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. ., & Martínez, J. . (2007). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. In *Agencia Nacional de Hidrocarburos - A.N.H.- (Issues 978-958-98237-0-5)*. <https://doi.org/ISBN: 978-958-98237-0-5>
- Belle, P., Lachassagne, P., Mathieu, F., Barbet, C., Brisset, N., & Gourry, J.-C. (2019). Characterization and location of the laminated layer within hard rock weathering profiles from electrical resistivity tomography: implications for water well siting. *Geological Society, London, Special Publications*, 479(1), 187–205. <https://doi.org/10.1144/SP479.7>
- Betancur, T., García, D. A., Vélez, A. J., Gómez, A. M., Flórez, C., Patiño, J., & Ortíz, J. A. (2017). Aguas subterráneas , humedales y servicios ecosistémicos en Colombia. *Biota Colombiana*, 18(1), 1–27. <https://doi.org/10.21068/c2017.v18n01a1>
- Bolaños, S., Salazar, J. F., Betancur, T., & Werner, M. (2021). GRACE reveals depletion of water storage in northwestern South America between ENSO extremes. *Journal of Hydrology*, 596, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125687>
- Brugeron, A., Paroissien, J. B., & Tillier, L. (2018). *Référentiel hydrogéologique BDLISA version 2 : Principes de construction et évolutions* (p. 69).
- Central Ground Water Board - CGWB. (2012). *Aquifer Systems of India*.

- Chilton, P. J., & Foster, S. (1995). Hydrogeological Characterisation and Water-Supply Potential of Basement Aquifers in Tropical Africa. *Hydrogeology Journal*, 3(1), 36–49. <https://doi.org/10.1007/s100400050061>
- Chowdhury, A., Jha, M. K., & Chowdary, V. M. (2010). Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. *Environmental Earth Sciences*, 59(6), 1209–1222. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0110-9>
- Cross, A. M. (1988). Detection of circular geological features using the Hough transform. *International Journal of Remote Sensing*, 9(9), 1519–1528. <https://doi.org/10.1080/01431168808954956>
- Custodio, E. (2003). Hydrogeological similarities and differences between volcanic and hard rocks. *International Conference on Groundwater in Fractured Rocks*, 5.
- Das, B., & Singh, S. K. (2016). Ground water potential zone mapping of semi-arid region of Kalaburgi and Yadgir districts of North Karnataka: A geospatial analysis approach. *International Journal of Current Research*, 8(3), 28797–28807.
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J. C., & Krishnamurthy, N. S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, 330(1–2), 260–284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026>
- Díaz-Alcaide, S., & Martínez-Santos, P. (2019). Review: Advances in groundwater potential mapping. *Hydrogeology Journal*, 27(7), 2307–2324. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02001-3>
- DNP. (1983). *Mapa Hidrogeológico General de Colombia Escala 1:500.000*.
- El-Naqa, A., Hammouri, N., Ibrahim, K., & El-Taj, M. (2009). Integrated Approach for Groundwater Exploration in Wadi Araba Using Remote Sensing and GIS. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 3(3), 229–243.
- Fenta, M. C., Anteneh, Z. L., Szanyi, J., Walker, D., Walker, D., & Walker, D. (2020). Hydrogeological framework of the volcanic aquifers and groundwater quality in Dangila Town and the surrounding area, Northwest Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development*, 11. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2020.100408>
- Foster, S. (1984). African groundwater development - the challenges for hydrogeological science. *Challenges in African Hydrology and Water Resources*, December, 3–12.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Protección de la Calidad del Agua Subterránea - Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Banco Mundial.
- Frappart, F., & Ramillien, G. (2018). Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. *Remote Sensing*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/rs10060829>
- Freeze, R. ., & Cherry, J. . (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gilbrich, W., & Struckmeier, W. (2014). *50 Years of Hydro(geo)logical Mapping Activities*.
- Gómez, J. (2022). *La geología como condicionante del paisaje - YouTube*. Sociedad Geográfica de Colombia. https://www.youtube.com/watch?v=a4_ZI-iBHx8
- Gómez, J., Montes, N. ., & Compiladores. (2020). *Atlas Geológico de Colombia 2020 - Escala 1:500.000*. Servicio Geológico Colombiano.
- Gómez, L. A. (2017). *Dinámica espacio temporal del almacenamiento de agua en el suelo en el Norte de Suramérica*. Universidad Nacional de Colombia.

- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.
- Guarín, G., & Poveda, G. (2013). Variabilidad Espacial Y Temporal Del Almacenamiento De Agua En El Suelo En Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(142), 89–113.
- Guihéneuf, N., Boisson, A., Bour, O., Dewandel, B., Perrin, J., Dausse, A., Viossanges, M., Chandra, S., Ahmed, S., & Maréchal, J. C. (2014). Groundwater flows in weathered crystalline rocks: Impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity. *Journal of Hydrology*, 511, 320–324.
- Gun, J., Vasak, S., & Reckman, J. (2008). Scale-dependent hydrogeological zoning for effective communication and efficient information management on groundwater. *33rd International Geological Congress*.
- Henry, C. M., Allen, D. M., & Huang, J. (2011). Groundwater storage variability and annual recharge using well-hydrograph and GRACE satellite data. *Hydrogeology Journal*, 19(4), 741–755. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0724-3>
- Herbich, P., Woźnicka, M., & Witczak, S. (2010). Hydrogeological cartography as a tool supporting water management, spatial planning and environmental protection. *Przegląd Geologiczny*, 58(9 PART 1), 746–753.
- Herms, I., & Arnó, G. (2016). *Cartografía Hidrogeológica*.
- Hoyos, F. (2012). *GEOTECNIA diccionario básico*.
- Huat, B. B. ., Toll, D. ., & Prasad, A. (Eds. . (2012). *Handbook of Tropical Residual Soils Engineering*. CRC Press.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional de Agua 2010*.
- IDEAM. (2013a). *Aguas Subterráneas en Colombia Una Visión General*.
- IDEAM. (2013b). *Zonificación y Codificación de Unidades Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia*.
- IDEAM. (2015a). *Estudio Nacional del Agua 2014*. IDEAM.
- IDEAM. (2015b). *Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas - Contenidos del Taller de Formación* (p. 180).
- IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. IDEAM.
- IGAC. (1997). *Mapa Regiones Naturales de Colombia. Escala 1:5.000.000*.
- INGEOMINAS. (1977). *Mapa Hidrogeológico de Colombia Escala 1:3.000.000*.
- INGEOMINAS. (1987). *Memoria del Mapa Hidrogeológico de Colombia Edición 1987*.
- INGEOMINAS. (2004a). *Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia a escala 1:500.000*.
- INGEOMINAS. (2004b). *Programa de exploración de aguas subterráneas – PEXAS*.
- INGEOMINAS. (2011). *Mapa litoestratigráfico con permeabilidades de Colombia escala 1:500.000*.
- ISPRA. (2018). *Carta Idrogeologica D'Italia – 1:50.000* (p. 71).
- Joshi, A. K. (1989). Automatic detection of lineaments from Landsat data. *Digest - International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1, 85–88. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1989.567160>
- Koike, K., Nagano, S., & Ohmi, M. (1995). Lineament analysis of satellite images using a Segment Tracing Algorithm (STA). *Computers & Geosciences*, 21(9), 1091–1104. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)00042-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)00042-7)
- Krishnamurthy, J., Venkatesa Kumar, N., Jayaraman, V., & Manivel, M. (1996). An approach to demarcate ground water potential zones through remote sensing and a geographical information system. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10), 1867–1884. <https://doi.org/10.1080/01431169608948744>
- Kumar, P. K. D., Gopinath, G., & Seralathan, P. (2007). Application of remote sensing and

- GIS for the demarcation of groundwater potential zones of a river basin in Kerala, southwest coast of India. *International Journal of Remote Sensing*, 28(24), 5583–5601. <https://doi.org/10.1080/01431160601086050>
- Kuriakose, S. L., Devkota, S., Rossiter, D. G., & Jetten, V. G. (2009). Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the Western Ghats of Kerala, India. *CATENA*, 79(1), 27–38. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2009.05.005>
- Lachassagne, P. (2008). Overview of the hydrogeology of hard rock aquifers: Applications for their survey, management, modelling and protection. In *Groundwater Dynamics in Hard Rock Aquifers: Sustainable Management and Optimal Monitoring Network Design* (pp. 40–63). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6540-8_3
- Lachassagne, P., Aunay, B., Frissant, N., Guilbert, M., & Malard, A. (2014). High-resolution conceptual hydrogeological model of complex basaltic volcanic islands: a Mayotte, Comoros, case study. *Terra Nova*, 26(4), 15 p. <https://doi.org/10.1111/TER.12102>
- Lachassagne, P., Dewandel, B., & Wyns, R. (2014a). Hydrogeology of Hard Rock Aquifers. In S. Eslamian (Ed.), *Handbook of Engineering Hydrology* (pp. 297–326). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15625-18>
- Lachassagne, P., Dewandel, B., & Wyns, R. (2014b). The conceptual model of weathered hard rock aquifers and its practical applications. In J. M. Sharp (Ed.), *Fractured Rock Hydrogeology* (IAH Select, Vol. 20, pp. 35–68). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17016-7>
- Lachassagne, P., Dewandel, B., & Wyns, R. (2021). Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers—guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. *Hydrogeology Journal* 2021, 1–34. <https://doi.org/10.1007/S10040-021-02339-7>
- Lachassagne, P., Wyns, R., Bérard, P., Bruel, T., Chéry, L., Coutand, T., Desprats, J. F., & Le Strat, P. (2001). Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers: Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *Ground Water*, 39(4), 568–581. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2001.tb02345.x>
- Lachassagne, P., Wyns, R., & Dewandel, B. (2011). The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova*, 23(3), 145–161. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x>
- Landerer, F. W., & Swenson, S. C. (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resources Research*, 48(4), 4531. <https://doi.org/10.1029/2011WR011453>
- Li, B., Rodell, M., Kumar, S., Beaudoin, H. K., Getirana, A., Zaitchik, B. F., de Goncalves, L. G., Cossetin, C., Bhanja, S., Mukherjee, A., Tian, S., Tangdamrongsub, N., Long, D., Nanteza, J., Lee, J., Policelli, F., Goni, I. B., Daira, D., Bila, M., ... Bettadpur, S. (2019). Global GRACE Data Assimilation for Groundwater and Drought Monitoring: Advances and Challenges. *Water Resources Research*, 55(9), 7564–7586. <https://doi.org/10.1029/2018WR024618>
- MacDonald, A. ., & Davies, J. (2000). *A brief review of groundwater for rural water supply in sub-Saharan Africa - BGS Technical Report WC/00/33*.
- Maréchal, J. C., Dewandel, B., & Subrahmanyam, K. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research*, 40(11).

- <https://doi.org/10.1029/2004WR003137>
- Maréchal, J. C., Selles, A., Dewandel, B., Boisson, A., Perrin, J., & Ahmed, S. (2018). An observatory of groundwater in crystalline rock aquifers exposed to a changing environment: Hyderabad, India. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1–14. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0076>
- Margat, J., & Gun, J. (2013). *Groundwater around the World* (CRC Press (ed.)). <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b13977>
- Marghany, M., & Hashim, M. (2010). Lineament mapping using multispectral remote sensing satellite data. *Research Journal of Applied Sciences*, 5(2), 126–130. <https://doi.org/10.3923/RJASCI.2010.126.130>
- Masoud, A., & Koike, K. (2017). Applicability of computer-aided comprehensive tool (LINDA: LINEament Detection and Analysis) and shaded digital elevation model for characterizing and interpreting morphotectonic features from lineaments. *Computers & Geosciences*, 106, 89–100. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2017.06.006>
- Maxey, G. B. (1964). Hydrostratigraphic units. *Journal of Hydrology*, 2(2), 124–129. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(64\)90023-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(64)90023-X)
- Mehta, A. (n.d.). *Satélites, sensores y modelos de sistemas terrestres de la NASA usados para la gestión de recursos hídricos - NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET)*.
- Mehta, A., Podest, E., & McCartney, S. (2020). *Groundwater Monitoring using Observations from NASA's Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Missions - NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET)*.
- Meijerink, A. M. J. (1996). Remote sensing applications to hydrology: groundwater. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4), 549–561. <https://doi.org/10.1080/02626669609491525>
- Meijerink, A. M. J., Bannert, D., Batelaan, O., Lubczynski, M. ., & Pointet, T. (2007). *Remote Sensing Applications to Groundwater. IHP-VI, Series on Groundwater No. 16* (UNESCO (ed.)).
- Mohamed, A. (2019). Hydro-geophysical study of the groundwater storage variations over the Libyan area and its connection to the Dakhla basin in Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 157(December 2018), 103508. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.05.016>
- Mohamed, A., Sultan, M., Ahmed, M., Yan, E., & Ahmed, E. (2017). Aquifer recharge, depletion, and connectivity: Inferences from GRACE, land surface models, and geochemical and geophysical data. *Bulletin of the Geological Society of America*, 129(5–6), 534–546. <https://doi.org/10.1130/B31460.1>
- Monreal, R., Rangel, M., Grijalva, A., Minjarez, I., & Morales, M. (2011). Metodología para la definición de unidades hidroestratigráficas: Caso del acuífero del valle del río Yaqui, Sonora, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 119–135. <https://doi.org/10.18268/bsgm2011v63n1a10>
- Nag, S. K., & Chowdhury, P. (2019). Decipherment of potential zones for groundwater occurrence: a study in Khatra Block, Bankura District, West Bengal, using geospatial techniques. *Environmental Earth Sciences*, 78(2), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S12665-018-8034-X>
- Oliveira, J., Brito, A., De Carlo, R., & Feijó, T. (2014). *Manual de Cartografia Hidrogeológica* (Serviço Geológico de Brasil - CPRM (ed.)).
- Ospina, D. L., & Vargas, C. A. (2018). Monitoring runoff coefficients and groundwater levels using data from GRACE, GLDAS, and hydrometeorological stations: analysis of a Colombian foreland basin. *Hydrogeology Journal*, 26(8), 2769–2779.

- <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1824-0>
- Pantaleone, D. V., Vincenzo, A., Fulvio, C., Silvia, F., Cesaria, M., Giuseppina, M., Ilaria, M., Vincenzo, P., Rosa, S. A., Gianpietro, S., Giuseppe, T., & Pietro, C. (2018). Hydrogeology of continental southern Italy. *Journal of Maps*, 14(2), 230–241. <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1454352>
- Petit, V., Hanot, F., & Pointet, T. (2003). *Référentiel hydrogéologique BD RHF. Guide méthodologique de découpage des entités. BRGM/RP-52261-FR* (p. 101). <https://doi.org/PNR61>
- Portal, A., Belle, P., Mathieu, F., Lachassagne, P., & Brisset, N. (2017). Identification and characterization of hard rocks weathering profile by electrical resistivity imaging. *23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201702054>
- Prasad, R. K., Mondal, N. C., Banerjee, P., Nandakumar, M. V., & Singh, V. S. (2008). Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental Geology*, 55(3), 467–475. <https://doi.org/10.1007/S00254-007-0992-3/FIGURES/9>
- Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahdavi, M., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 7059–7071. <https://doi.org/10.1007/S12517-014-1668-4/FIGURES/5>
- Rahnama, M., & Gloaguen, R. (2014). TecLines: A MATLAB-Based Toolbox for Tectonic Lineament Analysis from Satellite Images and DEMs, Part 1: Line Segment Detection and Extraction. *Remote Sensing 2014, Vol. 6, Pages 5938-5958*, 6(7), 5938–5958. <https://doi.org/10.3390/RS6075938>
- Ramírez, T. . (2016). *Análisis de la problemática Socioambiental generada por la Construcción de Túneles Viales en Colombia: Caso de estudio Túnel de Occidente*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ramli, M. F., Yusof, N., Yusoff, M. K., Juahir, H., & Shafri, H. Z. M. (2010). Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: A review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(2), 215–233. <https://doi.org/10.1007/S10064-009-0255-5>
- Razandi, Y., Pourghasemi, H. R., Neisani, N. S., & Rahmati, O. (2015). Application of analytical hierarchy process, frequency ratio, and certainty factor models for groundwater potential mapping using GIS. *Earth Science Informatics*, 8(4), 867–883. <https://doi.org/10.1007/S12145-015-0220-8/FIGURES/5>
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M.-H., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., Swenson, S., & Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, 51(7), 5217–5238. <https://doi.org/10.1002/2015WR017349>
- Richts, A., Struckmeier, W. F., & Zaepke, M. (2011). WHYMAP and the Groundwater Resources Map of the World 1:25,000,000. In *Sustaining Groundwater Resources* (pp. 159–173). <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3426-7>
- Rodell, M., Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J. S., Nigro, J., & Wilson, C. R. (2007). Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal*, 15(1), 159–166. <https://doi.org/10.1007/S10040-006-0103-7/FIGURES/5>
- Rodell, M., & Famiglietti, J. S. (1999). Detectability of variations in continental water storage from satellite observations of the time dependent gravity field. *Water Resources Research*, 35(9), 2705–2723. <https://doi.org/10.1029/1999WR900141>
- Rodell, M., & Famiglietti, J. S. (2002). The potential for satellite-based monitoring of

- groundwater storage changes using GRACE: the High Plains aquifer, Central US. *Journal of Hydrology*, 263(1–4), 245–256. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00060-4)
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D., & Toll, D. (2004). The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- Rui, H., & Beaudoin, H. (2021). *README Document for NASA GLDAS Version 2 Data Products*. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). NASA.
- Scanlon, B. R., Longuevergne, L., & Long, D. (2012). Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. *Water Resources Research*, 48(4), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2011WR011312>
- SGC. (2020). *Atlas Geológico de Colombia 2020*. https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/agc_500K2020.aspx
- Shafique, M., van der Meijde, M., & Rossiter, D. G. (2011). Geophysical and remote sensing-based approach to model regolith thickness in a data-sparse environment. *CATENA*, 87(1), 11–19. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2011.04.004>
- Shafique, M., van der Meijde, M., & Ullah, S. (2011). Regolith modeling and its relation to earthquake induced building damage: A remote sensing approach. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(1–2), 65–75. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2011.04.004>
- Sharpe, D., Russell, H., Dyke, L., Grasby, S., Gleeson, T., Michaud, Y., Savard, M., Mei, M., & Wozniak, P. (2010). *Hydrogeological regions of Canada - Chapter 8*.
- Sima, J. (n.d.). *Hydrogeological zones Czech Republic*. Retrieved November 6, 2019, from <http://www.geology.cz/projekt681900/english/learning-resources>
- Singhal, B. B. ., & Gupta, R. . (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks* (Second Edi). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8799-7>
- Soto-Pinto, C., Arellano-Baeza, A., & Sánchez, G. (2013). A new code for automatic detection and analysis of the lineament patterns for geophysical and geological purposes (ADALGEO). *Computers and Geosciences*, 57, 93–103. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2013.03.019>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038I006P00913>
- Struckmeier, W., & Margat, J. (1995). *Hydrogeological Maps A Guide and a Standard Legend* (International Association of Hydrogeologists (ed.)).
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos Tomo I: Análisis Geotécnico*.
- Tarbut, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación S.A.
- Taylor, R. G., & Howard, K. W. F. (1999). The influence of tectonic setting on the hydrological characteristics of deeply weathered terrains: evidence from Uganda. *Journal of Hydrology*, 218(1–2), 44–71. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00024-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00024-4)
- Thomas, A. C., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2014). A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization. *Geophysical Research Letters*, 41(5), 1537–1545. <https://doi.org/10.1002/2014GL059323>
- Thomas, B. F., Famiglietti, J. S., Landerer, F. W., Wiese, D. N., Molotch, N. P., & Argus,

- D. F. (2017). GRACE Groundwater Drought Index: Evaluation of California Central Valley groundwater drought. *Remote Sensing of Environment*, 198, 384–392. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.026>
- UNESCO. (1985). *Agua subterráneas en rocas duras - Proyecto 8.6 del Programa Hidrológico Internacional*.
- Urrea, V. (2017). *Variabilidad espacial y temporal del ciclo anual de lluvia en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- USGS. (1992). *Ground Water Atlas of The United States - Hydrologic Investigations Atlas 730-J*.
- USGS. (1995). *Ground Water Atlas of The United States - Hydrologic Investigations Atlas 730-M*.
- Vargas, N. O. (2001). *Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia*.
- Vargas, N. O. (2005). *Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia*. 17.
- Vargas, N. O. (2006). Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), 47–61.
- Wendland, F., Blum, A., Coetsiers, M., Gorova, R., Griffioen, J., Grima, J., Hinsby, K., Kunkel, R., Marandi, A., Melo, T., Panagopoulos, A., Pauwels, H., Ruisi, M., Traversa, P., Vermooten, J. S. ., & Walraevens, K. (2007). European aquifer typology: a practical framework for an overview of major groundwater composition at European scale. *Environmental Geology*. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0966-5>
- Wesley, L. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils*. John Wiley & Sons, Inc.
- Worthington, S. R. H., Davies, G. J., & Alexander, E. C. (2016). Enhancement of bedrock permeability by weathering. *Earth-Science Reviews*, 160, 188–202. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2016.07.002>
- Wright, E. P., & Burgess, W. G. (1992). The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. *Geological Society Special Publication*, 66, 1–27. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.066.01.01>
- Wu, Q., Si, B., He, H., & Wu, P. (2019). Determining regional-scale groundwater recharge with GRACE and GLDAS. *Remote Sensing*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/rs11020154>
- Wyns, R., Baltassat, J.-M., Lachassagne, P., Legchenko, A., Vairon, J., & Mathieu, F. (2004). Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bulletin de La Société Géologique de France*, 175(1), 21–34. <https://doi.org/10.2113/175.1.21>
- Zaporozec, A. (1972). Groundwater zoning in water resources management. *Journal of the American Water Resources Association*, 8(6), 1137–1143.
- Zlatopolsky, A. A. (1992). Program LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis) automated linear image features analysis—experimental results. *Computers & Geosciences*, 18(9), 1121–1126. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(92\)90036-Q](https://doi.org/10.1016/0098-3004(92)90036-Q)