



**Estimación de caudales de descarga de aguas termales
en el área de Nereidas y revisión del ciclo hidrológico para el
área de estudio**

Mateo Cardona Cardona

**Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Geología
Manizales-Caldas
2023**



**Estimación de caudales de descarga de aguas termales
en el área de Nereidas y revisión del ciclo hidrológico para el
área de estudio**

Mateo Cardona Cardona

**Trabajo presentado como requisito para optar al título de Geólogo bajo la modalidad de
práctica empresarial**

Asesor académico:

Esp. Hilda Patricia Cano Sánchez

Profesora del Departamento de Geología de la Universidad de Caldas

Asesor empresarial:

Esp. Julián López Palacio

Geólogo CHEC S.A. E.S.P. – Grupo EPM

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Programa de Geología

Manizales-Caldas

2023



Nota aprobatoria

Agradecimientos

Quiero dar mis mayores agradecimientos a mi familia, en especial a mi mamá y mis abuelos, por ser un apoyo incondicional en cada paso de mi vida ya que, con sus enseñanzas, su paciencia, su confianza en mí y su amor, me han motivado para luchar por mis sueños y crecer como persona, es gracias a ellos a quienes les debo lo que soy.

A la empresa CHEC, por permitirme aprender a desarrollar los conocimientos adquiridos durante la carrera a través de la práctica universitaria, en donde se me transmitieron muchos conocimientos, pero en especial agradezco los valores que allí se manejan, los cuales me ayudaron a ser mejor persona y mejor profesional.

Agradezco al equipo de geotermia de la CHEC por abrirme las puertas de este maravilloso proyecto, por brindarme conocimientos y valores, y regalarme momentos y experiencias que siempre recordaré. A Julián López, Julián Ortiz, Laura, Natalia Susana, Edgar Mauricio y Eduard, infinitas gracias por todo el conocimiento brindado y apoyo en este proceso.

A la Universidad de Caldas, por abrirme las puertas de esta maravillosa carrera, por los miles de momentos, tanto buenos y malos, que viví en sus instalaciones, y por brindarme todas las oportunidades para crecer como profesional. A los profesores, muchas gracias por compartir su conocimiento y por su dedicación, en especial a mi directora Hilda Patricia Cano por aceptar asesorarme y corregir mis errores durante el desarrollo de este proyecto en la última etapa en el pregrado.

Resumen

El presente informe tiene como principal objetivo hacer un análisis del comportamiento hídrico y climático en la subcuenca de Río Claro, y cómo estos afectan los procesos de recarga y descarga del reservorio en área de estudio del proyecto geotérmico Valle de Nereidas, ubicado en municipio de Villamaría, Caldas. Para esto fue necesario dividir el trabajo en dos etapas, la primera corresponde al procesamiento de la data recolectada a partir de diez estaciones hidrometeorológicas dentro de la cuenca en un rango temporal de seis años, desde el 2016 hasta el 2021 con el fin de caracterizar el régimen climático de la cuenca a partir de un balance hídrico. La segunda etapa corresponde al trabajo de campo y estimación de caudales, en donde se recolectaron datos geológicos y estructurales de la litología aflorante en el área de estudio, además, con ayuda de la sonda multiparamétrica HANNA, se hizo la medición de parámetros fisicoquímicos de manantiales termales y de los cauces que interactúan con ellos con el fin de hacer un estimativo del recurso que sale del reservorio e interactúa con el sistema hídrico de la subcuenca. A partir de estos datos se pudo determinar un comportamiento bimodal en la cuenca de estudio con dos periodos de lluvia y dos periodos secos y con una precipitación media multianual de 1274,4 mm, clasificándola como una cuenca de precipitación abundante según la OMM (2008), dando un aporte a la recarga del reservorio, por encima de los 3800 m.s.n.m., de al menos 789.1 L/s y, que a su vez el reservorio entrega al sistema hídrico al menos 554.9 L/s a partir de los manantiales de aguas termales.

Palabras clave: aguas termales, caudal, precipitación, balance hídrico, geotermia, recarga, descarga.

Abstract

The main objective of this report is to analyze the hydric and climatic behavior in the Río Claro sub-basin, and how these affect the recharge and discharge processes of the reservoir in the study area of the Valle de Nereidas geothermal project, located in the municipality of Villamaría, Caldas. For this, it was necessary to divide the work into two stages, the first one corresponds to the processing of the data collected from ten hydrometeorological stations within the sub-basin in a time range of six years, from 2016 to 2021 in order to characterize the basin's climatic regime from a water balance. The second stage corresponds to field work, where geological and structural data of the outgoing lithology were collected in the study area, in addition, with the help of the HANNA multiparameter probe, the measurement of physicochemical parameters was made from thermal springs and the channels that interact with them in order to make an estimate of the resource that leaves the reservoir and interacts with the water system of the sub-basin. From these data, it was possible to determine a bimodal behavior in the study basin with two periods of rain and two dry periods and with a multiannual average precipitation of 1274.4 mm, classifying it as a basin with abundant precipitation according to the WMO (2008), and that gives a contribution to the recharge of the reservoir, above 3800 m.a.s.l., of at least 789.1 L/s and, in turn, the reservoir delivers to the water system at least 554,9 L/s from the hot springs.

Keywords: hot springs, flow, precipitation, water balance, geothermal, recharge, discharge.

Tabla de contenido

1.	Introducción	19
2.	Objetivos	21
	2.1 Objetivo general	21
	2.2 Objetivos específicos	21
3.	Justificación	22
4.	Localización	24
5.	Metodología	25
6.	Marco conceptual	27
7.	Antecedentes	32
8.	Marco geológico	37
	8.1 Geología Regional	37
	8.2 Geología Local	41
	8.2.1 Complejo Cajamarca (Pev Pes)	41
	8.2.2 Complejo Quebradagrande (Ksc Kvc):	43
	8.2.3 Flujos Andesíticos (NgQa Qa)	46
	8.2.4 Depósitos de flujo de lodo volcánico (Qfl)	47
	8.2.5 Depósitos piroclásticos (Qto)	48
	8.2.6 Depósitos glaciares (Qg)	50
	8.2.7 Depósitos aluviales y coluviales (Qar)	50
	8.3 Geología Estructural	53
9.	Hidrología	57
	9.1 Quebrada Nereidas	62
	9.2 Río Molinos	68
	9.3 Río Claro	72
	9.4 Quebrada El Billar	76
	9.5 Quebrada La Poa-La Piscina	78
10.	Clima	80
	10.1 Análisis de los datos existentes en la zona de estudio	83
	10.2 Precipitación	86
	10.2.1 Gestión de datos faltantes	86
	10.2.2 Análisis de consistencia y completitud de datos	87
	10.2.3 Outliers o datos anómalos	93
	10.2.4 Coeficiente pluviométrico	94

10.2.5 Precipitación media	106
10.2.5.1 Método aritmético	106
10.2.5.1.1 Precipitación media multianual de la subcuenca de Río Claro	107
10.2.5.1.2 Precipitación media multianual de la zona de interés	108
10.2.5.2 Método de polígonos de Thiessen	109
10.2.5.2.1 Precipitación media anual para la subcuenca de Río Claro	110
10.2.5.2.2 Precipitación media multianual para la subcuenca de Río Claro	115
10.2.5.2.3 Precipitación media anual para el área de estudio	116
10.2.5.2.4 Precipitación media multianual para el área de estudio	120
10.2.5.3 Método de las Isoyetas	120
10.2.5.3.1 Precipitación media anual para la subcuenca de Río Claro	122
10.2.5.3.2 Precipitación media multianual para la subcuenca de Río Claro	125
10.2.5.3.3 Precipitación media anual para el área de estudio	125
10.2.5.3.4 Precipitación media multianual para el área de estudio	129
10.2.5.4 Comparación de la precipitación media	129
10.3 Temperatura	130
10.3.1 Temperatura media	131
10.3.2. Temperatura mínima	134
10.3.3 Temperatura máxima	135
10.4 Evapotranspiración	136
10.4.1 Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea	140
10.4.2 Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana	141
10.4.3 Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC	142
10.4.4 Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC	143
10.4.5 Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas	144
10.4.6 Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N.	145
10.4.7 Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N.	147
10.4.8 Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N.	148
10.4.9 Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N.	149
10.5 Balance hídrico de suelos	153
10.5.1 Estación Río Claro-La Batea	157
10.5.2 Estación Río Claro-La Guayana	160
10.5.3 Estación Q. Nereidas-CHEC	163
10.5.4 Estación Pirineos-CHEC	166
10.5.5 Estación Las Brisas	169

10.5.6 Estación Q. Molinos-P.N.N.N.....	172
10.5.7 Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.	175
10.5.8 Estación Río Claro-P.N.N.N.....	178
10.5.9 Estación Santa Isabel-P.N.N.N.....	181
10.5.10 Resumen del balance hídrico	184
10.5.11 Zona de recarga y cálculo de caudal de recarga del sistema geotérmico	185
11. Manantiales de aguas termales	190
11.1 Cálculo de caudales de descarga de aguas termales	195
11.1.1 Manantiales Hacienda El Termal-Q. Nereidas (T1)	198
11.1.2 Manantiales Hacienda La Quinta (T2)	200
11.1.3 Manantial La Poa-La Piscina (T3)	203
11.2 Zona de descarga en el sector de Botero Londoño	205
12. Recopilación de la información y aportes para la construcción de un modelo geotérmico conceptual...211	
13. Conclusiones	215
14. Recomendaciones	218
15. Referencias	219

Lista de figuras

Fig. 1. Mapa de localización.....	24
Fig. 2. Diagrama de metodología.....	25
Fig. 3. Gradientes geotérmicos en diferentes zonas del mundo. Modificado de: GEOCOM (s.f.).....	29
Fig. 4. Esquema de un sistema geotérmico. Tomado de: https://comofuncionaque.com/como-funciona-la-energia-geotermica/	30
Fig. 5. Mapa de la geología regional. Tomado y modificado de: Rayo-Rocha (2012).....	40
Fig. 6. (A) Afloramiento de esquisto negro sobre el camino a la Hacienda El Termal. (B). Representación de las venas y lentes de cuarzo entre la foliación del esquisto negro.....	42
Fig. 7. (A). Afloramiento sobre la Q. Nereidas. (B). Representación del microplegamiento asimétrico y lentes de cuarzo entre la foliación del esquisto negro.....	42
Fig. 8. (A). Muestra de mano del esquisto verde en contacto con el esquisto negro tomada en el cauce de la Q. El Billar. (B). Muestra de mano del esquisto negro tomada en el cauce de la Q. El Billar. (C). Esquisto negro mineralizado, visto con lupa de aumento 30x, muestra tomada en el cauce de la Q. El Billar.	43
Fig. 9. Afloramiento correspondiente al Complejo Quebradagrande en el sector de Barro Azul.....	44
Fig. 10. (A). Afloramiento de lodolitas en el sector de Barro Azul. (B). Microfractura.	45
Fig. 11. (A). Muestra de mano de lodolitas negras con microplegamientos tomada en el sector de Barro Azul. (B). Lodolita negra mineralizada, visto con lupa de aumento 30x.....	45
Fig. 12. (A). Estructuras de diaclasamiento columnar sobre el manantial La Poa-La Piscina. (B). Bloque con diaclasamiento columnar rodado alrededor del manantial La Poa-La Piscina de tonalidades grises; textura porfirítica de grano medio a grueso, matriz holohialina, con fenocristales de Plg, Anf. Clasificada macroscópicamente como Andesita.....	47
Fig. 13. (A) Ignimbrita de Río Claro desde la vía Ruta del Cóndor, después de la vereda Papayal. (B). Representación de la morfología plana o en terrazas que forma esta unidad que se encuentra disectada por Río Claro.....	49
Fig. 14. (A). Depósitos volcánicos con diaclasamiento columnar sobre la finca Laguna Alta, camino a Río Claro. (B). Representación del diaclasamiento columnar sobre los depósitos volcánicos.....	49
Fig. 15. (A). Depósito aluvial de Río Claro no consolidado, matriz soportada, mal seleccionado, con partículas tamaño grava subredondeados a subangulares compuesta por fragmentos de roca metamórfica (esquistos verdes, esquistos cuarzo-sericíticos), ignimbrita y andesitas oxidadas. (B). Terraza aluvial de Río Claro.....	51
Fig. 16. Columna estratigráfica del pozo Nereidas 1 (N1). Tomado de: Rodríguez et al. (1997).	52
Fig. 17. Mapa de la geología estructural. Tomado y modificado de: Rayo-Rocha (2012).	56
Fig. 18.(A) Municipios que tienen jurisdicción en la cuenca del Río Chinchiná. (B) Subcuenclas del Río Chinchiná. (C). Microcuenclas del Río Chinchiná. (D). Microcuenclas que comprende la zona de estudio. Tomado de: (POMCA del Río Chinchiná, 2013; Román, 2021).	58
Fig. 19. Distribución espacial de las Unidades geológicas superficiales en el área de influencia del EIA del proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruíz. Tomado de: (Ingeniería Strycon, 2017; Román, 2021).	61
Fig. 20. Estaciones hidrológicas de las microcuenclas de la Q. Nereidas y el Río Molinos. Tomado de: Román (2021).	62

Fig. 21. (A). Q. Nereidas camino a la hacienda El Termal. (B). Q. Nereidas en su interacción con las fuentes termales de la hacienda El Termal.....	63
Fig. 22. Régimen hidrológico de la Quebrada Nereidas a partir de los datos recolectados por Román (2021).....	64
Fig. 23. Hidrograma anual de caudales medios la Quebrada Nereidas a partir de los datos recolectados por Román (2021).	65
Fig. 24. Climogramas de precipitación y temperatura de la cuenca de la Quebrada Nereidas.	67
Fig. 25. (A). Relación entre precipitación y caudal Estación Q. Nereidas-CHEC. (B). Relación precipitación y caudal Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.....	68
Fig. 26. Cascada Molinos en el sector del Hostal La Laguna.	69
Fig. 27. Régimen hidrológico de Río Molinos a partir de los datos recolectados por Román (2021).	70
Fig. 28. Hidrograma anual de caudales medios la Quebrada Nereidas a partir de los datos recolectados por Román (2021).	71
Fig. 29. Climograma de precipitación y temperatura de la cuenca de Río Molinos.	71
Fig. 30. Relación precipitación y caudal Estación Q. Molinos-P.N.N.N.	72
Fig. 31. (A). Río Claro visto desde potrero detrás de la finca Laguna Alta. (B). Río Claro metros después de su intersección con la Q. Nereidas.	73
Fig. 32. Régimen hidrológico de Río Claro a partir de los datos recolectados por Navarro (2008).	74
Fig. 33. Q. El Billar camino a la hacienda La Quinta.	76
Fig. 34. Q. La Poa cerca de hacienda El Plan.	78
Fig. 35. Clasificación climática de Colombia a partir de la metodología de Caldas-Lang. Tomado de: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Caldas_Lang.pdf	81
Fig. 36. Clasificación climática del departamento de Caldas a partir de la metodología de Caldas-Lang. Tomado de: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clima-caldas.pdf	82
Fig. 37. Clasificación climática de la cuenca del Río Chinchiná a partir de la metodología de Caldas-Lang. Tomado de: POMCA del Río Chinchiná (2013).	82
Fig. 38. Estaciones hidrometeorológicas seleccionadas dentro de la subcuenca de Río Claro. Imagen satelital tomada de SAS Planet.	85
Fig. 39. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos de las estaciones utilizadas.....	86
Fig. 40. Curva de doble masa Estación Río Claro-La Batea.	88
Fig. 41. Curva de doble masa Estación Río Claro-La Guayana.	89
Fig. 42. Curva de doble masa Estación Papayal.	89
Fig. 43. Curva de doble masa Estación Q. Nereidas-CHEC.	90
Fig. 44. Curva de doble masa Estación Pirineos-CHEC.	90
Fig. 45. Curva de doble masa Estación Las Brisas	91
Fig. 46. Curva de doble masa Estación Q. Molinos-P.N.N.N.	91
Fig. 47. Curva de doble masa Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.	92
Fig. 48. Curva de doble masa Estación Q. Río Claro-P.N.N.N.	92
Fig. 49. Curva de doble masa Estación Santa Isabel-P.N.N.N.	93
Fig. 50. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Río Claro-La Batea.	95
Fig. 51. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Río Claro-La Guayana.	96
Fig. 52. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Papayal.	97
Fig. 53. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Q. Nereidas-CHEC.	98
Fig. 54. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Pirineos-CHEC.	99

Fig. 55. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Las Brisas.....	100
Fig. 56. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Q. Molinos-P.N.N.N.....	101
Fig. 57. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.....	102
Fig. 58. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Río Claro-P.N.N.N.....	103
Fig. 59. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico Estación Santa Isabel-P.N.N.N.....	105
Fig. 60. Polígonos de Thiessen en la subcuenca de Río Claro.....	109
Fig. 61. Variación de la precipitación media anual por el método de los polígonos de Thiessen en la subcuenca de Río Claro durante los años 2016-2021.....	113
Fig. 62. Distribución espacio-temporal de la precipitación en la subcuenca de Río Claro. (A). Año 2016. (B). Año 2017. (C). Año 2018. (D). Año 2019. (E). Año 2020. (F). Año (2021).....	114
Fig. 63. Distribución espacial de la precipitación en la subcuenca de Río Claro (2016-2021).	116
Fig. 64. Variación de la precipitación media anual en la zona de interés durante los años 2016-2021....	119
Fig. 65. Mapa de isoyetas (A). Año 2016. (B). Año 2017. (C). Año 2018. (D). Año 2019. (E). Año 2020. (F). Año 2021. (G). Multianual.....	121
Fig. 66. Variación de la precipitación media anual por el método de las Isoyetas en la subcuenca de Río Claro durante los años 2016-2021.	124
Fig. 67. Variación de la precipitación media anual por el método de las Isoyetas en la zona de interés durante los años 2016-2021.	128
Fig. 68. Histograma de temperatura media mensual multianual de las estaciones trabajadas.....	133
Fig. 69. Distribución espacial de la temperatura en la subcuenca de Río Claro.	134
Fig. 70. Histograma de temperatura mínima mensual multianual de las estaciones trabajadas.....	135
Fig. 71. Histograma de temperatura máxima mensual multianual de las estaciones trabajadas.....	136
Fig. 72. Histograma de evapotranspiración corregida para cada una de las estaciones evaluadas.	151
Fig. 73. Transcurso mensual de la evaporación en algunas localidades de Colombia. Tomado de: Clima Andino y café en Colombia. Jaramillo, R. A., 2005.	152
Fig. 74. Balance de agua en el suelo. Tomado de Allen et al. (2006).....	153
Fig. 75. Esquema general del balance hídrico en el suelo, donde P_i indica la precipitación o entrada del agua y ETP_i , las pérdidas debidas a la evapotranspiración potencial, estimada a través de las principales variables climáticas como los son temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), temperatura media (T_{med}), humedad relativa (HR), brillo solar (BS), velocidad del viento (VV), radiación solar (R_a); entre otros. Tomado de: IGAC (s.f.). BALANCE HÍDRICO Y SUS APLICACIONES.....	154
Fig. 76. Balance hídrico multianual para la estación Río Claro-La Batea (2017-2021).	159
Fig. 77. Balance hídrico multianual para la estación Río Claro-La Guayana (2016-2021).	162
Fig. 78. Balance hídrico multianual para la estación Q. Nereidas-CHEC (2016-2021).	165
Fig. 79. Balance hídrico multianual para la estación Pirineos-CHEC (2016-2021).	168
Fig. 80. Balance hídrico multianual para la estación Las Brisas (2016-2021).....	172
Fig. 81. Balance hídrico multianual para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2016-2021).	175
Fig. 82. Balance hídrico multianual para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2016-2020).....	178
Fig. 83. Balance hídrico multianual para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2016-2020).....	180
Fig. 84. Balance hídrico multianual para la estación Q. Santa Isabel-P.N.N.N. (2016-2021).	183
Fig. 85. Zona de recarga y polígonos de influencia. Imagen satelital tomada de SAS Planet.	188
Fig. 86. Localización de manantiales termales por grupos en el Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín. Tomado de: Alfaro et al. (2002).	191

Fig. 87. Modelo idealizado de circulación y evolución del fluido termal. Tomado y modificado de: Aricapa (2020).	195
Fig. 88. Zona de recarga y polígonos de influencia. Imagen satelital tomada de SAS Planet.	196
Fig. 89. Manantiales de aguas termales sobre la quebrada Nereidas.	198
Fig. 90. Mapa geológico de los manantiales Botero Londoño. Tomado de Aricapa (2020).	199
Fig. 91. Manantiales de aguas termales sobre la quebrada El Billar.....	200
Fig. 92. Mapa geológico de los manantiales de la quebrada El Billar. Tomado de Aricapa (2020).....	201
Fig. 93. Manantial de agua termal conocido como “La Piscina”.....	203
Fig. 94. Mapa geológico del manantial La Piscina. Tomado de Aricapa (2020).....	204
Fig. 95. Mínimo aporte de las aguas termales al sistema hídrico en la zona de Botero Londoño.	206
Fig. 96. Mínimo aporte de las aguas termales al sistema hídrico en la zona de Botero Londoño.	209
Fig. 97. Esquema representativo hipotético del sistema geotérmico en el valle de Nereidas. Modificado de: Román (2021).	214

Lista de tablas

Tabla 1. Cuenca, subcuencas y microcuencas del Río Chinchiná Tomado de: (POMCA del Río Chinchiná, 2013; Román, 2021).	58
Tabla 2. Caudal mensual de la estación La Bodega. Tomado de Román (2021).	63
Tabla 3. Parámetros físicos de la Q. Nereidas en el sector de Laguna Alta y la hacienda El Termal. Tomado de Román (2021).	66
Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos de la Quebrada Nereidas en el sector de la hacienda el Termal para el año 2022.	66
Tabla 5. Caudal mensual de la estación Montenegro. Tomado de Román (2021).	69
Tabla 6. Caudal mensual de Río Claro. Tomado de Navarro (2008).	74
Tabla 7. Parámetros físicos de Río Claro en el sector de Laguna Alta. Tomado de Román (2021).	75
Tabla 8. Parámetros físicos de la quebrada El Billar. Tomado de: Román (2021).	77
Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos de la quebrada El Billar en el sector de la hacienda La Quinta para el año 2022.	77
Tabla 10. Parámetros fisicoquímicos de la quebrada La Poa en el sector de la hacienda El Plan para el año 2022.	79
Tabla 11. Ficha técnica de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas. Coordenadas en Colombia Bogotá Zone.	85
Tabla 12. Coeficiente pluviométrico Estación Río Claro-La Batea.	95
Tabla 13. Coeficiente pluviométrico Estación Río Claro-La Guayana.	96
Tabla 14. Coeficiente pluviométrico Estación Papayal.	97
Tabla 15. Coeficiente pluviométrico Estación Q. Nereidas-CHEC.	98
Tabla 16. Coeficiente pluviométrico Estación Pirineos-CHEC.	99
Tabla 17. Coeficiente pluviométrico Estación Las Brisas.	100
Tabla 18. Coeficiente pluviométrico Estación Q. Molinos-P.N.N.N.	101
Tabla 19. Coeficiente pluviométrico Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.	102
Tabla 20. Coeficiente pluviométrico Estación Río Claro-P.N.N.N.	103
Tabla 21. Coeficiente pluviométrico Estación Santa Isabel-P.N.N.N.	104
Tabla 22. Precipitación media multianual de la subcuenca de Río Claro a partir del método aritmético.	107
Tabla 23. Precipitación media multianual mensual por el método aritmético (2016-2021).	108
Tabla 24. Precipitación media multianual del área de estudio a partir del método aritmético.	108
Tabla 25. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2016 de la Subcuenca de Río Claro.	110
Tabla 26. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2017 de la Subcuenca de Río Claro.	110
Tabla 27. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2018 de la Subcuenca de Río Claro.	111
Tabla 28. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2019 de la Subcuenca de Río Claro.	111
Tabla 29. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2020 de la Subcuenca de Río Claro.	112

Tabla 30. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2021 de la Subcuenca de Río Claro.....	112
Tabla 31. Precipitación media multianual a partir del método de polígonos de Thiessen de la Subcuenca de Río Claro (2016-2021).	115
Tabla 32. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2016 en la zona de interés.....	117
Tabla 33. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2017 en la zona de interés.....	117
Tabla 34. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2018 en la zona de interés.....	117
Tabla 35. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2019 en la zona de interés.....	118
Tabla 36. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2020 en la zona de interés.....	118
Tabla 37. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2021 en la zona de interés.....	118
Tabla 38. Precipitación media multianual a partir del método de polígonos de Thiessen en la zona de interés (2016-2021).....	120
Tabla 39. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2016 de la Subcuenca de Río Claro.	122
Tabla 40. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2017 de la Subcuenca de Río Claro.	122
Tabla 41. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2018 de la Subcuenca de Río Claro.	123
Tabla 42. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2019 de la Subcuenca de Río Claro.	123
Tabla 43. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2020 de la Subcuenca de Río Claro.	123
Tabla 44. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2021 de la Subcuenca de Río Claro.	124
Tabla 45. Precipitación media multianual a partir del método de las Isoyetas de la subcuenca de Río Claro (2016-2021).....	125
Tabla 46. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2016 de la zona de interés.....	126
Tabla 47. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2017 de la zona de interés.....	126
Tabla 48. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2018 de la zona de interés.....	126
Tabla 49. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2019 de la zona de interés.....	127
Tabla 50. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2020 de la zona de interés.....	127
Tabla 51. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2021 de la zona de interés.....	127

Tabla 52. Precipitación media multianual a partir del método de las Isoyetas de la zona de interés (2016-2021).	129
Tabla 53. Valores de precipitación media en la subcuenca de Río Claro Isoyetas vs. Thiessen.	130
Tabla 54. Valores de precipitación media en la zona de interés Isoyetas vs. Thiessen.	130
Tabla 55. Temperatura media mensual multianual (2016-2021).	132
Tabla 56. Clasificación Caldas-Lang según el Instructivo de Zonificación Climática del IGAC (2014).	132
Tabla 57. Temperatura mínima mensual multianual (2016-2021).	135
Tabla 58. Temperatura máxima mensual multianual (2016-2021).	136
Tabla 59. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2017).	140
Tabla 60. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2018).	140
Tabla 61. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2019).	140
Tabla 62. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2020).	140
Tabla 63. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2021).	140
Tabla 64. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2016).	141
Tabla 65. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2017).	141
Tabla 66. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2018).	141
Tabla 67. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2019).	141
Tabla 68. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2020).	141
Tabla 69. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2021).	142
Tabla 70. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2016).	142
Tabla 71. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2017).	142
Tabla 72. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2018).	142
Tabla 73. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2019).	142
Tabla 74. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2020).	143
Tabla 75. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2021).	143
Tabla 76. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2016).	143
Tabla 77. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2017).	143
Tabla 78. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2018).	143
Tabla 79. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2019).	144
Tabla 80. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2020).	144
Tabla 81. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2021).	144
Tabla 82. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2016).	144
Tabla 83. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2017).	144
Tabla 84. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2018).	145
Tabla 85. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2019).	145
Tabla 86. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2020).	145
Tabla 87. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2021).	145
Tabla 88. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2016).	145
Tabla 89. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2017).	146
Tabla 90. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2018).	146
Tabla 91. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2019).	146
Tabla 92. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2020).	146
Tabla 93. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2021).	146
Tabla 94. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2016).	147

Tabla 95. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2017).	147
Tabla 96. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2018).	147
Tabla 97. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2019).	147
Tabla 98. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2020).	147
Tabla 99. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2016).	148
Tabla 100. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2017).	148
Tabla 101. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2018).	148
Tabla 102. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2019).	148
Tabla 103. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2020).	148
Tabla 104. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2016).	149
Tabla 105. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2017).	149
Tabla 106. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2018).	149
Tabla 107. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2019).	149
Tabla 108. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2020).	149
Tabla 109. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2021).	150
Tabla 110. Evapotranspiración potencial multianual corregida para las estaciones de trabajo.	150
Tabla 111. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2017).	157
Tabla 112. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2018).	158
Tabla 113. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2019).	158
Tabla 114. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2020).	158
Tabla 115. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2021).	158
Tabla 116. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2016).	160
Tabla 117. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2017).	160
Tabla 118. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2018).	161
Tabla 119. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2019).	161
Tabla 120. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2020).	161
Tabla 121. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2021).	161
Tabla 122. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2016).	163
Tabla 123. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2017).	163
Tabla 124. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2018).	164
Tabla 125. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2019).	164
Tabla 126. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2020).	164
Tabla 127. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2021).	164
Tabla 128. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2016).	166
Tabla 129. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2017).	166
Tabla 130. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2018).	167
Tabla 131. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2019).	167
Tabla 132. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2020).	167
Tabla 133. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2021).	167
Tabla 134. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2016).	169
Tabla 135. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2017).	169
Tabla 136. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2018).	170
Tabla 137. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2019).	170
Tabla 138. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2020).	170

Tabla 139. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2021).	170
Tabla 140. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2016).....	172
Tabla 141. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2017).....	173
Tabla 142. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2018).....	173
Tabla 143. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2019).....	173
Tabla 144. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2020).....	173
Tabla 145. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2021).....	174
Tabla 146. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2016).....	176
Tabla 147. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2017).....	176
Tabla 148. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2018).....	176
Tabla 149. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2019).....	176
Tabla 150. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2020).....	177
Tabla 151. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2016).	178
Tabla 152. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2017).	179
Tabla 153. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2018).	179
Tabla 154. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2019).	179
Tabla 155. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2020).	179
Tabla 156. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2016).....	181
Tabla 157. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2017).....	181
Tabla 158. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2018).....	181
Tabla 159. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2019).....	182
Tabla 160. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2020).....	182
Tabla 161. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2021).....	182
Tabla 162. Resumen del balance hídrico de suelos de la subcuenca Río Claro (2016-2021).....	185
Tabla 163. Resumen promedio del balance hídrico de suelos de la subcuenca Río Claro.	185
Tabla 164. Infiltración promedio anual en la zona de recarga del sistema geotérmico.	188
Tabla 165. Manantiales termales en el Valle de Nereidas. Tomado de Román (2021).	194
Tabla 166. Datos fisicoquímicos medidos en la quebrada Nereidas y en el manantial T1.	199
Tabla 167. Datos fisicoquímicos medidos en la quebrada El Billar y en el manantial T2.....	202
Tabla 168. Datos fisicoquímicos medidos en la quebrada La Poa y en el manantial T3.....	204
Tabla 169. Valores de caudales obtenidos para cada manantial entre 2021 y 2022.	205
Tabla 170. Valores completos de caudales obtenidos para cada manantial entre 2021 y 2022.....	208

1. Introducción

Ante la creciente demanda energética que se vive a nivel mundial, las energías alternativas poco a poco han ganado terreno en el panorama energético global con el fin de satisfacer las necesidades de una población que crece constantemente y de interconectar y mejorar la calidad de vida de todas las comunidades sin importar su ubicación geográfica.

La geotermia ha sido una de las fuentes de recurso energético que ha permitido el desarrollo de las comunidades aprovechando el calor que emana de la Tierra, el cual es esencialmente ilimitado y puede utilizarse las 24 horas del día, siendo considerada una fuente renovable y competitiva, además, su uso no se restringe a la generación de energía ya que puede ser utilizado en invernaderos, calefacción, agricultura, balneología, acuicultura, entre otros.

En Colombia, el potencial recurso geotérmico que se tiene en zonas aledañas al volcán Nevado del Ruiz ha sido estudiado por CHEC S.A. E.S.P. desde los años 60's, y desde entonces se ha podido delimitar el área conocida como Valle de Nereidas, en el municipio de Villamaría, Caldas, como un lugar atractivo para el estudio geotérmico debido a las manifestaciones del recurso presentes en la zona en forma de géiseres, agua termal, fumarolas y alteraciones hidrotermales en las rocas.

Para hacer una aproximación al potencial geotérmico que se tiene en este lugar es importante conocer las condiciones climáticas gobernantes en la subcuenca de Río Claro, la cual contiene en su totalidad el área de estudio, y cómo estas condiciones pueden afectar las dinámicas de recarga y descarga del sistema geotérmico.

La zona conocida como Botero Londoño ha sido considerada como el área de descarga de este sistema, en donde se presenta una gran concentración de manifestaciones hidrotermales, todas con características geoquímicas afines a las aguas presentes en la parte madura un sistema

geotérmico. Es aquí en donde se espera estimar un valor de caudal que sea representativo para la zona de descarga, el cuál puede ser considerado como valor mínimo del recurso hídrico presente en el reservorio.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Estimar el caudal de salida de aguas termales en el sector de Botero Londoño y realizar una revisión al ciclo hidrológico proponiendo un modelo de balance hídrico para el área de estudio.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas de las fuentes termales en el área de estudio con la determinación de sus respectivos caudales.

- Proponer un modelo de balance hídrico a partir de los datos recolectados de las diferentes estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas presentes en la zona.

- Establecer como afectan las diferentes variables hidro-climáticas de la subcuenca de Río Claro a los sistemas de recarga y descarga del reservorio geotérmico evaluado en diferentes periodos de tiempo.

3. Justificación

Ante el tema de transición energética que se vive en el mundo y, particularmente en Colombia, se adelantan procesos legales y de financiamiento con el fin de promover e incentivar la aparición en el mercado de nuevas alternativas de generación de energía. A partir de esto, se abre una nueva ventana de oportunidades para el desarrollo de proyectos de generación de energía limpia, renovable y eficiente a partir de fuentes no convencionales, como la energía solar, eólica, geotérmica, entre otras.

La geotermia se ha convertido en una fuente de energía renovable, sostenible y que contribuye directa o indirectamente a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU. Un ejemplo de esto es el ODS N°7, el cual busca lograr una “energía asequible y no contaminante”, objetivo que se puede alcanzar mediante el uso de la geotermia, ya que es una fuente de energía limpia y renovable que no emite gases contaminantes atmosféricos ni gases de efecto invernadero. Además, la geotermia puede contribuir al ODS N°11 de “Ciudades y comunidades sostenibles” al proporcionar energía a partir de una fuente de local, confiable y sostenible, lo que permite mejorar la calidad de vida de las comunidades. Asimismo, la geotermia puede mitigar el cambio climático, relacionado con el ODS N°13, al ser un reemplazo del uso de combustibles fósiles y reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la geotermia puede estar relacionada con otros ODS, como el ODS N°9 (industria e infraestructura) y el ODS N°15 (vida de ecosistemas terrestres).

En general, el desarrollo de la geotermia no solo trae beneficios para las comunidades, sino también para el medio ambiente, es por esto que en Colombia se han adelantado estudios sobre su potencial geotérmico, destacando el proyecto geotérmico Valle de Nereidas liderado por la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) en el municipio de Villamaría, Caldas, en donde se han podido

definir varias fases de estudio para conocer las diferentes características de un reservorio geotérmico en esta región.

Una de las características más relevantes es comprender las dinámicas hidro-climáticas que afectan el sistema geotérmico, y ya que el área del sistema geotérmico se encuentra dentro de la subcuenca de Río Claro, es importante conocer como son las dinámicas climáticas de este, como la recarga del sistema a través de la lluvia, la infiltración del agua, entre otros factores que además de influir en el sistema hídrico superficial, también tienen sus efectos sobre el reservorio geotérmico, como por ejemplo en el sistema de recarga y descarga en los manantiales de aguas termales.

En este estudio se pretende en primer lugar, evaluar las dinámicas climáticas de la subcuenca de Río Claro a través de un balance hídrico para conocer como este afecta a la recarga del reservorio; en segundo lugar, se pretende estimar el caudal de salida de manantiales de agua termal a partir de algunos de sus parámetros fisicoquímicos y su interacción con los afluentes de la zona.

4. Localización

El área del proyecto geotérmico Valle de Nereidas, desarrollado por CHEC S.A. E.S.P. abarca unos 54 km² en el flanco occidental de la Cordillera Central, en la vertiente occidental del volcán Nevado del Ruiz, en jurisdicción del municipio de Villamaría, Caldas. La principal ruta de acceso se encuentra en Villamaría, accediendo por el barrio Turín, siguiendo la Ruta del Cóndor, pasando por las veredas La Guayana y Papayal.

El área se caracteriza por ser una zona con relieve montañoso y pendientes abruptas, con una diferencia de altura que va desde los 1500 hasta los 4500 m.s.n.m.; el proyecto se encuentra dentro de la cuenca del Río Chinchiná, en la subcuenca de Río Claro, los principales afluentes son Río Molinos, Río Claro, Quebrada Nereidas y Quebrada El Billar. Es alrededor de estos últimos tres afluentes que se encuentran manifestaciones geotérmicas como el nacimiento de aguas termales, géiseres, fumarolas y suelos calientes.

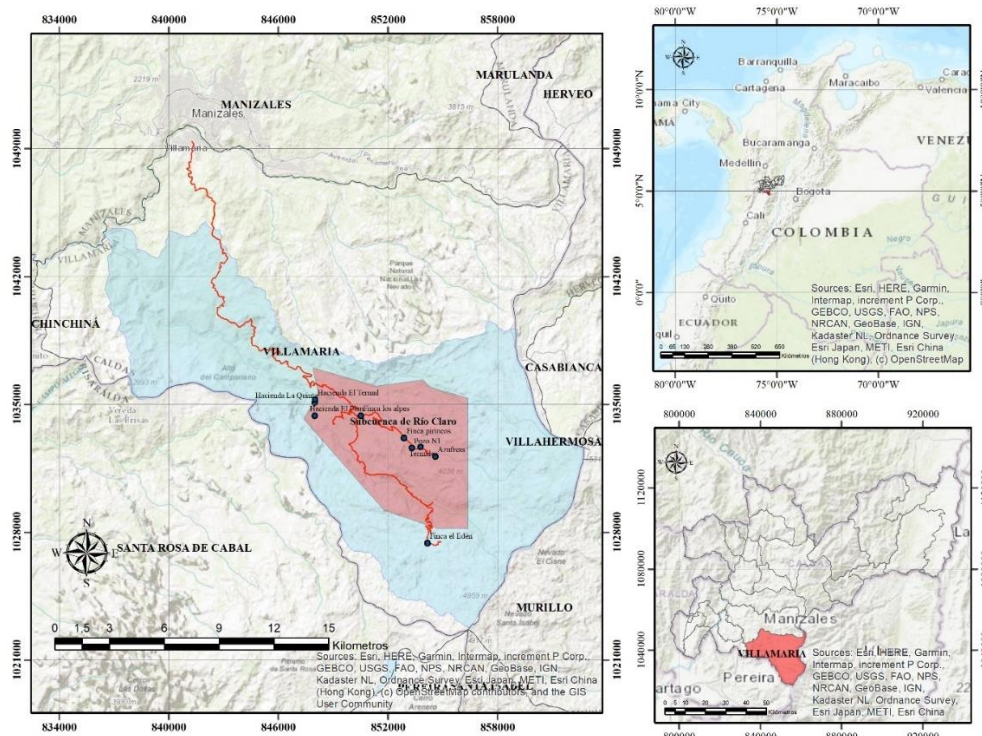


Fig. 1. Mapa de localización.

5. Metodología

Con el fin de cumplir los objetivos planteados, se llevaron a cabo ciertas actividades, las cuales fueron organizadas y plasmadas en el siguiente diagrama:

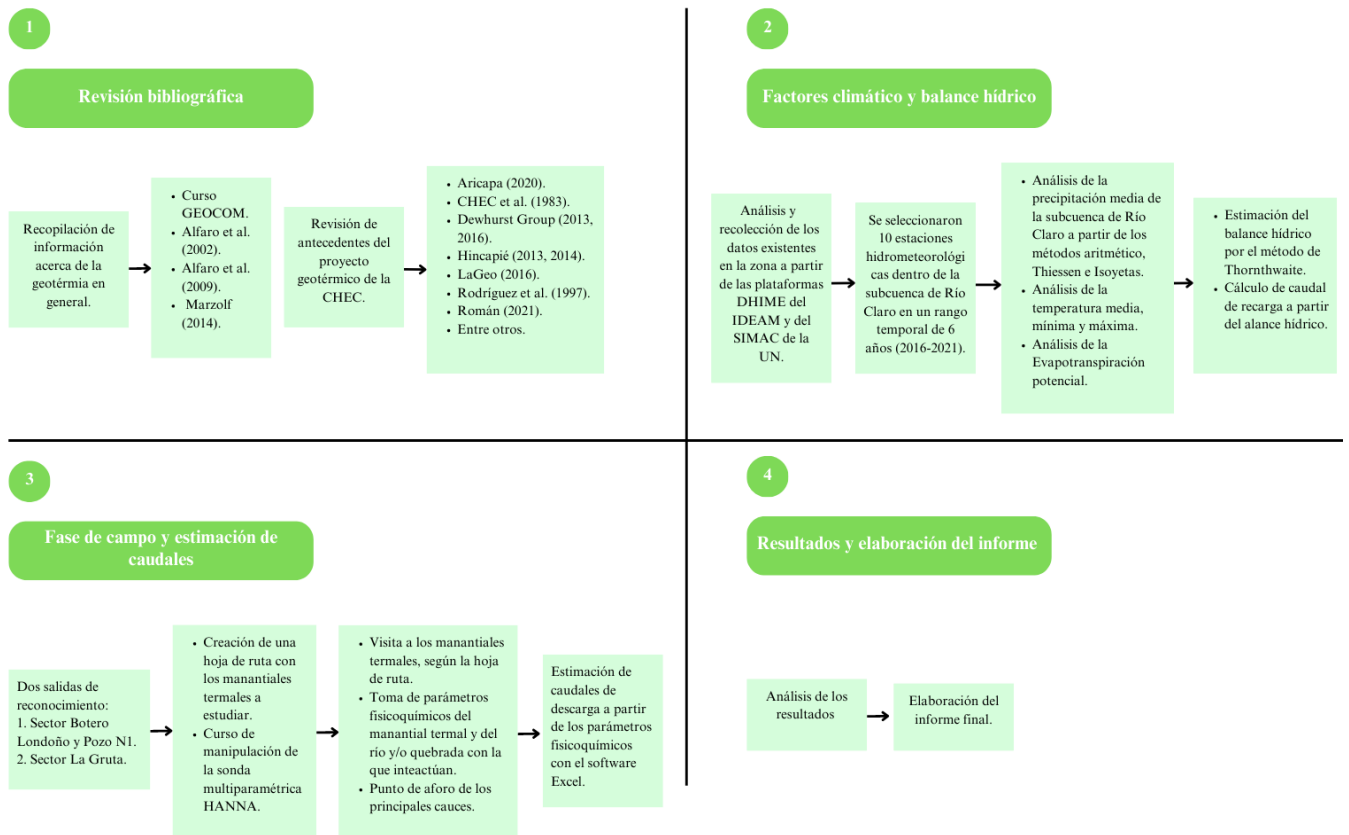


Fig. 2. Diagrama de metodología.

La fase 1 consistió en una recopilación de información existente acerca de la geotermia en general, junto con la realización de un curso de geotermia dictado por GEOCOM, además se realizó una revisión bibliográfica de los antecedentes del proyecto geotérmico adelantado por CHEC S.A. E.S.P., resaltando los aspectos más importantes para este estudio como las características geológicas, geomorfológicas, geofísicas, geoquímicas, hidrológicas y climáticas de la zona de estudio.

A partir de los datos recopilados en la fase 1, las siguientes fases fueron realizadas en dos líneas diferentes, pero simultáneas a la vez.

La fase 2 consistió en un trabajo de oficina, y su objetivo principal fue realizar un balance hídrico y un análisis de las condiciones climáticas de la subcuenca de Río Claro, en la cual se encuentra el área de estudio, para estos fue preciso la obtención de los datos de ciertas estaciones hidrometeorológicas repartidas a lo largo de la subcuenca trabajada; los datos obtenidos fueron procesados a partir de las directrices de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) para asegurar la calidad de la información y obtener resultados consistentes que puedan ser analizados e interpretados con el fin de caracterizar el régimen climático de la Subcuenca.

La fase 3, se llevó a cabo simultáneamente con la fase 2, esta fue una fase mixta, ya que contó con una etapa de campo y otra etapa de trabajo de oficina; en esta fase se realizaron al menos 3 salidas de reconocimiento una hoja de ruta en la cual se plantean las trayectorias a seguir durante las salidas de reconocimiento y los manantiales a visitar en la zona de Botero Londoño, y lugares aledaños. Una vez definido esto se llevó a cabo la etapa de campo, en donde se llevaron a cabo actividades para la recolección de datos como: descripción de la litología de la zona, toma de datos estructurales, aforo de los ríos y quebradas, y toma de parámetros fisicoquímicos de los termales y de los cauces de agua que interactúan directamente con estos con ayuda de la sonda multiparamétrica HANNA. A partir de los datos recolectados en la etapa de campo se realizó un procesamiento y análisis de los resultados como el cálculo de caudales de aguas termales a partir de los parámetros estudiados en campo y los caudales de los cauces principales de la zona.

La fase 4, consistió en la redacción del informe que plasmara todos los resultados obtenidos a partir de cada una de las fases anteriores.

6. Marco conceptual

Geotermia

“La palabra geotermia viene de la combinación de las palabras griegas: “ge”, que significa la Tierra, y “therm”, que significa calor; literalmente la definición de la energía geotérmica es el calor de la Tierra” (GEOCOM, s.f.). La geotermia es una rama de las ciencias geológicas que se encarga de estudiar el origen del calor en el interior de la Tierra, sus manifestaciones en superficie en forma de aguas termales, géiseres, fumarolas y volcanes; y las aplicaciones o utilidades que se le pueda dar a este calor con el fin de satisfacer las necesidades de las comunidades, principalmente en la exploración y explotación energética.

La energía geotérmica es considerada como un tipo de energía limpia, renovable que ha sido una de las fuentes de recurso energético que ha permitido el desarrollo de las comunidades aprovechando el calor que emana de la Tierra, el cual es esencialmente ilimitado y puede utilizarse las 24 horas del día, siendo considerada una fuente renovable competitiva, además su uso no se restringe a la generación de energía, puede ser utilizado en invernaderos, calefacción, agricultura, balneología, acuicultura, entre otros.

Origen del calor en la Tierra

La geotermia tiene su origen en el calor proveniente de la Tierra y la variación de la temperatura con respecto a la profundidad, lo que se conoce como gradiente geotérmico. Según Alfaro et al. (2009), el calor de la Tierra tiene dos orígenes, uno externo y uno interno. El calor externo proviene de la radiación solar mientras que el calor interno tiene varias fuentes, que entre las más importantes se encuentran la desintegración de isótopos radiactivos y el calor remanente de la formación de la Tierra debido a la contracción gravitacional.

Por otro lado, el gradiente geotérmico, como es mencionado antes, hace referencia a la variación térmica con respecto a la profundidad, es decir, a medida que se adentra en el interior de la Tierra, el calor tiende a aumentar, el valor promedio de este aumento se ha medido en 20-30°C/km, cabe resaltar que este aumento no es constante ni continuo en el espacio, "en la corteza, esta variación es más irregular que en el manto y núcleo y registra grandes cambios laterales, lo cual depende en gran medida del contenido de isótopos radiactivos de las rocas, de la tectónica y del régimen hidrológico" (Clauser, 2009 en Alfaro et al., 2009).

La variación en el gradiente geotérmico está controlada por factores como las propiedades litológicas de la zona, la porosidad de la roca, su contenido de agua, su conductividad térmica, la capacidad de almacenamiento de calor. Además en zonas cercanas a actividad volcánica continental se pueden presentar anomalías con respecto al valor promedio del gradiente geotérmico, llegando a tener valores de aproximadamente 200°C/km, esto debido a la presencia de fuentes de calor cercanas a superficie como lo pueden ser las cámaras magmáticas y que, cumpliéndose ciertas condiciones, puede formar reservorios subterráneos de agua caliente, y en superficie es común la presencia o manifestación del recurso en forma de manantiales de agua termal, géiseres y fumarolas.

“El máximo gradiente geotérmico registrado en Colombia, cercano a 140°C/km, corresponde al pozo geotérmico Nereidas-1, del Volcán Nevado del Ruiz” (Alfaro et al., 2009). En la fig. se pueden evidenciar los gradientes geotérmicos medidos en diferentes partes del mundo, con mediciones cercanas al promedio y con algunas anomalías, entre ellas se encuentra el gradiente geotérmico medido a partir de la perforación del pozo Nereidas-1.

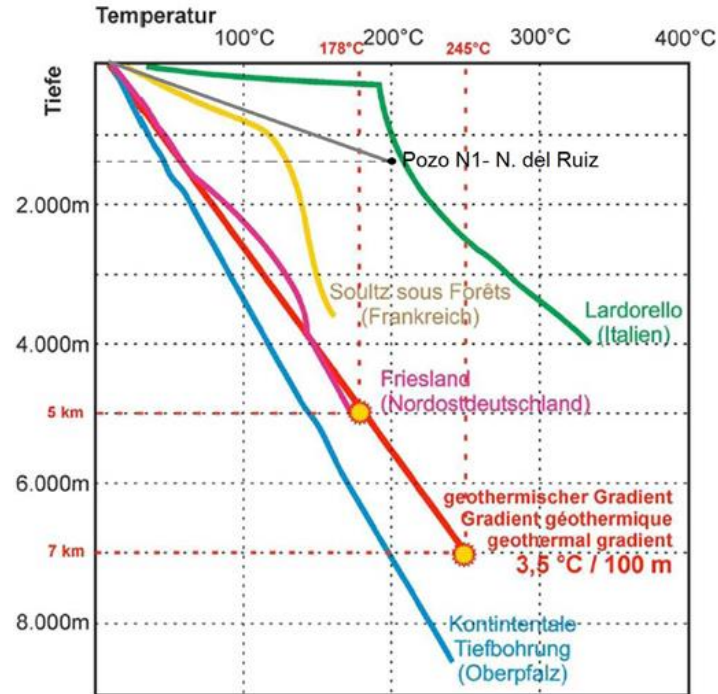


Fig. 3. Gradientes geotérmicos en diferentes zonas del mundo. Modificado de: GEOCOM (s.f.).

Alfaro et al. (2009) citan a Clauser (2009) en temas referentes a la transmisión del calor en la Tierra, la cual se da por tres mecanismos principales los cuales son la conducción térmica, dominante en la litosfera; advección por convección, y la radiación.

Sistema geotérmico

Un sistema geotérmico es la unión de ciertos elementos espacial y naturalmente, que son fundamentales para la formación de un prospecto geotérmico. Los elementos principales mencionados por Marzolf (2014) son:

- Fuente de calor: Generalmente son fuentes asociadas a un origen magmático, ya sea la misma cámara magmática, gases o roca caliente producto de magmatismo, generalmente se encuentran cercanas a superficie, a profundidades mayores a 2 km y a una temperatura de aproximadamente 600°C.

- Reservorio geotérmico: Hace referencia al cuerpo de roca que contiene el fluido y por el cual este puede circular, lo que indica que este cuerpo debe tener una porosidad efectiva y una permeabilidad alta.
- Sistema de suministro de agua: Se refiere a la recarga del reservorio con agua, el cual puede darse por medio de un sistema de fallas o diaclasamiento que permite la circulación del agua hasta el reservorio permitiendo que el recurso permanezca activo a pesar de las pérdidas que pueda tener por la salida en forma de géiseres, fumarolas, manantiales.
- Capa sello: Cuerpo de roca con poca o nula permeabilidad que impide que cubre el reservorio e impide el escape del fluido, conteniendo este a través del tiempo.
- Fluido geotérmico: Hace referencia al agua, vapor, o combinación de ambos que se encuentra en el reservorio, que es calentado, almacenado y que puede aflorar en forma de géiseres, manantiales, etc.

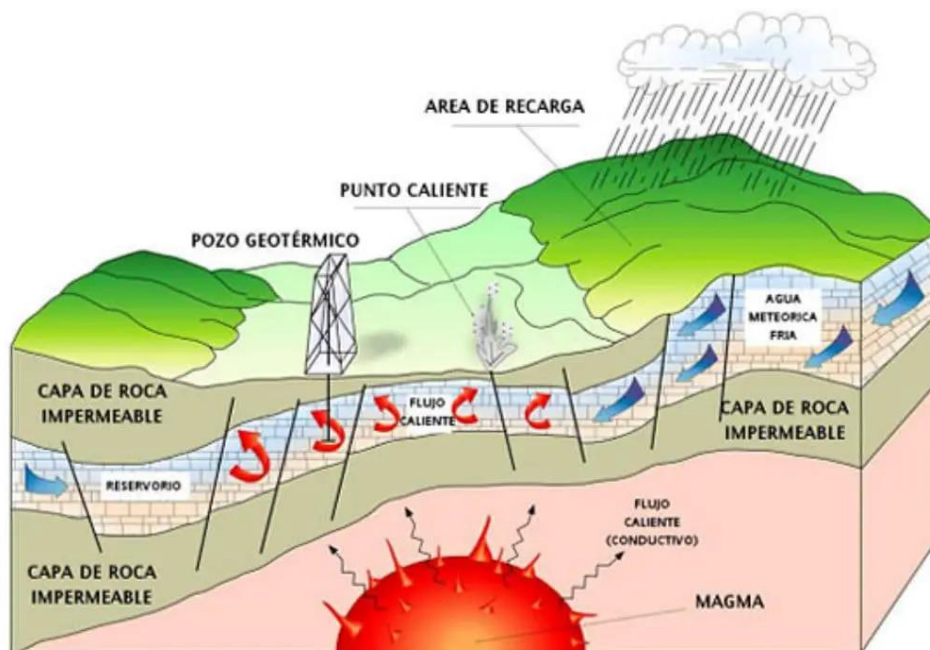


Fig. 4. Esquema de un sistema geotérmico. Tomado de: <https://comofuncionaque.com/como-funciona-la-energia-geotermica/>

Según GEOCOM (s.f.) los recursos geotérmicos pueden presentar algunas manifestaciones en superficie lo que hace más fácil su exploración en etapas iniciales. Algunas de las manifestaciones que ellos mencionan son:

- Géiser: Fuente termal en forma de chorro de agua y gas caliente que es expulsado periódicamente por la acumulación de presión.
- Fumarolas: Vapor y gases emitidos a alta velocidad.
- Aguas termales y piscinas: Hace referencia al agua caliente que fluye a través de fracturas en la roca, o a una depresión en la que se acumula el agua caliente.
- Terraza de sinterización de sílice: Terraza formada por sílice opalino precipitado de aguas de géiseres y aguas termales.
- Área térmica: Se trata del área de suelo calentado o impregnado de las aguas termales, a menudo está desnudo, con poca vegetación.
- Piscina de barro: Piscina caliente en la que la roca adyacente o el suelo se ha disuelto para formar un barro viscoso, generalmente sulfuroso y a menudo multicolor.
- Estera de las algas: Presencia de algas en corrientes calientes. Suelen tener diferentes colores.

7. Antecedentes

CHEC-ENEL (1968) realizaron estudios de reconocimiento geológico para el complejo volcánico Cerro Bravo-Cerro Machín, en donde hacen la descripción litológica de la cobertura volcánica que se encuentra suprayaciendo rocas metamórficas del ahora conocido como Complejo Cajamarca. Además, se realiza un reconocimiento, inventario y clasificación de los manantiales termales de la zona presentando un esquema de circulación de los fluidos desde las partes topográficamente más altas, hasta las zonas más bajas del área de estudio, en donde las fuentes cloruradas se encuentran en las zonas más alejadas, mientras que las aguas sulfatadas se encuentran en las zonas más cercanas al edificio volcánico. Se proponen una posible temperatura del reservorio de 240°C.

ICEL-CHEC (enero del año 1981) realizan un estudio de prefactibilidad denominado “Investigación geotérmica en el macizo volcánico Ruiz” Fase I, en donde se presenta un esquema tectónico del Ruiz y descripción detallada de las unidades litológicas.

CHEC-ENEL (julio del año 1981) en la “Investigación Geotérmica en la Región del macizo Volcánico del Ruiz” destacan la existencia de suficientes evidencias para la exploración en profundidad, a partir de perforaciones en el área, destacando como blanco de perforación los alrededores de la hacienda Botero Londoño, en donde se encontraría una temperatura del reservorio propuesta en 170°C.

CHEC junto con CONTECOL, ICEL y Geotérmica italiana (1983) en la “Investigación geotérmica en el macizo volcánico Ruiz. fase II: Geología e Hidrogeología” destacan que, en general, ambas vertientes del macizo volcánico presentan un intenso hidrotermalismo. Se destaca que, la permeabilidad primaria que presentan las rocas del Complejo Cajamarca es de muy baja

a nula, la cual aumenta debido a la dinámica de grandes fallas, es decir, fracturación secundaria, con posibilidad de albergar un acuífero. Además, se proporciona información detallada de hidrología, geoquímica isotópica y parámetros fisicoquímicos para realizar una clasificación de las aguas según su pH, conductividad, temperatura, concentración de aniones y cationes.

Para 1992, Geoconsul-EPN-Perforadora Latina realizaron un estudio geológico y estructural a nivel regional. En él se hace mención de que las manifestaciones de Las Nereidas y Botero Londoño-El Billar están asociadas a una falla del patrón NW-SE.

En 1997, CHEC bajo su subsidiaria Geoenergía Andina S.A. E.S.P. (GESA) contrató a la empresa Parker Drilling Company International Ltd. para realizar la perforación del primer pozo exploratorio geotérmico en Colombia, llamado pozo Nereidas 1 (N1) ubicado en la finca Pirineos con el objetivo de alcanzar unos 2000 metros de profundidad, a los que se esperaba encontrar el reservorio geotérmico, pero debido a problemas técnicos en la perforación a causa de una desviación fuerte entre 820-860 metros, no se logró el objetivo, alcanzando una longitud total de 1461,5 metros y una profundidad real de 1357 metros, en la que el pozo se encuentra seco y sin permeabilidad, pero con una temperatura en el fondo de ~200°C.

Rodríguez et al. (1997) por parte de INGEOMINAS y por contrato con GESA S.A. E.S.P. realizaron la descripción litológica de la columna estratigráfica del pozo N1 a partir de los ripios y núcleos recolectados durante la perforación. En esta descripción, INGEOMINAS divide la columna en 2 unidades, la primera dominada por rocas ígneas volcánicas como cobertura, seguida por un basamento metamórfico.

En 2002, Alfaro et al. en el “Inventario de fuentes termales en el Parque Nacional Natural Los Nevados (P.N.N.N.)” realizaron una reclasificación de las fuentes termales, que permitió subdividirlos en nueve grupos de manantiales termales distribuidos a lo largo de toda el área del

P.N.N.N. dependiendo de sus características geoquímicas, mostrando a su vez la asociación de las fuentes termales con alguno de los edificios volcánicos del área.

Mejía et al. (2012) realizan un análisis estructural a los alrededores del Volcán Nevado del Ruiz a partir de fotografías aéreas y modelos digitales del terreno que permitan inferir un esquema estructural que explique la presencia de fuentes termales y la circulación de fluidos en general.

Hincapié (2013, 2014) realiza un análisis estructural de las principales fallas presentes en el área de estudio de CHEC con el fin de determinar el control que ejercen los elementos estructurales en la circulación de fluidos hidrotermales en zonas geotérmicas activas como la zona de Nereidas.

En 2013, Dewhurst Group realizó el “estudios de actualización y complementación de potencial geotérmico en la zona de Nereidas del Complejo Volcánico del Ruiz” Fase I, cuyo objetivo principal fue el de discriminar áreas apropiadas basados en las características de las áreas geotérmicas para la generación de energía determinando que la zona de Nereidas es la mayor área de interés.

En 2016, LaGeo realizó una compilación de la información existente sobre la geología, hidrogeología, geoquímica, geofísica con el fin de proponer un modelo geotérmico para el proyecto geotérmico Valle de Nereidas de CHEC. LaGeo propone una temperatura para el reservorio de 240°C basados en geotermómetros analizados en las aguas termales de la zona Botero Londoño, un patrón de circulación del fluido en profundidad que sigue una tendencia SW - NE que va desde la zona de recarga localizada por encima de los 4000 metros de altura hasta la zona de descarga encontrada en Botero Londoño debido a las numerosas manifestaciones encontradas en la zona. Finalmente, con la información recolectada propone una serie de

perforaciones con su respectiva ubicación dentro del área de estudio basado en los análisis mencionados.

En 2016, Dewhurst Group continuó con el trabajo realizado en 2013 “estudios de actualización y complementación de potencial geotérmico en la zona de Nereidas del Complejo Volcánico del Ruiz” Fase II, además se realizó un análisis preliminar de los impactos ambientales que se podrían presentar en el proyecto, concluyendo que los impactos ambientales y sociales serían, en esencia, mínimos y habría mayor problema con la mitigación.

Strycon S.A.S. (2017) realizó estudios de impacto ambiental para el área de estudio y adelantar lapresentación ante CORPOCALDAS, además se propuso un balance hídrico general.

Aricapa, (2020) llevó a cabo una serie de análisis recopilatorios y de campo de la composición geoquímica de las diferentes aguas termales en el área de Nereidas y Santa Rosa de Cabal con el fin de mejorar el modelo geoquímico y complementarlo para identificar zonas de interés geotérmico. En su análisis determina que la temperatura aumenta en dirección E a W, es decir, a medida que se acerca al edificio volcánico. Las aguas termales en el sector occidental muestran altas concentraciones de sales disueltas, y viajan varios kilómetros en profundidad antes de emanar y perder su calor por el ascenso y la mezcla con aguas meteóricas. “su ciclo químico lo inicia como aguas bicarbonatadas, pasando a aguas sulfatadas y posteriormente cloruradas” Aricapa (2020).

Román (2021) adelantó estudios climatológicos de la zona de estudio para proponer un balance hídrico a la zona de estudio y así determinar y llegar a tener mayor conocimiento de las dinámicas de recarga y descarga de la zona. Con este estudio se pudo determinar que la zona presenta dos temporadas lluviosas y dos de sequía al año, con una zonificación climática que va de fría a templada con un rango de temperaturas entre los 5,20°C y 18,87°C. También en este

estudio se desarrolló la medición de los caudales de descarga de aguas termales en la zona de Botero Londoño, en donde se obtuvo un promedio de 80,9 L/s de aguas termales que afloran por cada manantial y se mezclan directamente con las quebradas Nereidas, El Billar y Río Claro.

Posterior a la perforación, el pozo N1 no fue objeto de nuevos análisis, además se desconoce la integridad estructural del mismo. Solo hasta 2022, a partir del convenio entre la Universidad Autónoma de Manizales (UAM) y la CHEC, se viene adelantando un proyecto bajo el nombre de “Análisis técnico económico de un sistema de intercambiador de calor de pozo profundo, para alimentar sistemas de producción de electricidad y usos directos del calor, extrayendo la energía geotérmica disponible: caso pozo Nereidas 1. Manizales. Colombia” en donde Murcia & Jiménez (2022) realizaron un análisis de las condiciones actuales de la cabeza y las válvulas del pozo después de pasar varios años bajo las condiciones de intemperie. Adicional a esto, se realizó una medición de gases en donde se concluyó que no hay una fuente contaminante que pueda poner en peligro la vida humana y la atmósfera.

8. Marco geológico

8.1 Geología Regional

El vulcanismo en la Cordillera de los Andes es dividido en cuatro provincias, entre Colombia y Ecuador se encuentra la Zona Volcánica Norte representando la cadena volcánica activa más al norte de la cordillera en Sudamérica (Bourdon et al., 2003). En esta región orogénica se presenta un ambiente vulcano-tectónico complejo caracterizado por una sismicidad recurrente y actividad volcánica reciente. Estos fenómenos son el resultado de la interacción entre las placas Sudamericana, Caribe, Nazca y otras placas menores o microplacas, presentes en esta región debido a la convergencia entre ellas (Freymueller et al., 1993; Mejía et al., 2012; Taboada et al., 2000) originando así la orogenia Andina que, para Colombia, se caracteriza por la división de la cadena montañosa en tres sub-cordilleras: la Occidental, la Oriental y la Central que, al parecer tiene características que la hacen parecer la continuación hacia el norte de las rocas del basamento de los Andes ecuatorianos (Irving, 1971).

Algunas de las grandes fracturas que actúan localmente como fallas activas o sismogénicas, se concentran en corredores tectónicos de dirección general NNE a NNW (Irving, 1971). En el bloque andino se destaca su separación en dos grandes dominios por un sistema de fallas paralelas a sub-paralelas, localmente trenzadas, denominadas, Sistema de Fallas Romeral (Paris & Romero, 1994), esta zona de falla (de hasta 30 km de ancho) se divide en tres ramificaciones, la Falla de San Jerónimo, la Falla Silvia-Pijao y la Falla de Cauca-Almaguer (Villagómez et al., 2011). Al oriente de la falla se encuentran rocas continentales precámbricas y paleozoicas que conforman la Cordillera Central (Case et al., 1971), en contacto con rocas de afinidad oceánica de edad mesozoica al occidente que conforman la Cordillera Occidental (Meissnar et al., 1976).

Litológicamente, el área de estudio está dominada por unidades metamórficas e ígneas con diferentes grados de deformación (González, 1993). Rocas metamórficas precámbricas y paleozoicas que forman el basamento de la Cordillera Central de Colombia que fueron intruidas por batolitos cuarzodioríticos mesozoicos y fueron el sitio del vulcanismo Terciario (Case et al., 1971). En el núcleo de la Cordillera Central se encuentra el Complejo Cajamarca, que data del Paleozoico Inferior, comprende un paquete metamórfico compuesto por esquistos cuarzo-sericíticos, esquistos verdes, filitas, cuarcitas y mármoles (Maya & González, 1995) que, a partir de evidencias radiométricas han estado sometidas a más de un evento metamórfico (González, 1993). Al occidente de la zona de falla de San Jerónimo se encuentra el Complejo Quebradagrande, caracterizado por intercalaciones de rocas volcánicas y sedimentarias de edad Cretácico (Maya & González, 1995).

Además, se han descrito otras litologías que conforman el basamento, identificadas como la Milonita Granítica del Guacaica (López et al., 2007) y cuerpos intrusivos como el Batolito de El Bosque (Barrero & Vesga, 1976) y la Tonalita – Granodiorita de Manizales (González, 1993; Mosquera, 1978; González & Londoño, 2002; López & Aguirre, 2005; Plazas, 2010). Estas rocas presentan una cobertura discordante a partir de depósitos piroclásticos y flujos de lava producidos principalmente por la actividad de los volcanes Cerro Bravo, Santa Isabel y Nevado del Ruíz. (Mejía et al., 2012).

La Provincia Volcano Tectónica San Diego – Cerro Machín (Martínez et al., 2014) cuyo origen está asociado a la actividad magmática en el Plio-Cuaternario (Bourdon et al., 2003), se extiende sobre el eje de la Cordillera Central y comprende al menos nueve estructuras volcánicas poligenéticas las cuales son, de sur a norte: Cerro Machín, Nevado del Tolima, Paramillo del Quindío, Paramillo de Santa Rosa, Nevado de Santa Isabel, Paramillo del Cisne, Nevado del Ruiz,

Cerro Bravo y Romeral (Arango et al., 2017), además de otras estructuras volcánicas menores y estructuras volcánicas monogenéticas entre los que se destaca el Campo Volcánico Monogenético Villamaría – Termales (Botero et al., 2018; Osorio et al., 2018) y otras estructuras poco estudiadas.

Las estructuras que conforman el Complejo Volcánico Nevado del Ruiz se relacionan entre sí por varios sistemas de fallas regionales interceptándose en el área de estudio (Palestina, San Jerónimo, Río Arma, Villamaría – Termales, Santa Rosa, Ibagué, Nereidas y Mulatos), generando zonas compresivas y distensivas que han favorecido la actividad volcánica y por ende han sido determinantes en la configuración geomorfológica del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. (Martínez et. al, 2014).

La historia eruptiva del Volcán Nevado del Ruiz comenzó hace 1.8 Ma y ha pasado por tres estados eruptivos mayores que constituyen procesos alternados de construcción y destrucción del edificio volcánico, estos tres estados son el Ruiz ancestral, Ruiz viejo y Ruiz presente (Thouret et al., 1990). Por otro lado, Martínez et al. (2014), determinan cuatro periodos eruptivos para la historia del CVNR: Periodo eruptivo PRE-Ruiz (PRE-Ruiz), Primer Periodo Eruptivo Ruiz (PER), Periodo Eruptivo Intermedio Ruiz (INTER) y Segundo Periodo Eruptivo Ruiz (SER) (Aricapa, 2020).

Este complejo es una de las áreas de mayor interés para la producción geotérmica a partir de recursos de alta entalpía. La reciente historia eruptiva del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz y la presencia de aguas termales, fumarolas y alteraciones hidrotermales poco profundas atestiguan la existencia de recursos geotérmicos con características adecuadas para la generación de electricidad (Oviedo et al., 2023).

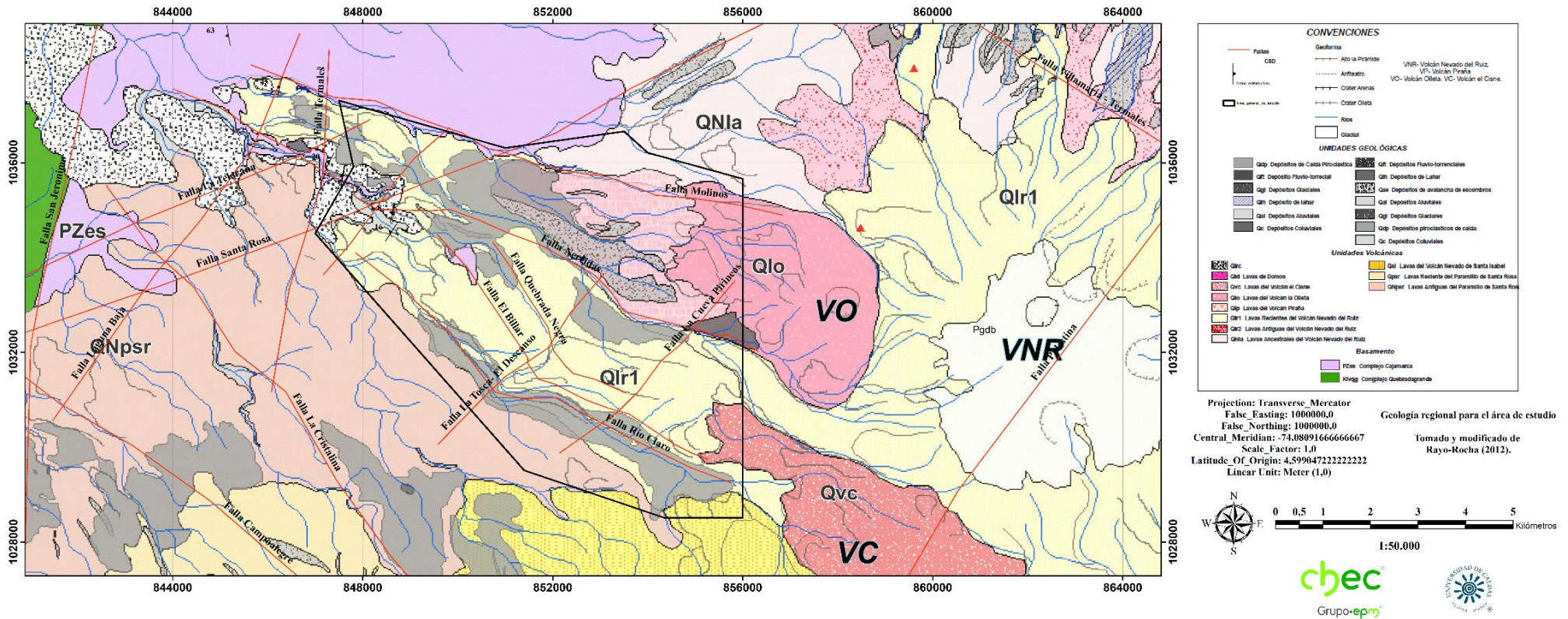


Fig. 5. Mapa de la geología regional. Tomado y modificado de: Rayo-Rocha (2012)

8.2 Geología Local

8.2.1 Complejo Cajamarca (Pev | Pes)

Nelson (1957), propone el nombre de Grupo o Serie de Cajamarca para una serie de esquistos de bajo a medio grado intercalados con rocas diabásicas y, con una cobertura volcánica a partir del neovulcanismo en la Cordillera Central.

Maya & González (1995) proponen el nombre de Complejo Cajamarca definiéndolo como la agrupación de unidades precámbricas-paleozoicas compuesta por esquistos cuarzo-sericíticos, esquistos verdes, filitas, cuarcitas y franjas de mármoles que afloran en la sección Cajamarca - Alto de La Línea entre las Fallas Otú-Pericos y Chapetón Pericos, y la Falla Aranzazu Manizales que presenta edades de metamorfismo entre el Paleozoico y el Cretácico, indicando la ocurrencia de varios eventos de metamorfismo.

Por otra parte, Gómez y Núñez (2003) plantearon una edad paleozoica para el Complejo Cajamarca, estudios posteriores realizados por Vinasco et al. (2006) establecieron una edad Permo-Triásica para el mismo. Blanco-Quintero et al. (2014) proponen una edad para el evento de metamorfismo que dio lugar a este complejo entre 146-157 Ma, mediante el método de Ar-Ar.

En el área de estudio, esta unidad puede encontrarse aflorando a lo largo de la vía “Ruta del Condor”. Es importante mencionar que, debido a la cobertura vegetal, los afloramientos son escasos. Algunos sectores notables donde se pueden hallar afloramientos están ubicados unos kilómetros más adelante del sector conocido como Barro Azul, que corresponde al trazo de la Falla San Jerónimo. Además, se pueden encontrar afloramientos de esta unidad alrededor de los principales cauces, como el Río Claro, Río Molinos, Q. Nereidas y Q. El Billar.

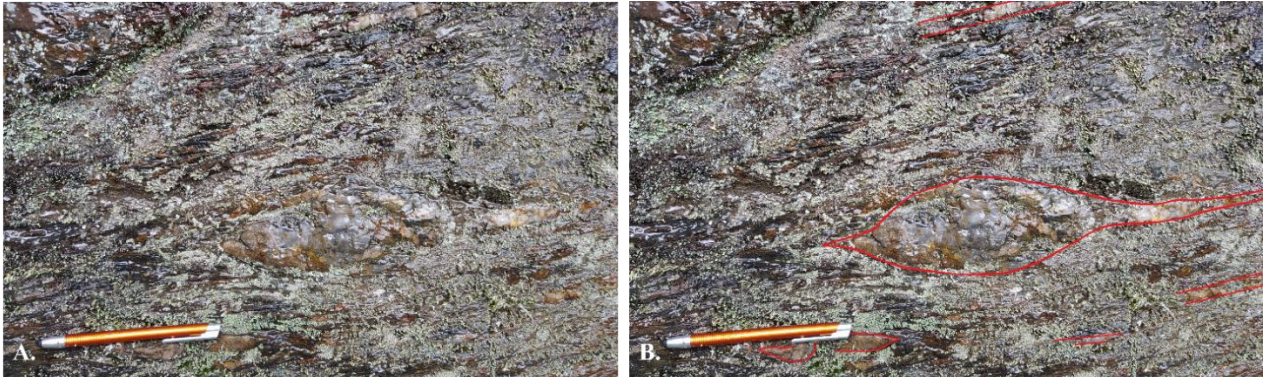


Fig. 6. (A) Afloramiento de esquistos negro sobre el camino a la Hacienda El Termal. (B). Representación de las venas y lentes de cuarzo entre la foliación del esquistos negro

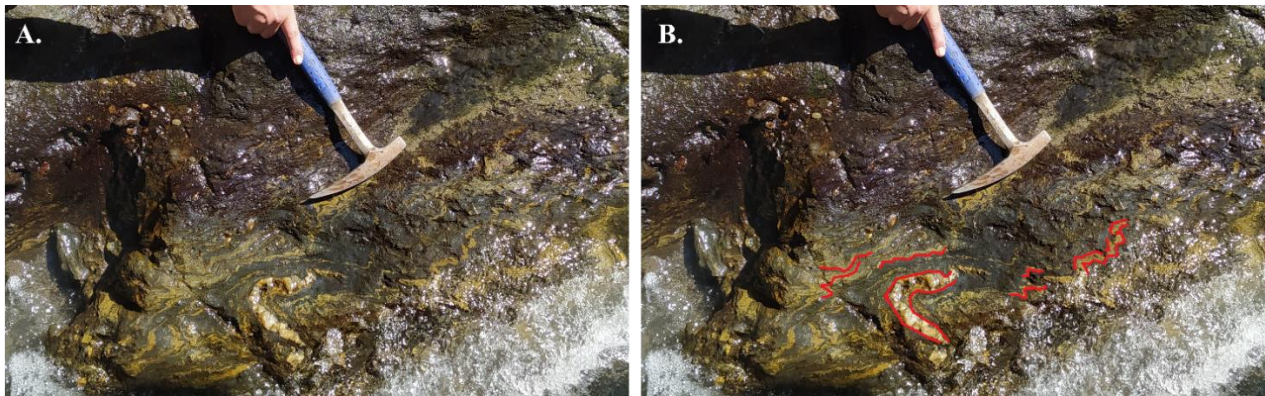


Fig. 7. (A). Afloramiento sobre la Q. Nereidas. (B). Representación del microplegamiento asimétrico y lentes de cuarzo entre la foliación del esquistos negro.

En muestra de mano (fig. 8), esta unidad corresponde a esquistos negros y verdes de tamaño de grano fino, medianamente meteorizado, en algunos sectores la roca presenta microplegamientos en la foliación y la presencia esporádica de lentes de cuarzo. Los esquistos negros varían en contenido de grafito y sericita por lo que es posible encontrarlos con diferentes tonalidades y con diferente carácter al tacto.



Fig. 8. (A). Muestra de mano del esquistos verde en contacto con el esquistos negro tomada en el cauce de la Q. El Billar. (B). Muestra de mano del esquistos negro tomada en el cauce de la Q. El Billar. (C). Esquistos negro mineralizado, visto con lupa de aumento 30x, muestra tomada en el cauce de la Q. El Billar.

8.2.2 Complejo Quebradagrande (Ksc | Kvc):

Descrito inicialmente por Grosse (1926) como derrames volcánicos y tobas intercalados con sedimentos marinos de edad triásico superior a cretácico superior, fue llamado en un principio como Formación Porfirítica. Posteriormente, Botero (1963) pasaría a llamar a esta unidad como Formación Quebradagrande, por otro lado, González (1980) divide esta formación según la litología predominante en dos miembros, uno sedimentario y uno volcánico. Maya & González (1995) la describen como los litodemas volcánico y sedimentario que aflora entre las unidades metamórficas del Complejo Cajamarca y el Complejo Arquía en la Cordillera Central, con límites tectónicos al oriente por la Falla San Jerónimo y al occidente por la Falla Silvia-Pijao con edades entre Aptiano y Albiano debido al contenido fósil en el miembro sedimentario. Además, se hace mención de datos isotópicos que señalan edades desde el Cretácico Temprano hasta el Cretácico

Tardío, interpretándolo como la edad magmática que representaría un evento metamórfico de muy bajo grado en la facies Prehnita-Pumpellita.

González (2001) hace una breve descripción de los miembros que componen esta unidad de la siguiente manera:

- Miembro volcánico: constituido principalmente por espilitas, basaltos y diabasas de características toleíticas con brechas de flujo y tobas. La edad en secuencias de sedimentos intercalados corresponde al Cretácico Inferior, Aptiano-Albiano.
- Miembro sedimentario: Corresponde a lutitas carbonosas, arenas feldespáticas, limolitas, grauvacas y pequeñas capas de caliza. Las edades asignadas por fósiles indican un rango entre el Cretácico Inferior.

Por su parte, Moreno-Sánchez (2008) establece que el Complejo Quebradagrande queda constituido por rocas metasedimentarias de origen marino, metavolcánicas, y un basamento oceánico constituido por rocas ultrabásicas e intrusivos básicos.

Afloramientos de esta unidad se pueden encontrar en el sector de Barro Azul (fig. 9) accediendo por la vía “Ruta del Cóndor”.



Fig. 9. Afloramiento correspondiente al Complejo Quebradagrande en el sector de Barro Azul.

En este sector se puede apreciar un terreno desestabilizado en donde hay un afloramiento altamente deformado y con muchas fracturas, esto debido a que en este punto corresponde al trazo de la Falla San Jerónimo en el terreno. En muestra de mano (fig. 11), estas rocas corresponden a lodolitas negras con bajo grado de metamorfismo, con la presencia de microplegamientos, algunas muestras se encuentran mineralizadas.



Fig. 10. (A). Afloramiento de lodolitas en el sector de Barro Azul. (B). Microfractura.



Fig. 11. (A). Muestra de mano de lodolitas negras con microplegamientos tomada en el sector de Barro Azul. (B). Lodolita negra mineralizada, visto con lupa de aumento 30x.

8.2.3 Flujos Andesíticos (NgQa | Qa)

González (2001) hace mención a estos flujos andesíticos como rocas extrusivas de gran espesor que descansan sobre el basamento de la Cordillera Central (Rocas metamórficas e intrusivos). Están relacionadas con la actividad volcánica iniciada en el Mioceno hasta el reciente producido por el complejo volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín.

La historia eruptiva del Volcán Nevado del Ruiz ha sido descrita por varios autores (Herd, 1974; CHEC, 1983; Thouret et al., 1985; Thouret et al., 1990; Schaefer, 1995; González, 2001; Martínez et al., 2014) quienes describen la litología en función de los diferentes eventos eruptivos del Nevado del Ruiz o en función de sus productos volcánicos o sus dataciones, lo que ha llevado a definir diferentes etapas eruptivas a lo largo de la historia eruptiva que, en general, se coincide que comienza hace 1.8 Ma (Thouret et al., 1990).

González (2001) hace una división en dos períodos de emisión asociando los productos volcánicos con la evidencia de afecciones producto de la actividad glaciaria. El primero, denominado Flujos Andesíticos-Dacíticos del Mioceno – Plioceno (NgQa) corresponde a coladas de lava superpuestas que se extienden por varios kilómetros alrededor del centro de emisión generando bloques masivos que pueden presentar estructuras columnares (fig. 12). Composicionalmente varían de andesitas a dacitas, asignando su edad al periodo preglaciario.



Fig. 12. (A). Estructuras de diaclasamiento columnar sobre el manantial La Poa-La Piscina. (B). Bloque con diaclasamiento columnar rodado alrededor del manantial La Poa-La Piscina de tonalidades grises; textura porfirítica de grano medio a grueso, matriz holohialina, con fenocristales de Plg, Anf. Clasificada macroscópicamente como Andesita

El segundo período de emisión lo denomina Flujos andesíticos recientes (Qa) debido a su composición predominante y se presentan formando domos volcánicos que no muestran evidencias de haber sido afectados por procesos glaciares del Pleistoceno, a este período pertenece la etapa inicial de formación del volcán La Olleta (Martínez et al., 2014).

8.2.4 Depósitos de flujo de lodo volcánico (Qfl)

González (2001) los describe como producto de la actividad volcánica reciente del complejo volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín, que son depositados en medio acuoso el cual lo transporta y los deposita a lo largo de los cauces tan al oriente como al occidente del foco de emisión y su edad es relacionada con eventos que varían entre Pleistoceno y Holoceno, predominando la presencia de flujos del Holoceno hasta la actualidad.

Martínez et al. (2014), hace un recopilatorio de trabajos relacionados con los depósitos

de lahar, describiendo el fenómeno como un evento importante asociado a la actividad del Volcán Nevado del Ruiz, a lo largo de su historia eruptiva. Monsalve & Méndez (1989) describen estos flujos como depósitos caóticos, compuestos de cantos subredondeados a redondeados de rocas volcánicas en una matriz de lodo, generalmente matriz soportados, aunque localmente se encuentran partes clasto soportados. Además, hacen mención al flujo de lodo que se encuentra en el sector de Playa Larga, asociándolo con deshielos y erupciones ocurridas entre 70.000 y 18.000 años.

8.2.5 Depósitos piroclásticos (Qto)

González (1993) describe estos depósitos para el Volcán Nevado del Ruiz como productos relacionados a una actividad explosiva moderada. La Ignimbrita de Río Claro, descrita inicialmente por CHEC (1983) como Toba de Nereidas, hace referencia al depósito de un flujo piroclástico de gran espesor que se encuentra rellenando los valles de Río Claro, Río Molinos y Q. Nereidas desde su parte media alta. Posterior a esto, Grand & Handszer (1989) hacen una caracterización de esta unidad proponiendo el nombre de Ignimbrita de Río Claro – Molinos debido a que aflora principalmente en las cuencas de estos drenajes. Este depósito fue clasificado como una toba soldada, cristalovítrea, con fragmentos de pómez, escorias y fragmentos líticos de rocas volcánicas de composición andesítica y de rocas metamórficas, en su máximo espesor alcanza los 350 metros. Asocian su origen a un colapso de una columna eruptiva (Martínez et al., 2014). Se presenta generalmente como una sola unidad de flujo masivo y localmente con diaclasamiento columnar (Monsalve & Méndez, 1997).

Borrero et al. (2006) propone un origen para esta unidad a partir de una erupción freatomagmática debido a la acumulación de gas en algunas áreas alrededor del cráter del volcán

produciendo inestabilidad en el sistema volcánico-magmático-hidrotermal. Schaefer (1995) data esta unidad por método Ar/Ar en 89 Ka (Martínez et al., 2014).

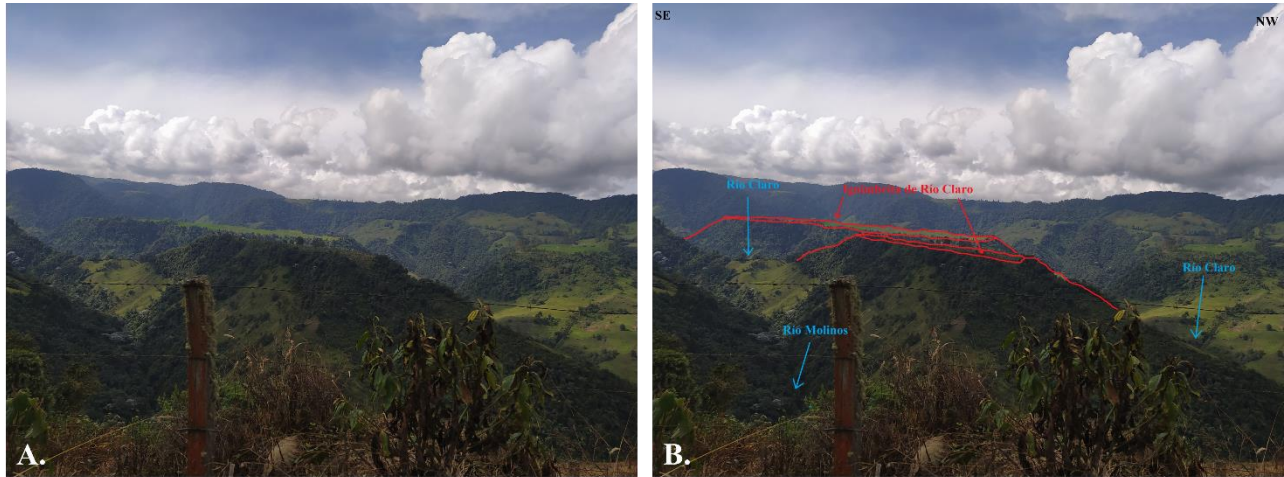


Fig. 13. (A) Ignimbrita de Río Claro desde la vía Ruta del Cóndor, después de la vereda Papayal. (B). Representación de la morfología plana o en terrazas que forma esta unidad que se encuentra disectada por Río Claro.

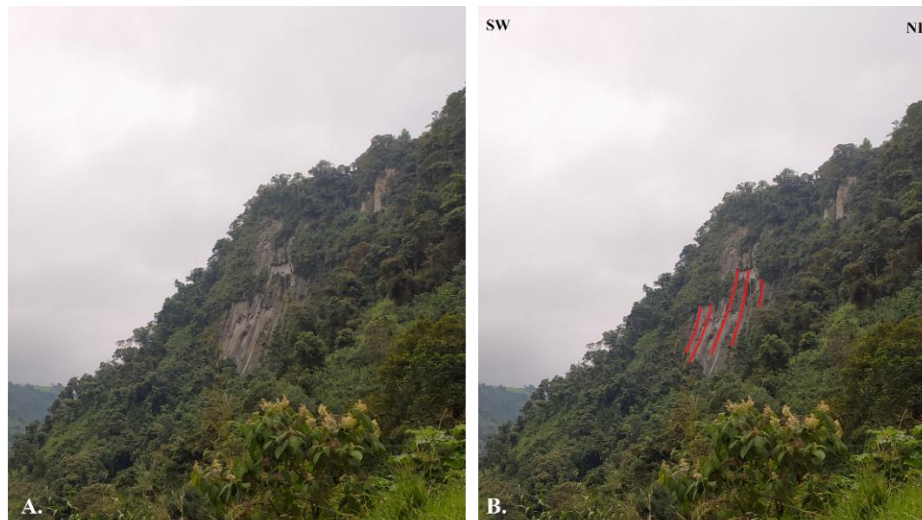


Fig. 14. (A). Depósitos volcánicos con diaclasamiento columnar sobre la finca Laguna Alta, camino a Río Claro. (B). Representación del diaclasamiento columnar sobre los depósitos volcánicos.

Existe otra unidad en el área de estudio identificada como un depósito de flujo piroclástico en el sector de San Antónío denominada como Ignimbrita Pico Terrible por Grand & Handszer (1989) y descrita por Monsalve & Méndez (1997) como un depósito caótico, de color gris a habano claro, con diferentes grados de compactación, presenta texturas eutaxíticas, dadas por fragmentos

de vidrio fiamme. Está constituido por fragmentos vesiculados, líticos de rocas volcánicas y en menor proporción de rocas metamórficas. Grand & Handzer (1989) proponen una edad inferior a la de la Ignimbrita de Río Claro, asociándolo a un evento eruptivo más reciente (Martínez et al., 2014).

8.2.6 Depósitos glaciares (Qg)

González (1993) hace mención a las geoformas glaciales aún reconocibles alrededor del Nevado del Ruiz por debajo de los 4500 m.s.n.m. (nivel de nieves perpetuas) como circos, valles en “U”, morrenas laterales y terminales, y rocas estriadas en las paredes de las artesas.

Herd (1974), en González (2001), menciona por encima de los 4000 m.s.n.m. no existe la capa de piroclastos del Pleistoceno tardío – Holoceno, por el contrario, se encuentran rocas desnudas, estriadas y una acumulación de cantos de rocas andesíticas, cenizas, lapilli pumítico retrabajado. González (2001) describe estos depósitos como bloques de lavas andesíticas y andesitas basálticas en una matriz areno-arcillosa de color amarillo a blanco amarillento.

8.2.7 Depósitos aluviales y coluviales (Qar)

Martínez et al. (2014), hace mención sobre la posición de los depósitos aluviales emplazados a lo largo de los drenajes que nacen den el Complejo Volcánico Nevado del Ruiz formando barras y terrazas. González (2001) los describe como depósitos no consolidados de poco espesor transportado por el lecho de los ríos y quebradas de la zona y está compuesto por bloques y gravas de diferentes tamaños en matriz areno-arcillosa con diversos grados de cementación o compactación, de edad Holoceno.



Fig. 15. (A). Depósito aluvial de Río Claro no consolidado, matriz soportada, mal seleccionado, con partículas tamaño grava subredondeados a subangulares compuesta por fragmentos de roca metamórfica (esquistos verdes, esquistos cuarzo-sericíticos), ignimbrita y andesitas oxidadas. (B). Terraza aluvial de Río Claro

La geología del área de estudio puede resumirse en dos unidades principales, según lo propuesto el informe presentado por Rodríguez et al. (1997) donde se realiza una descripción de la geología del pozo Nereidas 1. La primera unidad consiste en productos volcánicos con un espesor aproximado de ~780 metros de espesor. Esta unidad se compone, de superficie a profundidad, por una capa de ~30 metros de depósitos de roca piroclástica poco alterada, seguido de flujos andesíticos de ~160 metros con variaciones mineralógicas y alteración. A una profundidad de 480 metros, dominan los flujos de composición dacítica con un espesor de 297 metros. Esta unidad volcánica actúa como cobertura sobre el basamento metamórfico.

La segunda unidad está compuesta por rocas metamórficas que forman el basamento de la Cordillera Central y pertenecen al Complejo Cajamarca. Esta unidad comienza a partir de los 780 metros de profundidad, se describen rocas como esquistos moscovíticos con diferentes contenidos de grafito, esquistos verdes, cuarcitas, gneiss y filitas.

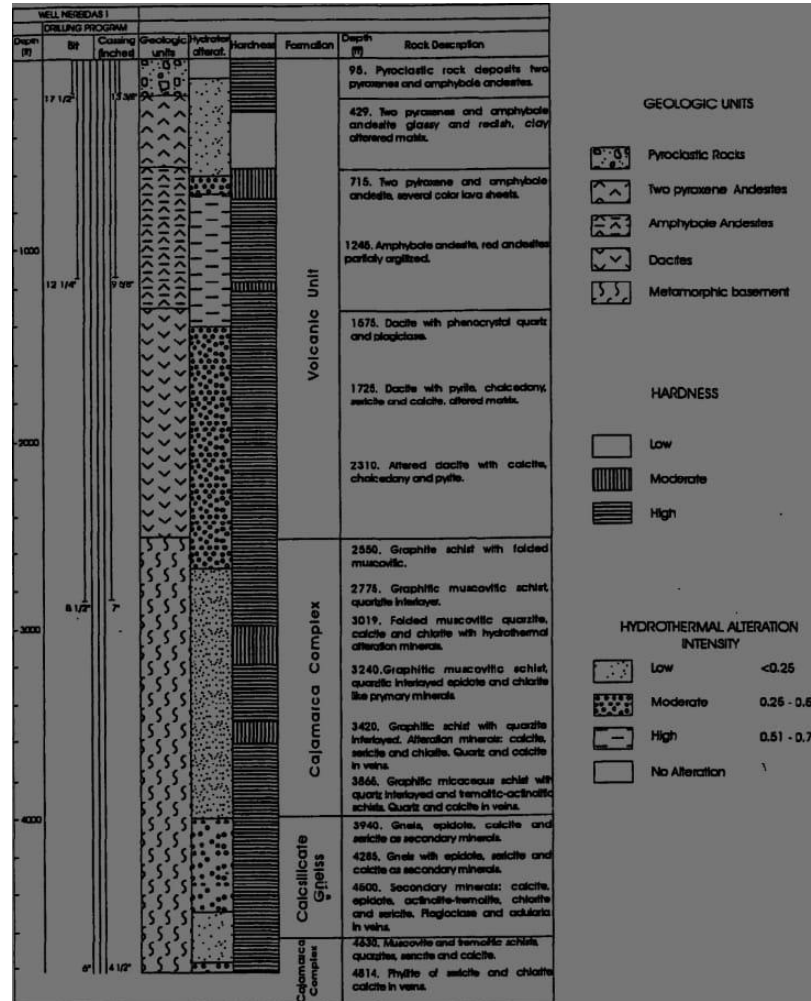


Fig. 16. Columna estratigráfica del pozo Nereidas 1 (N1). Tomado de: Rodríguez et al. (1997).

8.3 Geología Estructural

El área de estudio se caracteriza por la presencia de una circulación hidrotermal activa y fósil, controlada por diversos elementos estructurales como las fallas y zonas de falla, así como por los patrones o enjambres asociados a ellas (Hincapié, 2013). Es importante resaltar que gran parte de los volcanes presentes en el área son estrato-volcanes con actividad histórica y generalmente localizados en intersecciones de fallas, entre las cuales se destacan los patrones correspondientes a la Falla de Palestina, uno de orientación NW-SE a E-W y otro N-S, ambos relacionados con la presencia de diferentes grupos de fuentes termales y la posible formación de reservorios geotérmicos de fisura (Alfaro et al., 2002).

Las fallas con dirección NW-SE en el flanco occidental del Nevado del Ruiz se reconocen especialmente por el control que ejercen sobre los canales de los ríos Campoalegre, San Eugenio, San Ramón, Campoalegrito, Nereidas y Río Claro, dando origen a sus nombres. Además, estas fallas tienen control sobre las fuentes termales localizadas en el área de San Vicente, Santa Rosa y Botero Londoño. (Mejía et al., 2012).

Hincapié (2013, 2014) destaca la acción de un bloque indentador (Bloque Chocó-Panamá) sobre la placa Sudamericana, lo que ha generado el desarrollo de dos sistemas de fallas transcurrentes conjugadas. Uno de ellos es representado por la dirección NW-SE, incluyendo la Falla Murindó, Falla Arma, Falla Salento, y las fallas en el área de estudio como la Falla Villamaría-Termal, Falla Río Molinos, Falla Río Claro, Falla Nereidas, entre otras. Un segundo sistema con una orientación de NE-SW, que incluye las fallas Santa Rosa, Falla La Telaraña, Falla Ibagué, entre otras. Se concluye que en el flanco occidental del VNR coexisten al menos tres sistemas de fallas predominantes en el área de estudio, el tercer patrón en el área de estudio

tiene una dirección NNE – SSW a N-S (Falla Laguna Baja y Falla La Tosca-El Descanso), siendo el patrón NW-SE el más importante, controlando estructuralmente los drenajes Río Claro, Río Molinos y Quebrada Nereidas y, albergando una gran concentración de manifestaciones hidrotermales circulando a través del diaclasamiento producido por estas fallas.

Hincapié (2013) también menciona que la Falla Río Claro presenta un movimiento esencialmente transcurrente sinistral y dirige el ascenso de las aguas termales en sitios como Q. La Negra y La Piscina. Por otro lado, la Falla Nereidas tiene un movimiento transcurrente sinistral con una componente menor normal, desempeñando un papel crucial en la circulación hidrotermal de la zona ya que está asociado a tres campos de géiseres: el campo de la azufrera, el campo de la Q. El Billar y el campo de la Q. Nereidas. En este último sitio, la Falla Santa Rosa juega también un papel importante en la intersección de las dos, cerca de la cascada Nereidas.

Además, Hincapié (2013) plantea que en la zona del Hostal La Quinta se podría dar un comportamiento de “válvula de falla”, donde los fluidos sobrepresionados generan fracturamiento en la roca sello del sistema geotérmico, y en combinación con la actividad de las fallas de la zona, se generan espacios abiertos para la llegada de fluidos hidrotermales a superficie posibilitando la generación de campos de géiseres y manantiales geotérmicos.

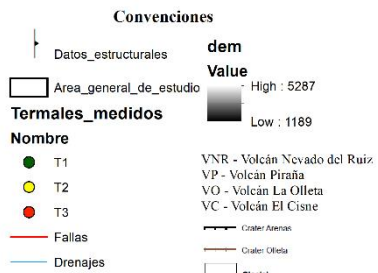
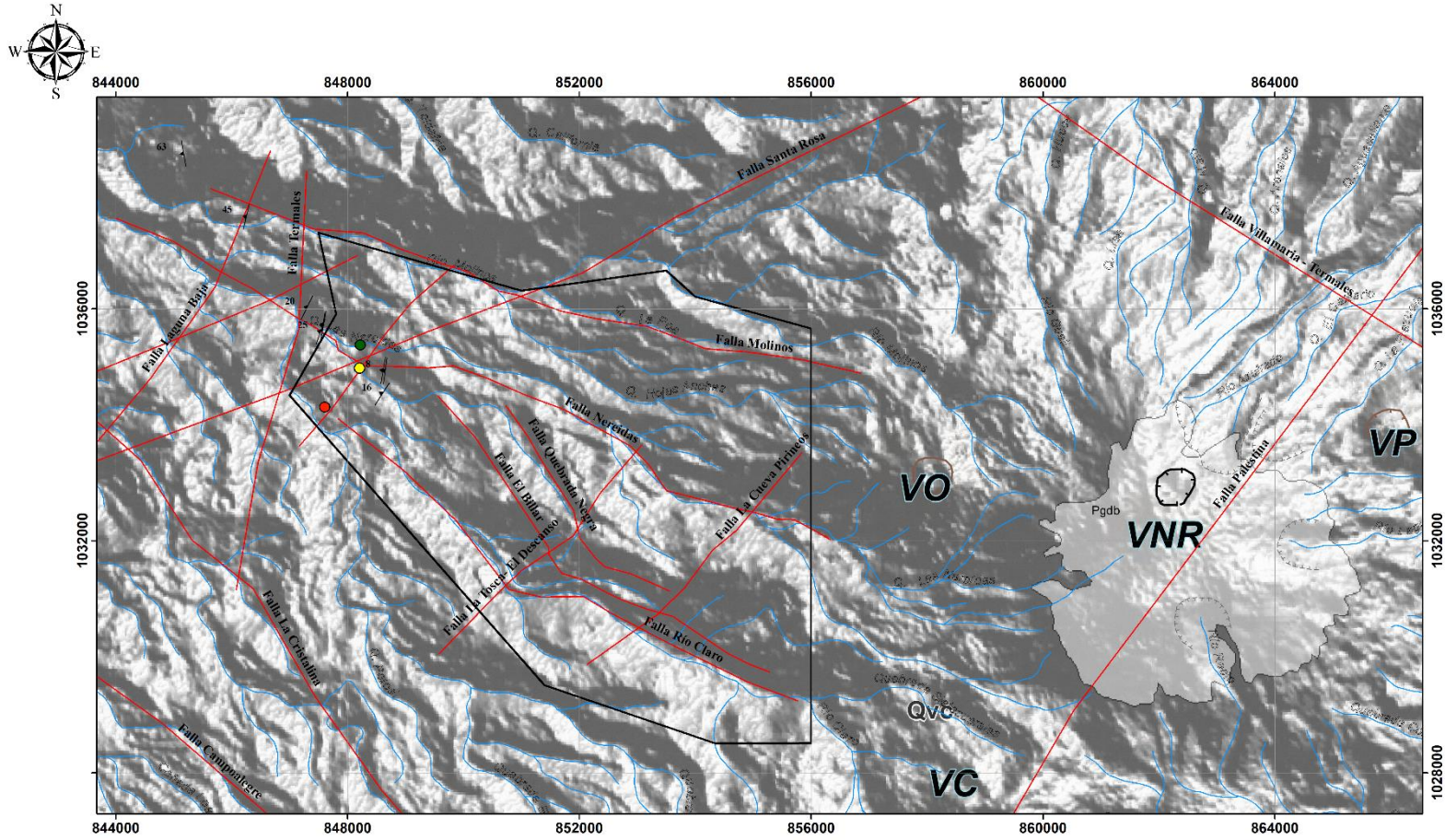
Hincapié (2014) considera relevante mencionar las intersecciones entre las fallas NW-SE y las fallas de rumbo NE-SW pueden generar sintaxis tectónicas tanto contraccionales como dilatacionales, lo que las convierte en zonas de interés para exploración geotérmica profunda.

En cuanto al fluido geotérmico, LaGeo (2016) menciona que el sistema de fallas cuya orientación es NW-SE se relaciona con un proceso de extensión en el contexto tectónico del VNR. En donde se presume, por un lado, que este sistema tiene permeabilidad potencial mayor que los sistemas regionales a través de la porosidad secundaria asociada al proceso de extensión.

Por otro lado, existe una relación estrecha entre los focos termales y el sistema de fallas geológicas de rumbo NW-SE ya que son las que controlan fundamentalmente el movimiento de los fluidos calientes en profundidad, desde la zona de recarga hasta la zona de descargar. Es decir, la zona de recarga está asociada, en cierta parte, a la permeabilidad generada por las fallas asociadas a la cadena volcánica, mientras que la zona de descarga, que se asocia con las fuentes termales de Botero Londoño, El Billar, La Piscina, entre otras, son alimentadas a través de las fallas NW-SE.

Como mencionan Londoño & Sudo (2002), existe un sistema convectivo grande interactúa con los cuerpos magmáticos, mientras su patrón de flujo es estructuralmente controlado por los planos de las fallas Nereidas, Rio Molinos, Santa Rosa y Termales Villamaría.

LaGeo (2016) también hace mención de que los otros sistemas de fallas como NE-SW y NNE-SSW, pueden contribuir también de alguna manera en el movimiento de los fluidos, principalmente en las zonas donde se intersectan con las estructuras del sistema NW-SE.



Projection: Transverse_Mercator
False_Easting: 1000000,0
False_Northing: 1000000,0
Central_Meridian: -74,0809166666667
Scale_Factor: 1,0
Latitude_Of_Origin: 4,599047222222222
Linear Unit: Meter (1,0)

Geología estructural para el área de estudio

Datos proporcionados por
CHEC S.A. E.S.P.

Tomado y modificado de
Rayo-Rocha, 2012.

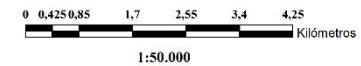


Fig. 17. Mapa de la geología estructural. Tomado y modificado de: Rayo-Rocha (2012).

9. Hidrología

"La hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su origen, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente" (Béjar, 2004).

Según OLADE (1994), el marco hidrológico general del área en la que se encuentra el yacimiento, debe ser tenido en cuenta en un estudio de las manifestaciones termales superficiales, ya que este debe estar dentro de un sistema hidrológico que permita su recarga.

En este contexto, entender el ciclo hidrológico, que representa el sistema de circulación desde los océanos y mares hacia la atmósfera y de allí hacia los continentes y viceversa (Universidad de Medellín & AGEOCOL, 2023), dentro del área de interés permite construir un modelo hidrológico e hidrogeológico que permita entender cómo se relacionan todos estos factores y el efecto que tienen sobre el sistema geotérmico.

Para este trabajo, se realiza un estudio hidrológico básico de la subcuenca de Río Claro con el fin de comprender el contexto hídrico en el que se desarrolla el sistema geotérmico. La subcuenca está ubicada dentro de la cuenca del Río Chinchiná, abarcando un área de 244.58 km² dentro de esta; el territorio es generalmente montañoso y abarca alturas entre los 1390-5262 m.s.n.m. según el POMCA del Río Chinchiná (2013).

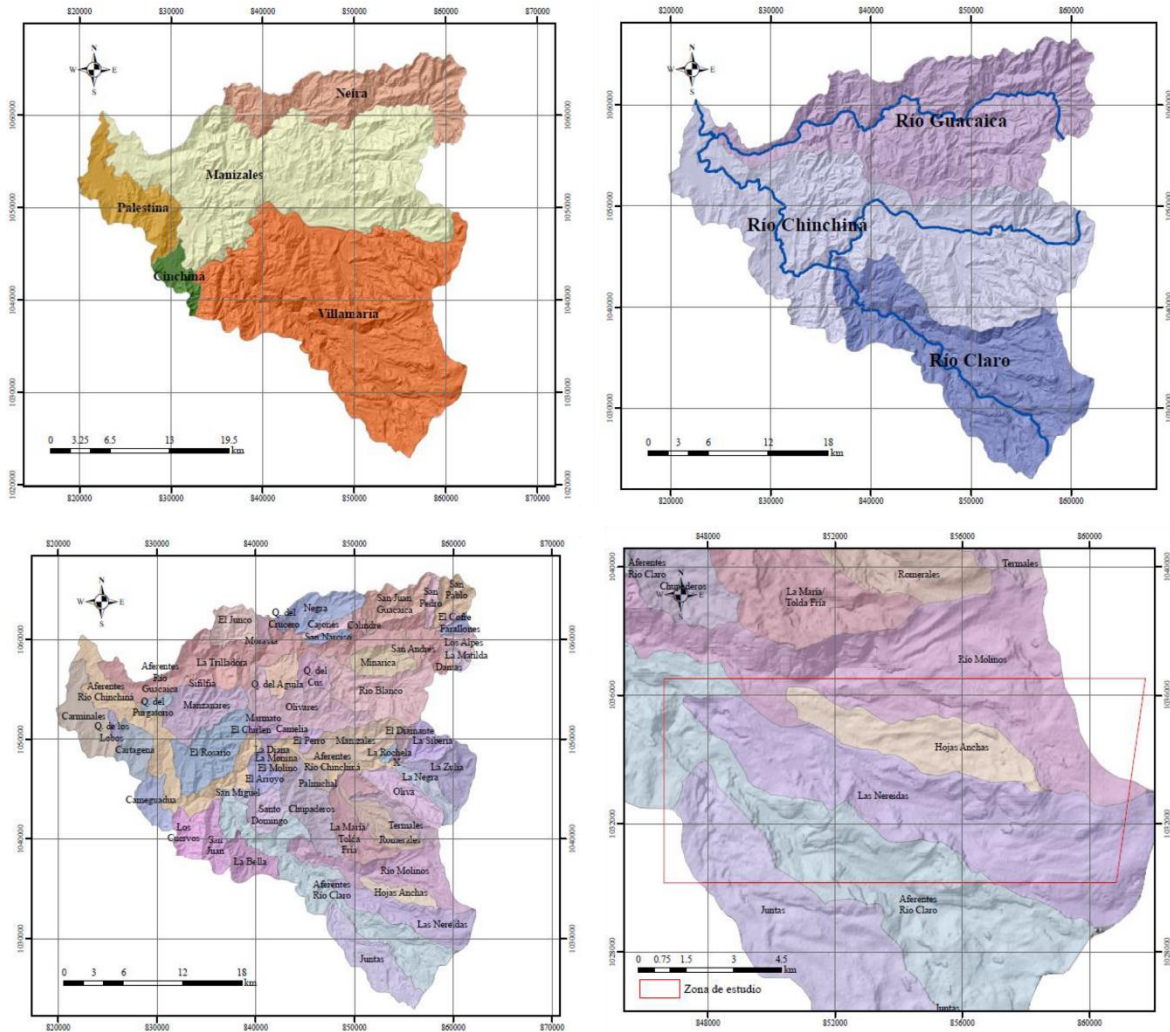


Fig. 18. (A) Municipios que tienen jurisdicción en la cuenca del Río Chinchiná. (B) Subcuenclas del Río Chinchiná. (C). Microcuenclas del Río Chinchiná. (D). Microcuenclas que comprende la zona de estudio. Tomado de: (POMCA del Río Chinchiná, 2013; Román, 2021).

CUENCA	SUBCUENCA	MICROCUENCLAS
Río Chinchiná	Río Guacaica	Río Blanco y las quebradas Olivares, Moravia, El Crucero, Negra, Las Animas, Cajones, San Narciso, El Gus, Mina rica, San Juan, San Andrés, San Pedro, San Pablo, El Cofre, Farallones, Los Alpes, La Matilda, Dantas y los aferentes directos al río Guacaica.
	Río Chinchiná	Aferentes directos y las quebradas Carminales, los Lobos, Cartagena, El Purgatorio, Manzanares, El Rosario, Cameguadua, Los Cuervos, San Juan o San Julián, San Miguel, El Arroyo, La Floresta, La Diana, El Chiflón, Marmato, Versalles, Palogrande, Camela, 2515-002-091, La Monina, El Molino, El Perro, Manizales, Chupaderos, Palmichal, La María o Tolda Fría, La Oliva, La Rochele, La Zulia, El Diamante, La Siberia, La Negra.
	Río Claro	Molinos y las quebradas Santo Domingo, La Bella, Las Nereidas, Juntas y los aferentes directos al Rioclaro.

Tabla 1. Cuenca, subcuenclas y microcuenclas del Río Chinchiná Tomado de: (POMCA del Río Chinchiná, 2013; Román, 2021).

La roca basamento sobre la cual fluyen los drenajes de la subcuenca de Río Claro corresponde a esquistos del Complejo Cajamarca. De acuerdo con estudios de CHEC et al. (1983) estos esquistos presentan una permeabilidad primaria baja, llegando a ser nula en algunos casos, esto se corrobora con los reportes de Taborda Ortiz (2019), en donde las muestras analizadas de núcleos del pozo Nereidas 1 presentan valores de permeabilidad en el rango de 0.5 a 2 mD, lo cual se asocia a formaciones de baja permeabilidad.

Por otro lado, diversos autores (CHEC et al., 1983; Dewhurst Group, 2013; Dewhurst, 2016; García-Beltrán, 2021; Hincapié 2013; Hincapié, 2014; LaGeo, 2016; Mejía et al., 2012; POMCA Chinchiná, 2013; Rodríguez, 2013; Vélez et al., 2018) mencionan que el sector presenta una configuración tectónica compleja, en donde los drenajes del sector presentan un control estructural por las fallas geológicas con una orientación NW-SE, y que además, esta misma configuración hace que las rocas del Complejo Cajamarca presenten una porosidad y permeabilidad secundaria.

Estas rocas, junto con la cobertura volcánica, se encuentran cubiertas por diferentes tipos de suelos que influyen en la hidrología de la región. Según los datos proporcionados por Ingeniería Strycon (2017) en Román (2021), los suelos Sle y SRg son predominantes en el área de estudio (fig. 19).

El suelo Sle, que cubre gran parte de la zona, presenta un relieve fuertemente quebrado con material parental de ceniza volcánica. Su textura varía desde limoso y franco arcilloso hasta franco arenoso y limo arenoso, con poca presencia de poros finos (Ingeniería Strycon (2017) en Román, 2021). Esta caracterización sugiere que el suelo Sle tiene la capacidad de retener cierta cantidad de agua debido a su contenido de arcilla y limo, lo que puede influir en el comportamiento de los drenajes en época de transición entre las temporadas de lluvia y sequía.

La unidad SRg representa suelos con fuertes pendientes y muchos afloramientos rocosos cubiertos por vegetación arbustiva y arbórea. Su textura varía de limo arenosa a arenosa, y se caracteriza por tener rocas sin estructura. Estos suelos, al ser más arenosos, pueden tener una menor capacidad de retención de agua en comparación con el suelo Sle. Su presencia en las áreas de fuertes pendientes y relieve quebrado a escarpado sugiere que puede influir en la escorrentía y flujo de agua en la subcuenca.

Adicionalmente, el archivo geoespacial del IGAC sobre los suelos de Caldas (2005) menciona que estos suelos se encuentran en un relieve de montaña, generalmente quebrado a escarpado, ocasionalmente ondulado. En las partes medio-bajas de la subcuenca se encuentran suelos a partir de ceniza volcánica muy profundos, con texturas franco arenosas, mientras que en la parte media alta se encuentran suelos de arena y ceniza con texturas gruesas a moderadamente gruesas y de poco espesor.

En conjunto, la interacción entre los suelos y las rocas en la subcuenca de Río Claro desempeña un papel importante en la hidrología local, ya que la variabilidad en la textura, la capacidad de retención de agua de los suelos, junto con el relieve quebrado, escarpado y ondulado, en una configuración tectónica compleja con el desarrollo de fallas y diaclasas, influyen en el comportamiento de los drenajes y el flujo de agua superficial y de infiltración en la región.

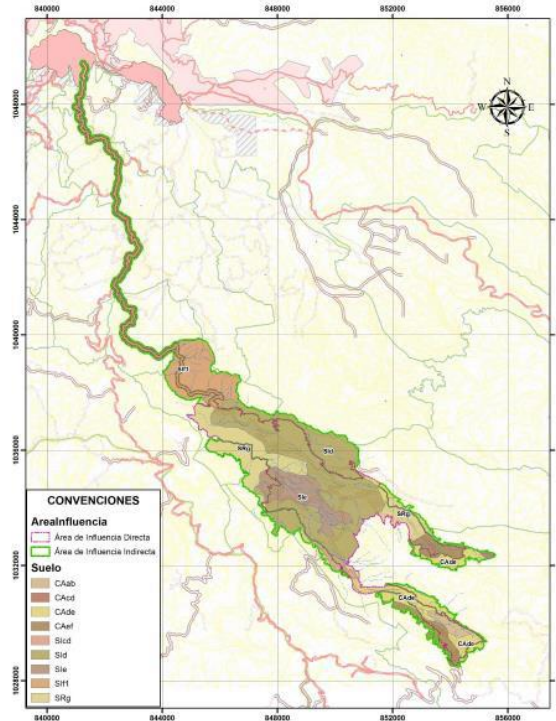


Fig. 19. Distribución espacial de las Unidades geológicas superficiales en el área de influencia del EIA del proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruíz. Tomado de: (Ingeniería Strycon, 2017; Román, 2021).

El régimen hidrológico de un afluente hace referencia a la variación en el caudal a través del tiempo, a partir de estas variaciones pueden ser determinados efectos de períodos estacionales, los efectos del cambio climático, entre otros. Según Román (2021), este análisis es útil ya que permite hacer una aproximación al comportamiento de los caudales en un periodo de tiempo determinado.

Para evaluar el régimen hidrológico de los principales cauces en el área de estudio se tomaron los datos de las estaciones hidrológicas presentes en el área recolectados por Román (2021) y Navarro (2008).

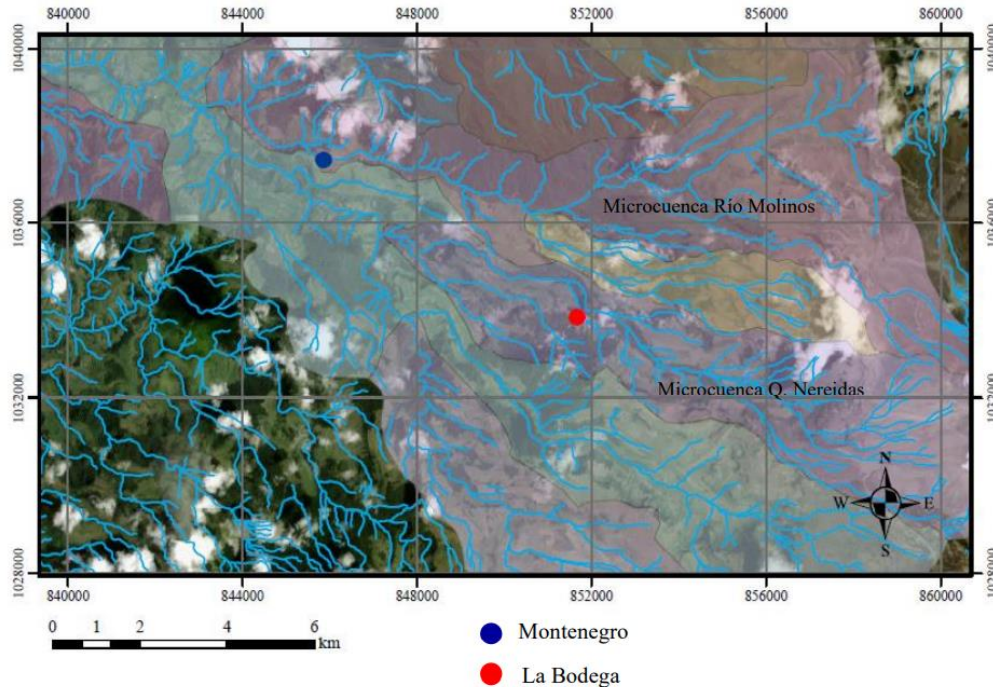


Fig. 20. Estaciones hidrológicas de las microcuencas de la Q. Nereidas y el Río Molinos. Tomado de: Román (2021).

9.1 Quebrada Nereidas

La quebrada Nereidas tiene su nacimiento en los arenales del volcán Nevado del Ruiz, específicamente en la vereda El Páramo, a una altitud de 4800 m.s.n.m., la cobertura vegetal cambia a medida que atraviesa los diferentes pisos térmicos del área. Su lecho está compuesto por rocas volcánicas en la parte superior y en la zona de intersección con Río Claro se observan rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, además, se observa un transporte de sedimentos que afecta el color. e (Ingeniería Strycon, 2017 en Román, 2021). El glaciar Molinos, situado al suroeste del cráter Arenas (Ceballos & Gómez, 2022), contribuye al caudal de la quebrada. Según Navarro (2008), la quebrada en la parte alta de la cuenca tiene un arrastre mínimo de sedimentos, predominando principalmente los materiales gruesos, el arrastre es de aproximadamente 1 ton/día y hasta 20ton/día en periodos de alta pluviosidad.

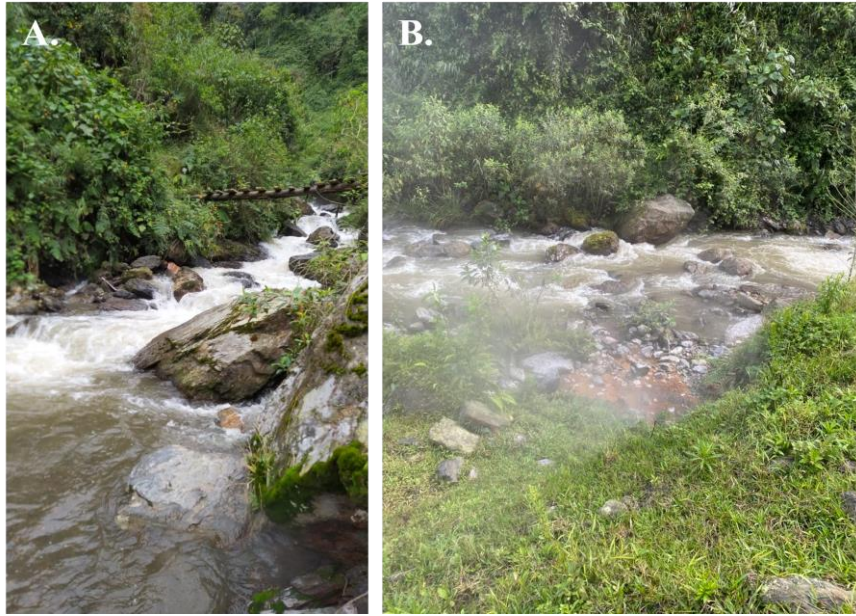


Fig. 21. (A). Q. Nereidas camino a la hacienda El Termal. (B). Q. Nereidas en su interacción con las fuentes termales de la hacienda El Termal.

La estación utilizada por Román (2021) para evaluar el régimen hidrológico de la Quebrada Nereidas fue La Bodega-CHEC, para lo cual seleccionó un periodo de tiempo de ocho años, entre el 2011 y 2020, a excepción del año 2018, el cual no cuenta con registros de caudal en esta estación. Los datos recolectados fueron consignados en la tabla 2.

Caudal medio mensual Estación La Bodega - CHEC										
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2020	Prom.
Ene	0.904	0.700	0.596	0.572	0.624	0.404	0.560	0.682	0.584	0.625
Feb	0.980	0.640	0.852	0.596	0.436	0.364	0.432	0.723	0.520	0.616
Mar	0.920	0.684	0.704	0.720	0.464	0.412	0.528	0.727	0.696	0.651
Abr	0.995	0.788	0.728	0.680	0.680	0.448	0.648	0.819	0.816	0.734
May	1.112	0.597	0.872	0.708	0.640	0.536	0.668	0.769	0.810	0.746
Jun	0.737	0.664	0.640	0.688	0.684	0.588	0.535	0.717	0.694	0.661
Jul	0.760	0.668	0.760	0.588	0.348	0.660	0.576	0.682	0.660	0.634
Ago	0.800	0.680	0.844	0.404	0.356	0.488	0.427	0.588	0.536	0.569
Sep	0.852	0.792	0.96	0.428	0.42	0.484	0.508	0.642	0.608	0.633
Oct	0.943	0.836	1.056	0.732	0.524	0.644	0.596	0.792	0.688	0.757
Nov	0.998	0.824	1.104	0.816	0.768	0.524	0.499	0.827	0.784	0.794
Dic	1.096	0.848	1.008	0.808	0.528	0.508	0.716	0.807	0.75	0.785

Tabla 2. Caudal mensual de la estación La Bodega. Tomado de Román (2021).

A partir de los datos de caudales obtenidos, se realizó el análisis del régimen hidrológico para la Quebrada Nereidas (fig. 22) en el cual se presentan un comportamiento bimodal, con dos periodos de caudales altos, el primero entre los meses de abril y mayo, con caudales medios de $0.734 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.746 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, y el segundo entre los meses de octubre y diciembre, con los picos más altos en el mes de noviembre con un valor de caudal medio de $0.794 \text{ m}^3/\text{s}$. Por otro lado, el primer periodo con caudales bajos se encuentra entre enero y febrero con caudales medios de $0.625 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.616 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, el segundo periodo de bajos caudales es equivalente al mes de agosto en donde se encuentran los caudales más bajos del año, con un valor de $0.569 \text{ m}^3/\text{s}$.

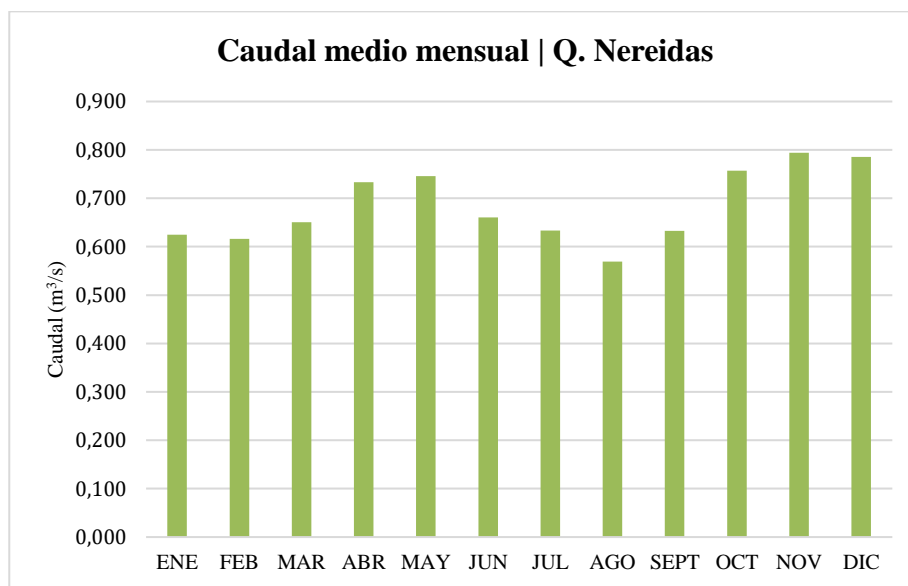


Fig. 22. Régimen hidrológico de la Quebrada Nereidas a partir de los datos recolectados por Román (2021).

Con los mismos datos fue elaborado un hidrograma (fig. 23), el cual puede definirse como un gráfico que presenta información de las variaciones en el caudal de un afluente a lo largo de un periodo de tiempo establecido. Para este caso se definió un período de ocho años, entre el 2011 y 2020, a excepción del año 2018.

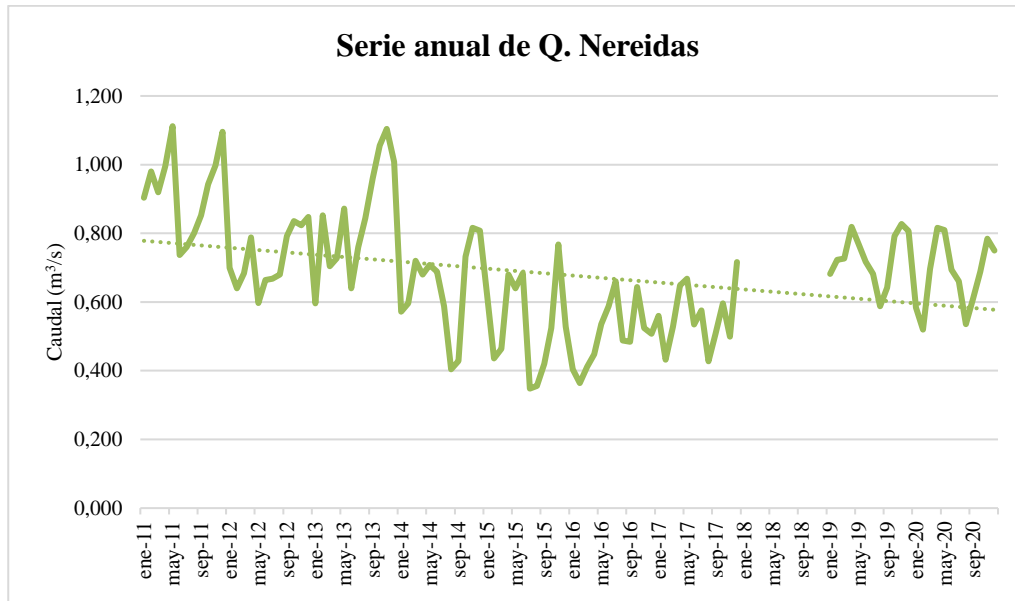


Fig. 23. Hidrograma anual de caudales medios la Quebrada Nereidas a partir de los datos recolectados por Román (2021).

La gráfica muestra picos de caudal que ocurren principalmente entre septiembre y diciembre, lo que corresponden a un período de lluvias en la subcuenca de Río Claro. Estos picos, en ocasiones, pueden representar inundaciones. En general, se observa una tendencia decreciente y progresiva, el área bajo el hidrograma representa el volumen de agua que es transportado por la Quebrada Nereidas, es decir, el volumen de agua transportada cada vez es menor. Román (2021) sugiere que esta disminución puede estar asociada a las captaciones de agua y al uso del suelo aguas arriba de la estación en cuestión.

Parámetros fisicoquímicos Q. Nereidas

Durante el estudio realizado por Román (2021), se llevaron a cabo dos puntos de aforo para la Quebrada Nereidas, junto con la toma de parámetros fisicoquímicos como temperatura, conductividad, sólidos disueltos, entre otros. El primer punto se ubicó antes de la intersección de la quebrada con Río Claro, accesible desde la finca Laguna Alta. El segundo punto se realizó en

la zona de Botero Londoño, en los predios de la hacienda El Termal, tanto antes como después de su interacción con las fuentes termales de la zona. Los datos obtenidos de ambos puntos se encuentran consignados en la tabla 3. Además, durante el presente estudio, se repitió el punto de aforo en la hacienda El Termal, junto con sus respectivos parámetros fisicoquímicos consignados en la tabla 4.

	Q. Nereidas LA	Q. Nereidas ET antes T2	Q. Nereidas ET + T2
Caudal m ³ /s	1.289	1.675	0.4
Temp °C	18.1	12.23	16.8
Conduc	458	308	398
TDS ppm	229	154	186

Tabla 3. Parámetros físicos de la Q. Nereidas en el sector de Laguna Alta y la hacienda El Termal. Tomado de Román (2021).

	Q. Nereidas antes ET	Q. Nereidas + Termal
Qf (m ³ /s)	1.804	
Tf (°C)	13,1	22,9
CondF (µS/cm)	836	2415
TDS (ppm)	418	1208
pH	8.3	8.46

Tabla 4. Parámetros fisicoquímicos de la Quebrada Nereidas en el sector de la hacienda el Termal para el año 2022.

El caudal medido en este estudio, antes de la interacción de la quebrada con los termales de la hacienda el Termal, corresponde a 1.804 m³/s, lo que significa un aumento en el caudal tomado por Román (2021) el cual fue de 1.675 m³/s, es importante aclarar que el valor tomado en 2021 fue en marzo, mes transitorio entre la finalización de uno de los períodos de sequía del año y el comienzo de uno de los períodos de lluvias, mientras el dato tomado en este estudio fue tomado en noviembre, en donde se alcanzan los picos más altos de precipitaciones. Además, la toma de datos muestra que los termales no solo tienen influencia en el caudal, sino también en todos los parámetros medidos, aumentando su valor independiente de la fecha del año en que se tomen.

Climograma de la microcuenca de la Quebrada Nereidas

Un climograma es una descripción gráfica y básica de un lugar teniendo en cuenta variables como precipitación y temperatura del sitio, para este estudio fue seleccionado un periodo de cuatro años, entre 2016 y 2020 para las estaciones Quebrada Nereidas-CHEC y Quebrada Nereidas-P.N.N.N. las cuales representan la descripción climática básica de la parte media y alta de la microcuenca de Nereidas respectivamente.

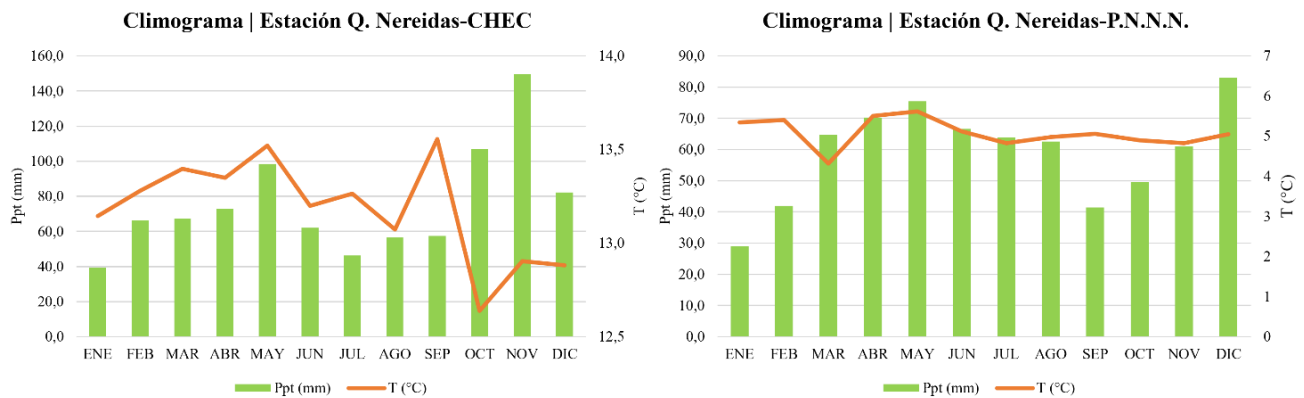


Fig. 24. Climogramas de precipitación y temperatura de la cuenca de la Quebrada Nereidas.

En la fig. 24(A), se muestra la variación de la temperatura con respecto a la precipitación. Durante los primeros meses del año, las temperaturas son más altas y se corresponden con las precipitaciones, tanto en los dos períodos de sequía como en el primer período de lluvias. Sin embargo, entre octubre y noviembre, las temperaturas son más bajas, mientras que las precipitaciones son más altas, es decir, para el último trimestre se presenta una relación inversa entre estas variables. En la fig. 24(B), la temperatura no muestra una variación considerable a lo largo de los meses, la precipitación por el contrario presenta un comportamiento bimodal.

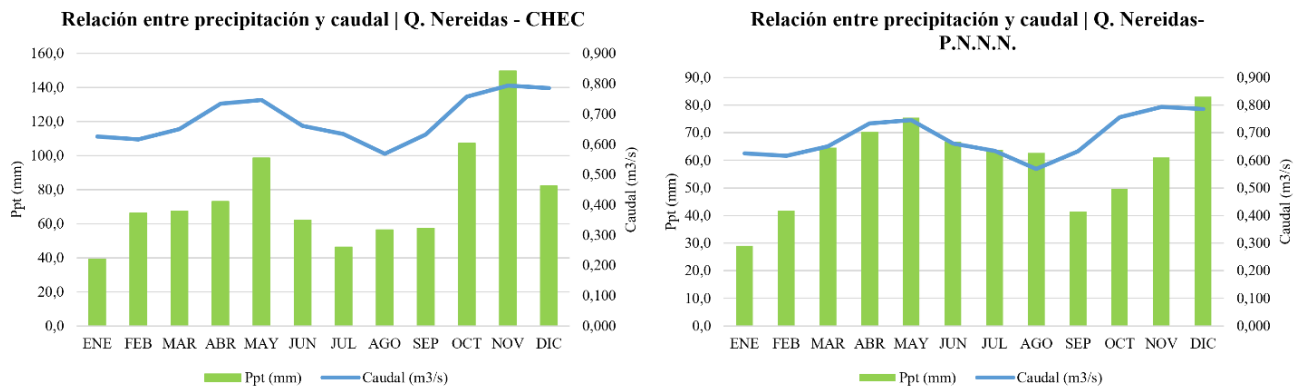


Fig. 25. (A). Relación entre precipitación y caudal | Estación Q. Nereidas-CHEC. (B). Relación precipitación y caudal | Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.

En la fig. 25. el caudal de la quebrada guarda una relación directa con la precipitación para ambas estaciones, los periodos con mayores precipitaciones corresponden a los periodos con mayores caudales en la quebrada, esto debido a que el sistema de recarga de los afluentes son principalmente las lluvias.

9.2 Río Molinos

El Río Molinos nace a partir del deshielo del glaciar Molinos al suroeste del volcán Nevado del Ruiz (Tamayo & Arias, 2004; Mejía & Botero, 2009) desembocando en Río Claro, cerca de la vereda Laguna Alta (Chamorro et al., 2015). Cuenta con una baja cobertura vegetal y en algunos sectores se desarrollan actividades pecuarias, y un lecho rocoso que arrastra rocas de hasta 15 cm de diámetro (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017, en Román, 2021). Para este cauce, Navarro (2008), al igual que para la quebrada Nereidas, menciona que la cantidad de sedimentos que arrastra en la parte superior de la cuenca es mínima, de 1 ton/día hasta 20ton/día en época de lluvia.



Fig. 26. Cascada Molinos en el sector del Hostal La Laguna.

La estación utilizada para evaluar el régimen hidrológico del Río Molinos fue Montenegro - CHEC, para lo cual se seleccionó un periodo de tiempo de ocho años, entre el 2011 y 2020, a excepción del año 2018, el cual no cuenta con registros de caudal en esta estación. Los datos recolectados fueron consignados en la tabla 5.

Caudal medio mensual Estación Montenegro-CHEC										
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2020	Prom.
Ene	2.631	2.037	1.735	1.665	1.816	1.176	1.630	1.986	1.700	1.820
Feb	2.852	1.863	2.480	1.735	1.269	1.060	1.257	2.105	1.514	1.793
Mar	3.283	1.991	2.049	2.096	1.351	1.199	1.886	2.115	2.026	1.999
Abr	3.551	2.294	2.119	1.979	1.979	1.304	1.886	2.384	2.376	2.208
May	3.237	2.131	2.538	2.061	1.863	1.560	1.944	2.238	2.357	2.214
Jun	2.631	1.933	1.863	2.003	1.991	1.711	1.909	2.088	2.020	2.016
Jul	2.713	1.944	2.212	1.711	1.013	1.921	1.677	1.985	1.920	1.900
Ago	2.329	1.979	2.457	1.176	1.036	1.420	1.525	1.711	1.560	1.688
Sep	2.480	2.305	2.794	1.246	1.223	1.409	1.479	1.869	1.770	1.841
Oct	3.365	2.433	3.074	2.131	1.525	1.874	1.735	2.304	2.003	2.271
Nov	3.563	2.398	3.213	2.375	2.235	1.525	1.781	2.407	2.282	2.420
Dic	3.190	2.468	2.934	2.352	1.537	1.479	2.084	2.349	2.200	2.288

Tabla 5. Caudal mensual de la estación Montenegro. Tomado de Román (2021).

El análisis del régimen hidrológico para el Río Molinos (fig. 27) muestra un comportamiento bimodal, con dos periodos de caudales altos. El primero ocurre entre de abril y

mayo, con caudales medios de 2.208 m³/s y 2.214 m³/s, respectivamente. El segundo corresponde al último trimestre del año, con los picos más altos en noviembre, con un valor de caudal medio de 2.420 m³/s. Por otro lado, se observan dos períodos de bajos caudales. El primero ocurre entre enero y febrero, con caudales medios de 1.820 m³/s y 1.793 m³/s, respectivamente. El segundo se presenta en agosto, donde se encuentran los caudales más bajos del año, con un valor de 1.688 m³/s.

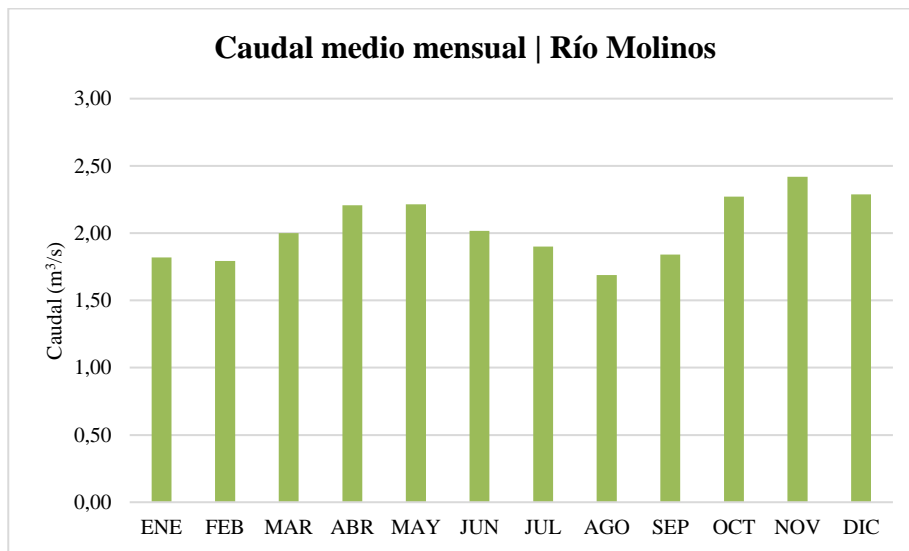


Fig. 27. Régimen hidrológico de Río Molinos a partir de los datos recolectados por Román (2021).

Al igual que con la Q. Nereidas, los datos de la tabla 5 fueron utilizados para elaborar un hidrograma (fig. 28) para el Río Molinos en un período de ocho años, entre el 2011 y 2020, a excepción del año 2018.

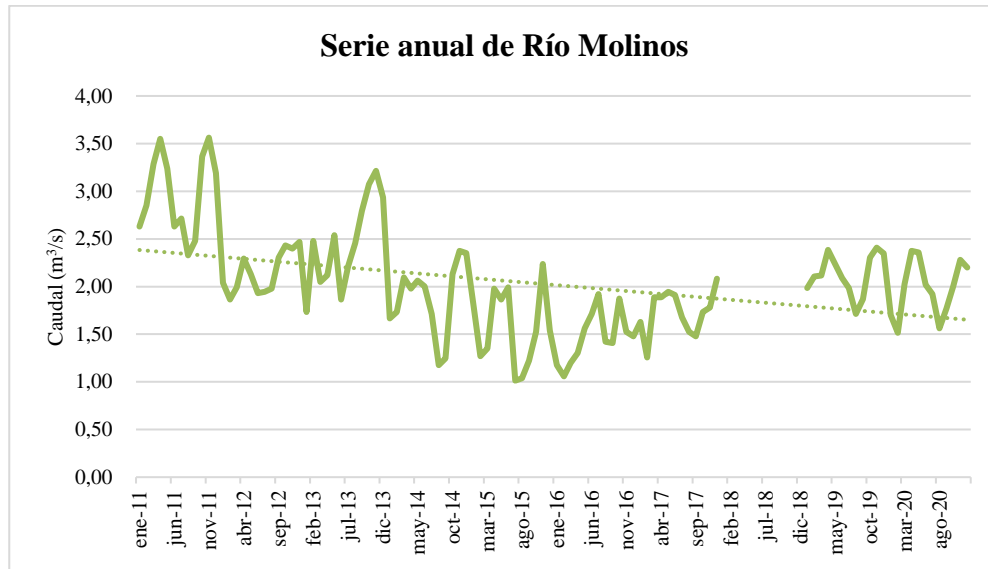


Fig. 28. Hidrograma anual de caudales medios la Quebrada Nereidas a partir de los datos recolectados por Román (2021).

En el hidrograma se observan picos altos en los caudales que corresponden a los períodos de alta precipitación. En general, presenta una disminución progresiva en su caudal, Román (2021) asocia esta disminución a la pérdida de la capa de hielo del Nevado del Ruiz y a captaciones de agua arriba de la estación.

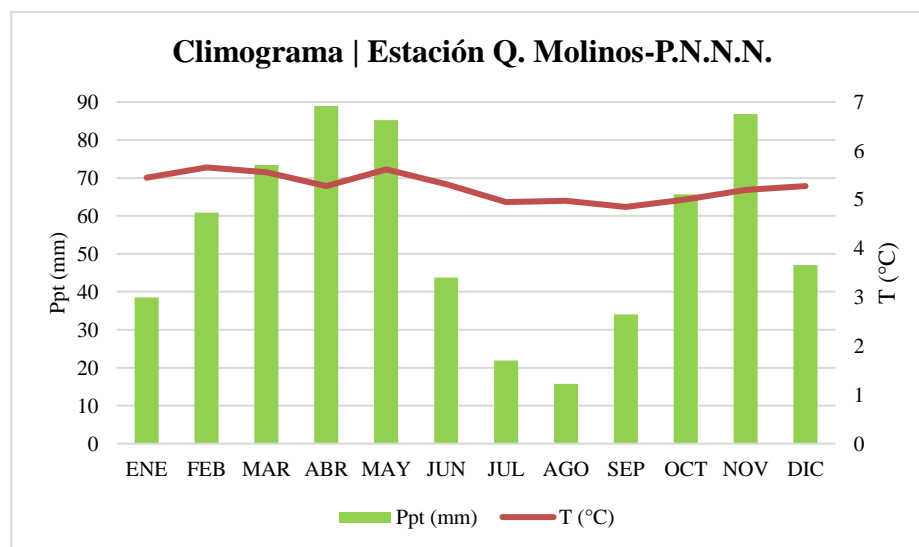


Fig. 29. Climograma de precipitación y temperatura de la cuenca de Río Molinos.

A partir del climograma fue posible interpretar que las temperaturas no presentan una variación considerable a lo largo de los meses, la precipitación por el contrario presenta un comportamiento bimodal, por otro lado la relación entre la precipitación y el caudal es directa, en los períodos de mayores precipitaciones el sistema hídrico se recarga y los caudales aumentan.

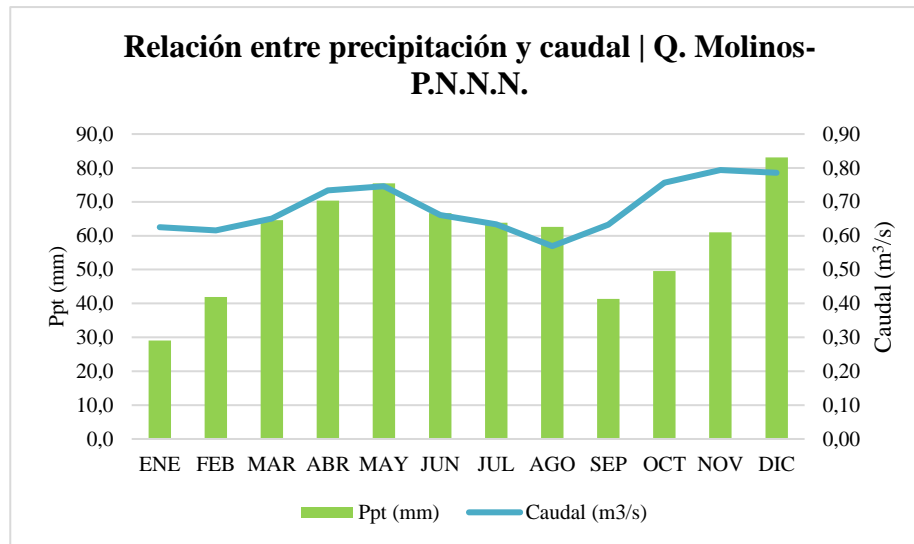


Fig. 30. Relación precipitación y caudal | Estación Q. Molinos-P.N.N.N.

Por otro lado, el Río Molinos no fue aforado en este estudio, ni fueron recolectados sus parámetros fisicoquímicos debido a que no presenta ningún manantial termal que interactúe directamente con su cauce.

9.3 Río Claro

Río Claro tiene su nacimiento en la zona de superpáramo 4500 m.s.n.m. sobre el flanco occidental de la cordillera Central, adyacente al glaciar del Nevado Santa Isabel y tiene un área de drenaje de 190 km² (Carrascal et al., s.f.). La vegetación que cubre la cuenca es tipo Andino y no presenta intervención por actividad antrópica, su lecho es de tipo rocoso, en el sector donde desemboca la quebrada Nereidas en Río Claro se encuentran rocas metamórficas del Complejo

Cajamarca (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017, en Román, 2021). En el sector donde se da la unión de este con el Río Chinchiná, se observa un aumento considerable de sedimentos arrastrados por el río como material suspendido sedimentable (Navarro, 2008).



Fig. 31. (A). Río Claro visto desde potrero detrás de la finca Laguna Alta. (B). Río Claro metros después de su intersección con la Q. Nereidas.

Navarro (2008), a pesar de la falta de la carencia de datos completos y continuos a lo largo del tiempo, realizó el análisis del caudal a partir del registro histórico de caudales medios mensuales de CHEC S.A. E.S.P. en donde se registran datos para tres años, 1987, 2006 y 2007, los demás años no cuentan con registros de caudal. Los datos recolectados fueron resumidos en la tabla 6.

Caudal medio mensual Río Claro				
	1987	2006	2007	Prom.
Ene			5,99	5,99
Feb		4,75	4,25	4,50
Mar	5,93	7,85	4,7	6,16
Abr	7	9,8	8,91	8,57
May	8,2	14,16	9,87	10,74
Jun	5,76	11,64	12,83	10,08
Jul		6,08	12,17	9,13
Ago		6,21	13,29	9,75
Sep		4,81	12	8,41
Oct		6,21	19,11	12,66
Nov		9,15	10,32	9,74
Dic		8,13	25,88	17,01

Tabla 6. Caudal mensual de Río Claro. Tomado de Navarro (2008).

Navarro (2008) destaca, como en los casos de la Q. Nereidas y de Río Molinos, que los aumentos en el caudal de Río Claro en los meses de abril a junio y los incrementos de octubre hasta diciembre, coincidiendo con los meses de mayor precipitación en la región. Por el contrario, entre enero y febrero se encuentra una disminución del caudal, coincidiendo con la época de menor precipitación.

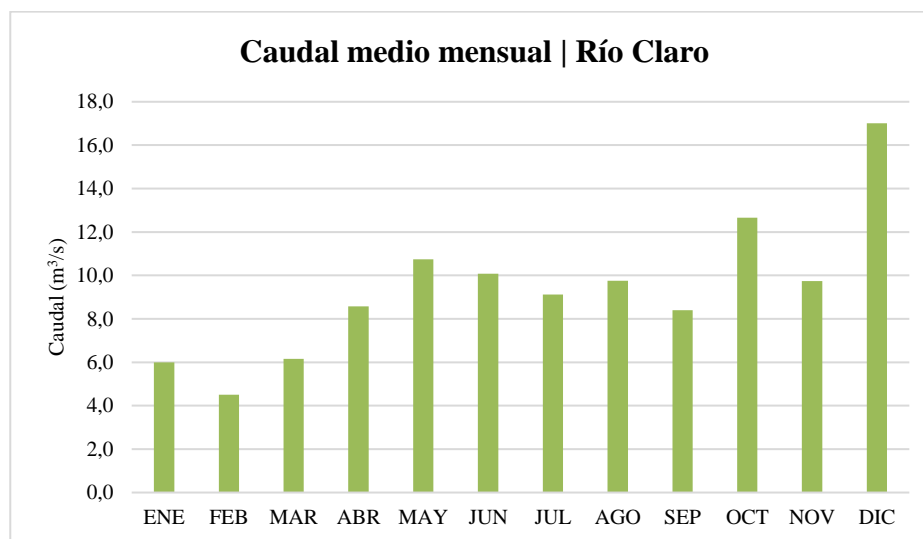


Fig. 32. Régimen hidrológico de Río Claro a partir de los datos recolectados por Navarro (2008).

Para Río Claro se decidió no realizar el hidrograma anual de caudales medios o serie anual debido a la inconsistencia en la recolección de datos, lo que generaría saltos de tiempo muy abruptos que no permitirían ver ni analizar correctamente el comportamiento de la línea de tendencia del caudal a lo largo del tiempo.

Parámetros fisicoquímicos Río Claro

Román (2021), llevó a cabo dos puntos de aforo para Río Claro junto con la toma de parámetros fisicoquímicos accediendo por la finca Laguna Alta después de la intersección con la Quebrada Nereidas, antes y después de su interacción con los manantiales termales de la zona, los datos obtenidos se consignan en la tabla 7. En este estudio, no se pudo realizar ningún punto de aforo ni de toma de parámetros fisicoquímicos debido a dificultades logísticas.

	Río Claro + QN	Río Claro+Q.N+T1
Caudal m ³ /seg	5.118	6.407
Temp °C	13.81	15.52
Conduc	157	249
TDS ppm	79	131

Tabla 7. Parámetros físicos de Río Claro en el sector de Laguna Alta. Tomado de Román (2021).

A partir de estos datos, nuevamente se puede interpretar que, al igual que lo sucedido en la Q. Nereidas, los termales tienen una influencia positiva en todos los parámetros medidos sobre este cauce. El caudal de Río Claro antes de la interacción del río con los termales del sector de Laguna Alta, corresponde a 5.118 m³/s, mientras el caudal luego de la interacción con el termal es de 6.407 m³/s, resaltando nuevamente que el valor tomado en 2021 fue en marzo, mes transitorio entre la finalización de un período de sequía y el comienzo de un período de lluvias, mientras el dato tomado en este estudio fue tomado en noviembre, en donde se alcanzan los picos más altos de precipitaciones.

9.4 Quebrada El Billar

La quebrada El Billar nace a los 3.500 msnm en la vereda Páramo y desemboca en la quebrada Nereidas, la vegetación es de tipo bosque alto andino y presenta un lecho rocoso (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017, en Román 2021).



Fig. 33. Q. El Billar camino a la hacienda La Quinta.

El régimen hídrico para la quebrada El Billar no pudo ser calculado debido a que no cuenta con un registro histórico consistente de medición de caudales. Sin embargo, debido a la interacción de este cauce con las fuentes termales encontradas en los predios de la hacienda La Quinta, se realizó un punto de aforo en este estudio antes de la interacción con las fuentes termales con la toma de parámetros fisicoquímicos del agua (tabla 9). Adicional a esto, se tendrán en cuenta los datos recolectados por Román (2021), en donde se realizaron aforos para esta quebrada antes y después de la interacción con los termales, los datos obtenidos para 2021 se muestran en la tabla 8.

	El Billar antes T3	El Billar + T3
Caudal m ³ /seg	0.417	0.417
Temp °C	14.04	17.17
Conduc	85	201
TDS ppm	42	100

Tabla 8. Parámetros físicos de la quebrada El Billar. Tomado de: Román (2021).

	Q. El Billar antes	Q. El Billar + Termal
Qf (m ³ /s)	0.583	
Tf (°C)	12.8	14.5
CondF (µS/cm)	448	1916
TDS ppm	224	958
pH	8.57	7.84

Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos de la quebrada El Billar en el sector de la hacienda La Quinta para el año 2022.

A partir de estos datos se puede interpretar que, los termales del sector de El Billar tienen una influencia positiva en todos los parámetros medidos sobre este cauce sin importar la fecha en la que se tomen. En el caso del pH, las fuentes termales de este sector presentan valores cercanos al pH neutro, en este caso de 6.7, por lo que se esperaría que este valor tienda a neutralizar, levemente, el pH básico de la quebrada. En este caso, la quebrada pasó a tener un pH de 8.57 a 7.84 luego de la interacción con la fuente termal, en donde si se evidencia una disminución de pH. Los datos medidos por Román (2021) nuevamente fueron durante el mes de marzo, mes transitorio entre la finalización de un período de sequía y el comienzo de un período de lluvias, mientras el dato tomado en este estudio fue tomado en noviembre, en donde se alcanzan los picos más altos de precipitaciones.

9.5 Quebrada La Poa-La Piscina



Fig. 34. Q. La Poa cerca de hacienda El Plan.

El régimen hídrico para la quebrada La Poa-La Piscina no pudo ser calculado debido a que el cauce no cuenta con un registro histórico consistente de medición de caudales. Sin embargo, debido a su interacción con la fuente termal conocida como La Piscina, el cual se encuentra en los predios de la hacienda El Plan, se llevó a cabo un punto de aforo con la respectiva toma de parámetros fisicoquímicos antes de la interacción con la fuente termal, los datos obtenidos para esta quebrada se muestran en la tabla 10. Cabe aclarar que este punto no fue visitado por Román (2021), por lo que solo se cuenta con los datos tomados en este estudio.

	Q. La Poa-La Piscina antes	Q. La Poa-La Piscina + Termal
Qf (m ³ /S)	0.195	
Tf (°C)	12	20.8
CondF (μS/cm)	805	2308
TDS ppm	403	1154
pH	7.64	7.29

Tabla 10. Parámetros fisicoquímicos de la quebrada La Poa en el sector de la hacienda El Plan para el año 2022.

A partir de estos datos se puede interpretar que, los termales del sector de La Poa-La Piscina tienen una influencia positiva en todos los parámetros medidos sobre este cauce sin importar la fecha en la que se tomen. En el caso del pH, al igual que lo sucedido para la quebrada El Billar, las fuentes termales de La Piscina presentan valores cercanos al pH neutro, en este caso de 6.81, por lo que se esperaría que este valor tienda a neutralizar, levemente, el pH básico de la quebrada. En esta situación, la quebrada La Poa pasó a tener un pH de 7.64 a 7.28 luego de la interacción con la fuente termal.

10. Clima

El clima es el conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas que se caracteriza por los estados y evoluciones del tiempo en un periodo y lugar específico. Está influenciado por factores forzantes, factores determinantes y la interacción de diferentes componentes del sistema climático. Las variables atmosféricas, como la temperatura y la precipitación, se utilizan usualmente para describir el clima, sin embargo, también puede ser descrito por variables de otros componentes del sistema climático. (Pabón et al., 1998).

Pabón et al. (1998) también hace mención de que, en el caso de Colombia, su clima es muy variado debido a su ubicación geográfica y las características fisiográficas de su territorio. La circulación de aire en los trópicos, con los vientos alisios del noreste y sureste, influye en la formación de nubes y lluvias cerca del ecuador, conformando la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) y afectando las temporadas lluviosas en gran parte del país.

Según Román (2021), la variabilidad climática en Colombia se ve afectada a diferentes escalas temporales (Interestacional, estacional, interanual, interdecadal) por factores como el desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), los fenómenos del niño y de la niña (ENSO), la orografía, la longitud y latitud, entre otros.

Por otro lado, Román (2021) describe la clasificación climática de Colombia según la clasificación de Caldas-Lang de 1962 elaborada por IDEAM (2014), mencionando que en el país predominan los climas cálidos en sus diferentes grados de humedad (fig. 35). Las zonas montañosas del país presentan diferentes tipos de climas, desde templado hasta nival, con los diferentes grados de humedad. En departamento de Caldas también se encuentran diversos tipos de climas, según la clasificación de Caldas-Lang de 1962 (fig. 36), se identifican los climas desde

cálido semihúmedo, templado húmedo, frío húmedo, muy frío húmedo, superhúmedo y extremadamente frío superhúmedo (IDEAM, 2014).

La clasificación de Caldas-Lang, como se presentó en el POMCA del Río Chinchiná (2013), muestra que la subcuenca de Río Claro comprende una amplia variedad de climas (fig. 37), entre los que se encuentran, desde las partes más elevadas hasta las partes más bajas, las nieves perpetuas, páramo alto superhúmedo, páramo bajo superhúmedo, páramo bajo húmedo, frío húmedo, templado húmedo. Lo que sugiere de por sí el gran recurso hídrico con el que cuenta la cuenca de Río Claro.

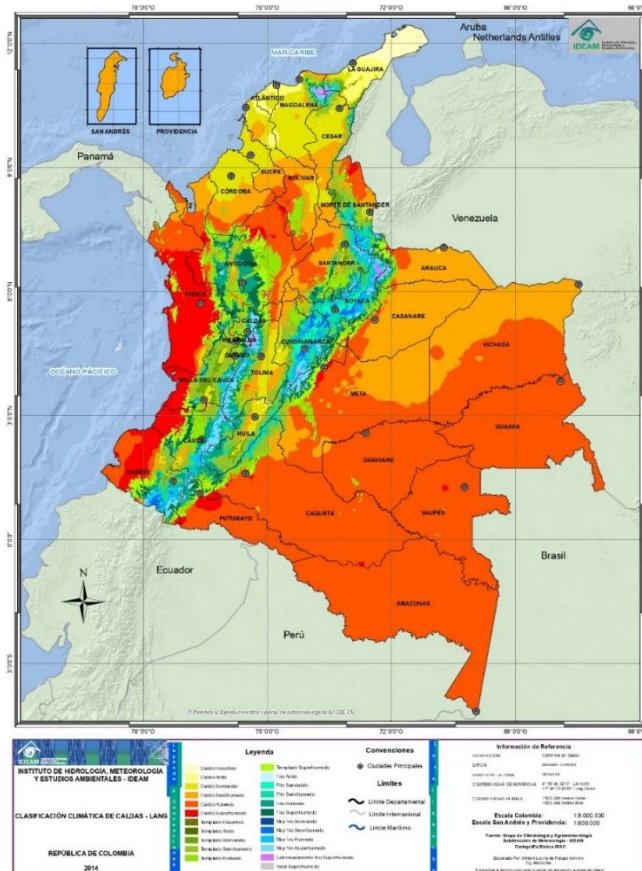


Fig. 35. Clasificación climática de Colombia a partir de la metodología de Caldas-Lang. Tomado de: http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Caldas_Lang.pdf

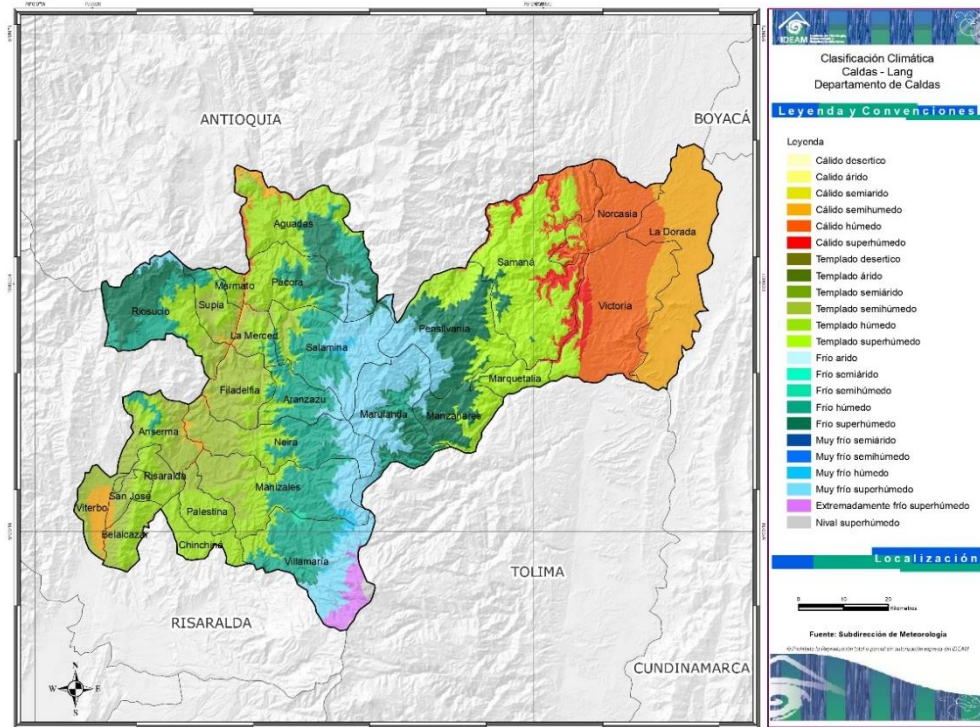


Fig. 36. Clasificación climática del departamento de Caldas a partir de la metodología de Caldas-Lang. Tomado de: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clima-caldas.pdf>

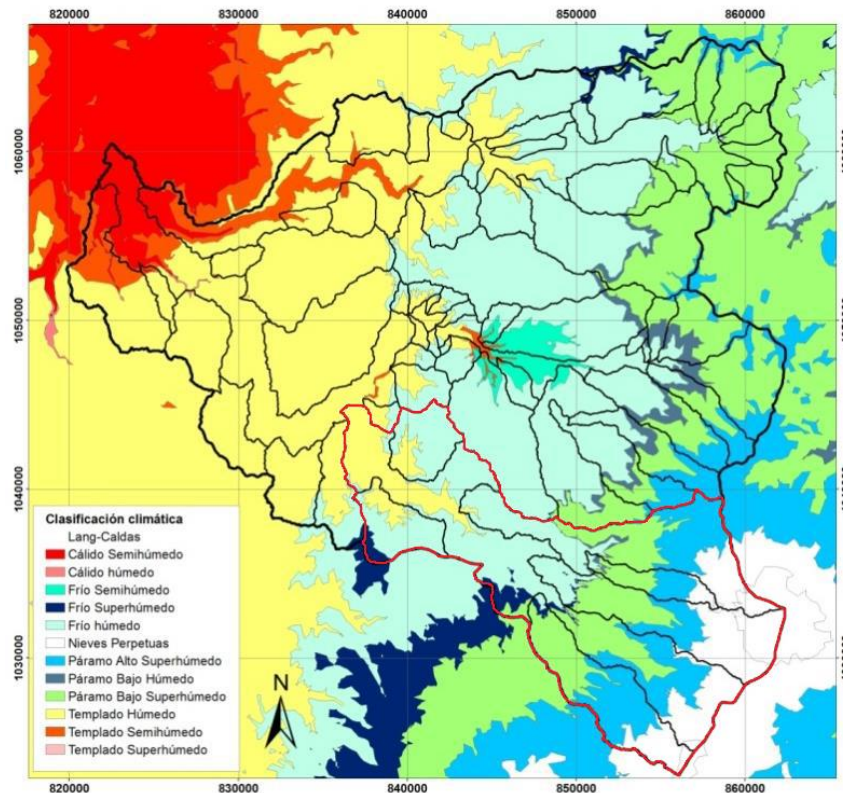


Fig. 37. Clasificación climática de la cuenca del Río Chinchiná a partir de la metodología de Caldas-Lang. Tomado de: POMCA del Río Chinchiná (2013).

En el área de estudios, la pluviosidad se encuentra influenciada por la ZCIT, lo que produce temporadas de lluvia y, que según Aricapa (2020), afecta las propiedades de las fuentes termales, como el pH de las aguas, la concentración de sólidos disueltos, entre otras, además afecta el caudal de ciertos manantiales que normalmente se encuentran con un caudal pequeño o secos. La zona presenta un comportamiento bimodal, con dos periodos marcados de mayor precipitación debido al desplazamiento de la ZCIT, que pasa sobre la zona dos veces al año, primero entre abril y mayo y segundo entre octubre y noviembre (Aricapa, 2020; Ingeniería Strycon S.A.S., 2017; Román, 2021).

La variación de la temperatura en el área de influencia del proyecto geotérmico está controlada por factores como la altitud, latitud, cercanía al mar y la radiación solar. En las zonas más elevadas, la temperatura promedio es de aproximadamente 4.71°C, mientras que en las áreas más bajas alcanza los 18.78°C. (Ingeniería Strycon S.A.S., 2017; Román, 2021).

Para el área del proyecto se analizarán los factores climáticos precipitación, temperatura, y evapotranspiración con el fin de hacer un modelo de balance hídrico que permita determinar el comportamiento de dichos factores y como estos afectan al sistema geotérmico de la región.

10.1 Análisis de los datos existentes en la zona de estudio

Uno de los objetivos de este estudio es analizar las diferentes variables climáticas, como la precipitación temperatura y evapotranspiración, en la subcuenca de Río Claro, que tiene influencia directa con la zona de interés del proyecto geotérmico. Para lograrlo, se procedió a obtener la información necesaria de fuentes confiables y relevantes, en este caso, se accedió a las plataformas DHIME del IDEAM y al SIMAC (Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas) de la Universidad Nacional de Colombia.

La primera etapa consistió en identificar y seleccionar las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio que proporcionaran datos completos y suficientes para el análisis. Dada la escasez de equipos de monitoreo en el área del proyecto geotérmico, se eligieron cuidadosamente diez estaciones meteorológicas que se encuentran a lo largo de la subcuenca de Río Claro (fig. 38).

Una vez seleccionadas las estaciones, se procedió a evaluar los registros de datos disponibles en la plataforma SIMAC y la base de datos DHIME del IDEAM. Con el objetivo de garantizar la calidad de la información recolectada, se estableció un rango de tiempo representativo para el análisis, abarcando un total de seis años, desde 2016 a 2021, esto debido a que las dos únicas estaciones que se encuentran dentro del área de interés del proyecto fueron instaladas en 2016, esto con el fin de representar un periodo climático consistente en el área.

El análisis de calidad de los datos se llevó a cabo siguiendo el protocolo establecido en la Guía de Prácticas Climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM - N°100). Estas actividades de control de gestión buscan mejorar la calidad y confiabilidad de la información, garantizando así la precisión de los resultados.

Una vez obtenidos y procesados los datos, se procedió a representar esquemáticamente las variables climáticas estudiadas. Se crearon gráficos y mapas para visualizar de manera clara y precisa la distribución espacio-temporal de la precipitación y la temperatura en la subcuenca de Río Claro. Este análisis de los datos existentes es esencial para proponer un modelo adecuado de distribución de precipitación y temperatura en la zona de estudio.

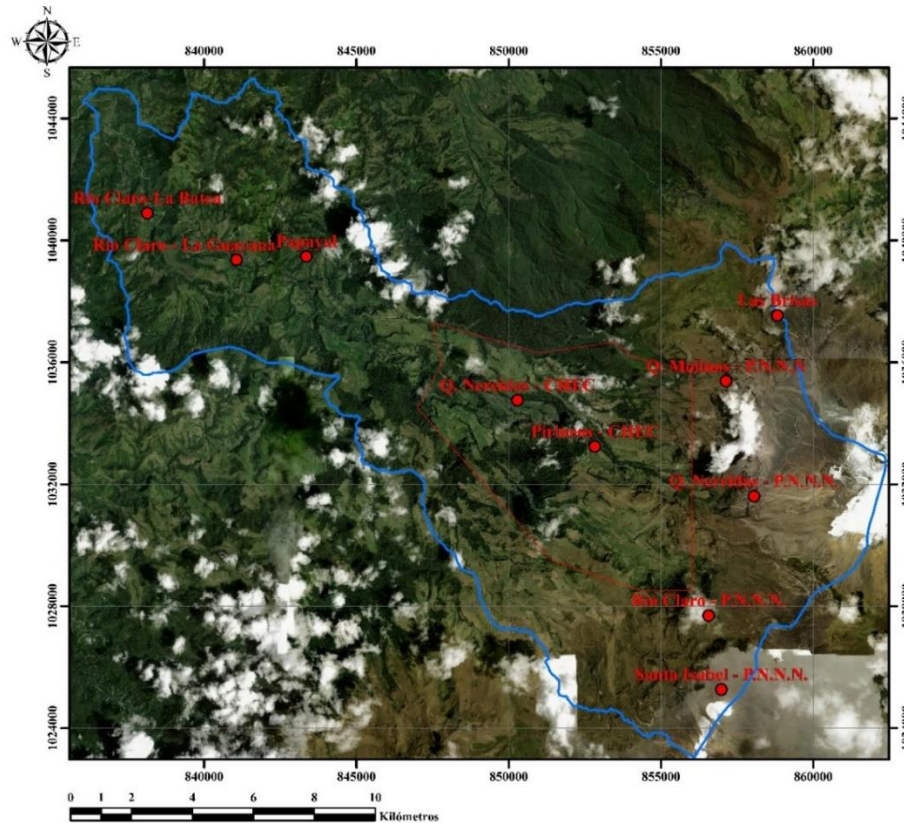


Fig. 38. Estaciones hidrometeorológicas seleccionadas dentro de la subcuenca de Río Claro. Imagen satelital tomada de SAS Planet.

Código	Estación	Tipo	Elevación	Entidad	Año inicial	Año final	Norte	Este
178730402010	Río Claro-La Batea	Hidrometeorológica	1589	Gobernación de Caldas - Udeger	2013	2022	1040891,106	838137,8284
178730501015	Pirineos-CHEC	Meteorológica	3390	CHEC S.A. E.S.P - Grupo EPM	2016	2022	1033234,786	852831,8213
178730302003	Q. Molinos-P.N.N.N.	Hidrometeorológica	4059	CORPOCALDAS	2012	2022	1035380,134	857136,0506
178730502014	Q. Nereidas-CHEC	Hidrometeorológica	2950	CHEC S.A. E.S.P - Grupo EPM	2016	2022	1034754,309	850292,7648
178730302006	Río Claro-La Guayana	Hidrometeorológica	1864	CORPOCALDAS	2011	2022	1039358,328	841067,7118
26150150	Papayal	Hidrometeorológico	2304	IDEAM	1970	2022	1039469,356	843359,7937
26155150	Las Brisas	Hidrometeorológica	4133	IDEAM	1982	2022	1037533,864	858825,7337
178730302005	Río Claro-P.N.N.N.	Hidrometeorológica	4076	CORPOCALDAS	2012	2022	1027687,673	856566,971
178730302004	Q. Nereidas-P.N.N.N.	Hidrometeorológica	4415	CORPOCALDAS	2012	2022	1031605,408	858059,73
178730301001	Santa Isabel-P.N.N.N.	Meteorológica	4812	CORPOCALDAS	2003	2022	1025265,763	856987,809

Tabla 11. Ficha técnica de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas. Coordenadas en Colombia Bogotá Zone.

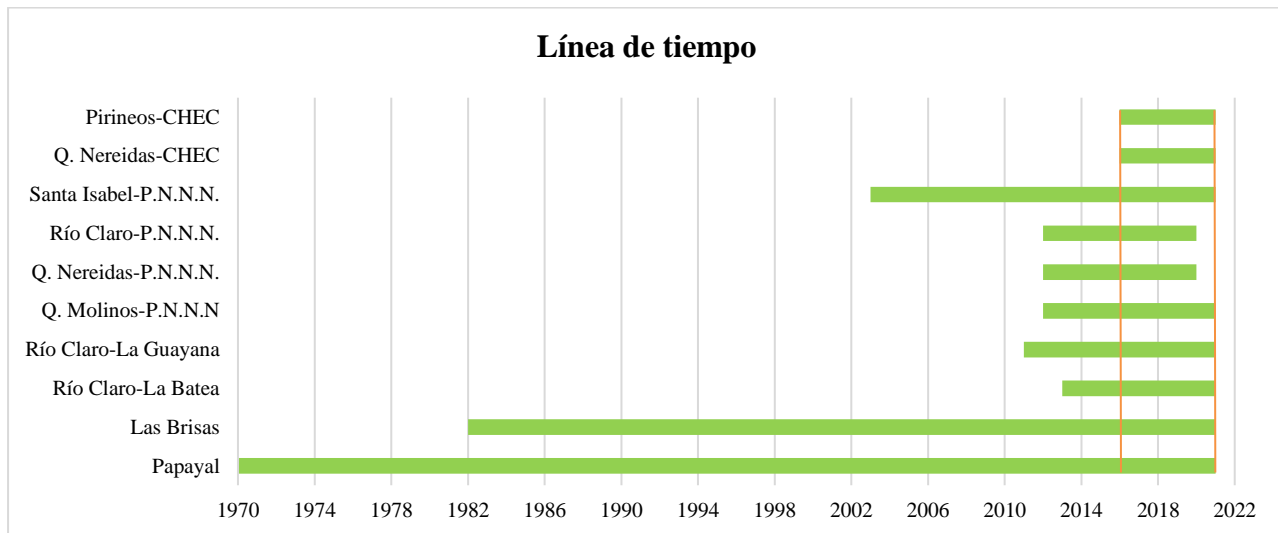


Fig. 39. Rango de tiempo seleccionado para la toma de datos de las estaciones utilizadas.

10.2 Precipitación

La precipitación puede definirse como un depósito de agua sólida o líquida proveniente de la atmósfera y, por tanto, es aplicable a la lluvia, nieve, granizo, rocío y neblina. Para la formación de una nube se necesita que el aire ascienda y ocurra una condensación del vapor de agua. Las gotas de agua crecen progresivamente dependiendo de la temperatura del aire, hasta que debido a su peso se precipitan por acción de la gravedad (Jaramillo, 2005).

Como se mencionó antes, para realizar un análisis climatológico adecuado, es esencial contar con datos precisos y consistentes. En el presente estudio, se ha seguido la Guía de Prácticas Climatológicas de la OMM, también aplicado por Román (2021), para gestionar y analizar los datos climáticos adquiridos.

10.2.1 Gestión de datos faltantes

En primer lugar, siguiendo las recomendaciones de la OMM, se procede a calcular el número de los registros faltantes en los datos mensuales obtenidos a través de las plataformas antes

mencionadas. Con el objetivo de asegurar la calidad de los datos, se descartaron aquellos valores que tenían más del 80% de datos ausentes. Como resultado de esto, se excluyeron los datos de 2016 de la estación Río Claro-La Batea y los datos de 2021 de las estaciones Río Claro-P.N.N.N. y Q. Nereidas-P.N.N.N.

En segundo lugar, para complementar los valores faltantes de las series de precipitación que cumplen con el porcentaje permitido de datos ausentes, se aplicaron varios métodos:

- Complementar los datos a partir de un promedio de sus propios datos. Aplicable solo cuando para la estación en cuestión, la información faltante es de menos del 10% (Román, 2021).
- Aplicar el método de regresión múltiple entre estaciones, seleccionando aquellas con un coeficiente de correlación mayor o igual a 0.7.
- Aplicar el método de razones promedio.
- Aplicar el método de la curva de doble masa.

En este estudio, se aplicaron los diferentes métodos mencionados para complementar las series de datos con información faltante, en función a las condiciones previamente planeadas. Es importante destacar que el método más utilizado en este estudio es el de la curva de doble masas.

10.2.2 Análisis de consistencia y completitud de datos

El método de doble masas funciona como una herramienta importante para evaluar la consistencia y homogeneidad entre diferentes estaciones, permitiendo determinar errores en la toma de datos (Román, 2021). Es fundamental que estas estaciones compartan condiciones climatológicas análogas a la estación problema. Además, este método puede ser utilizado para la interpolación y complemento de datos faltantes. (Montealegre, 1990).

Para aplicar este método sobre las series de precipitación se requiere de una estación base y de una estación a evaluar. En este caso, el área de estudio no cuenta con una estación base, por lo que se toma un grupo de estaciones que compartan condiciones hidrológicas entre sí, para que, al promediarse, puedan suplir a la estación base y así hacer el análisis de consistencia

Si se presenta un cambio en la pendiente, como se menciona anteriormente, indica un error en la toma de datos el cual puede corregirse con la siguiente fórmula:

$$P_c = \frac{mb}{mp} * P_r$$

Donde:

P_c: precipitación corregida

P_r: precipitación del punto a corregir

m_b: pendiente de la estación base

m_p: pendiente de la estación problema

m_b/m_p: factor de corrección.

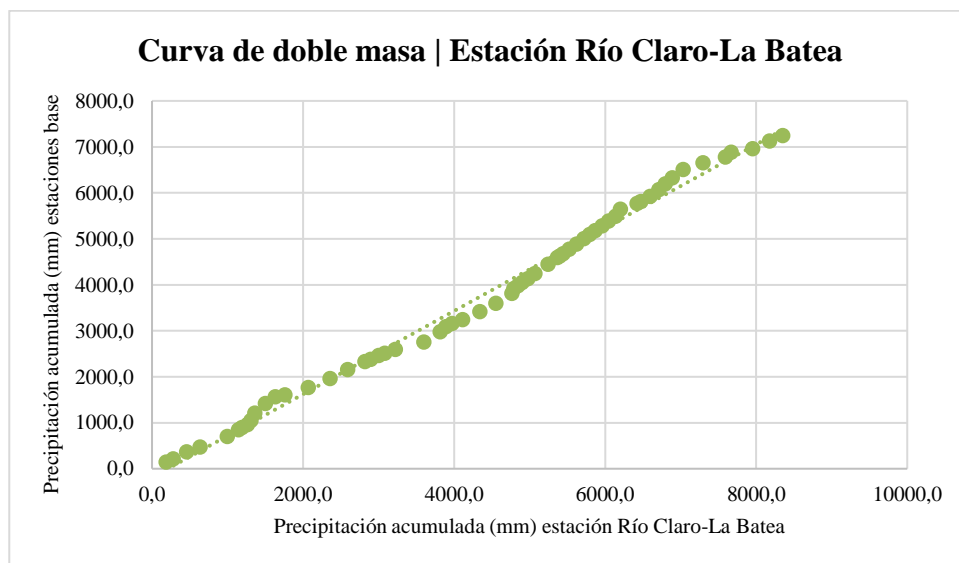


Fig. 40. Curva de doble masa | Estación Río Claro-La Batea.

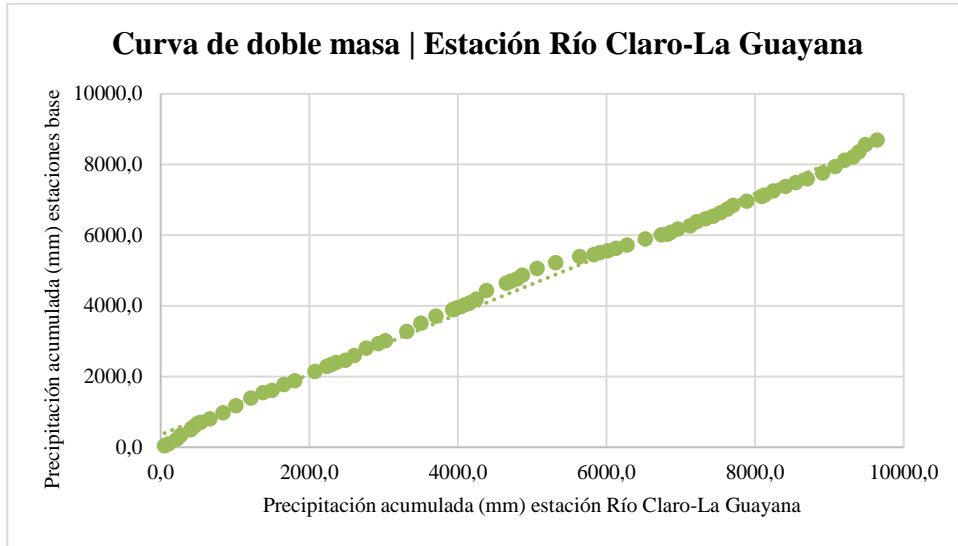


Fig. 41. Curva de doble masa | Estación Río Claro-La Guayana.

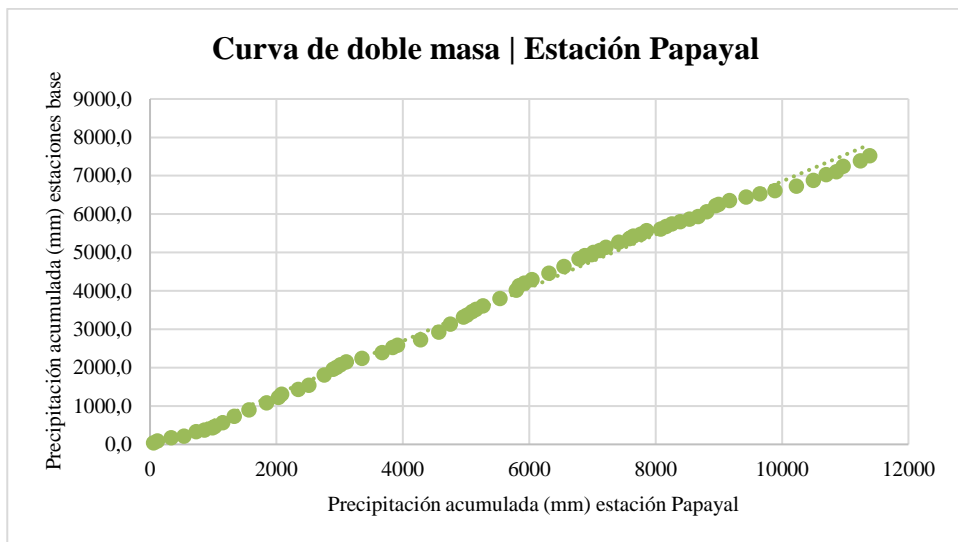


Fig. 42. Curva de doble masa | Estación Papayal.

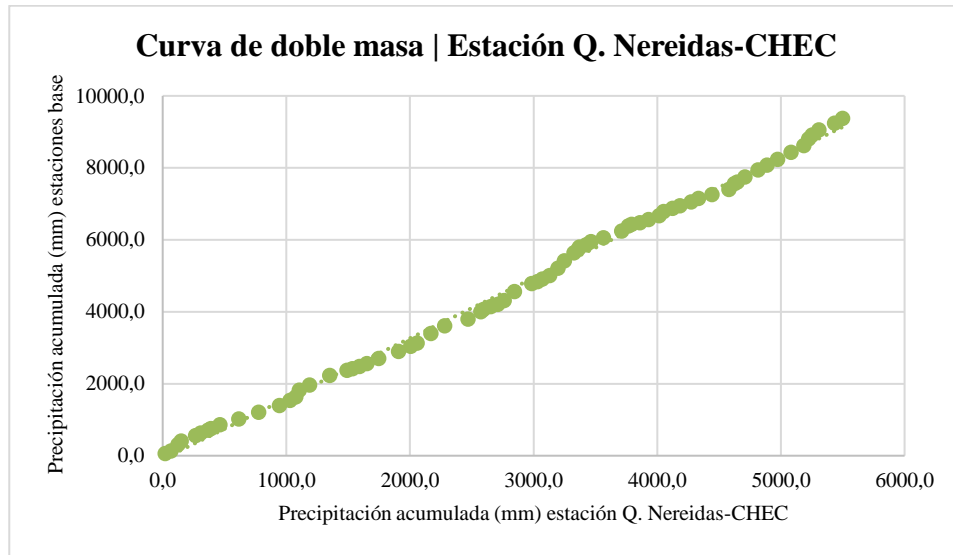


Fig. 43. Curva de doble masa | Estación Q. Nereidas-CHEC.

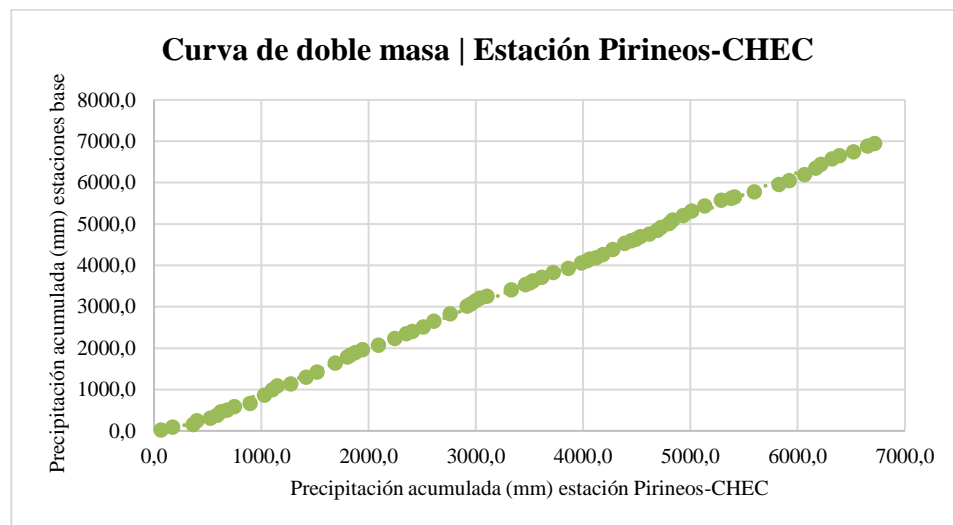


Fig. 44. Curva de doble masa | Estación Pirineos-CHEC.

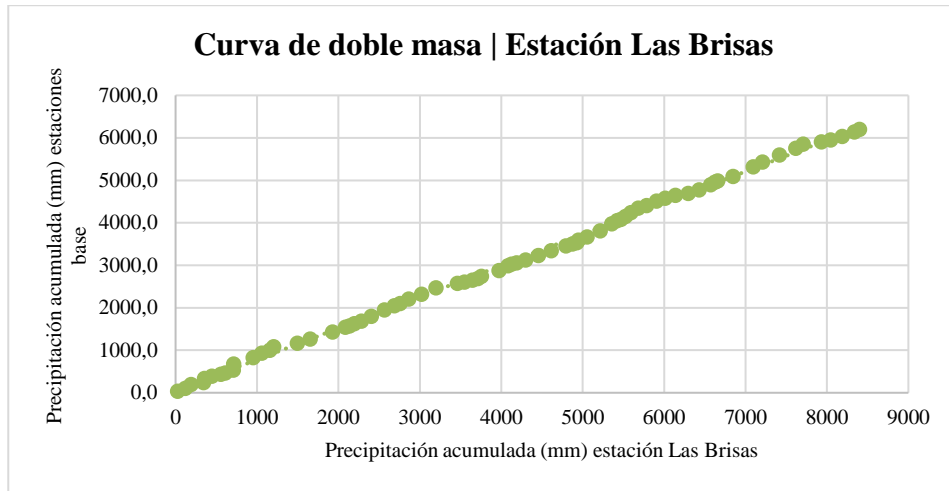


Fig. 45. Curva de doble masa | Estación Las Brisas

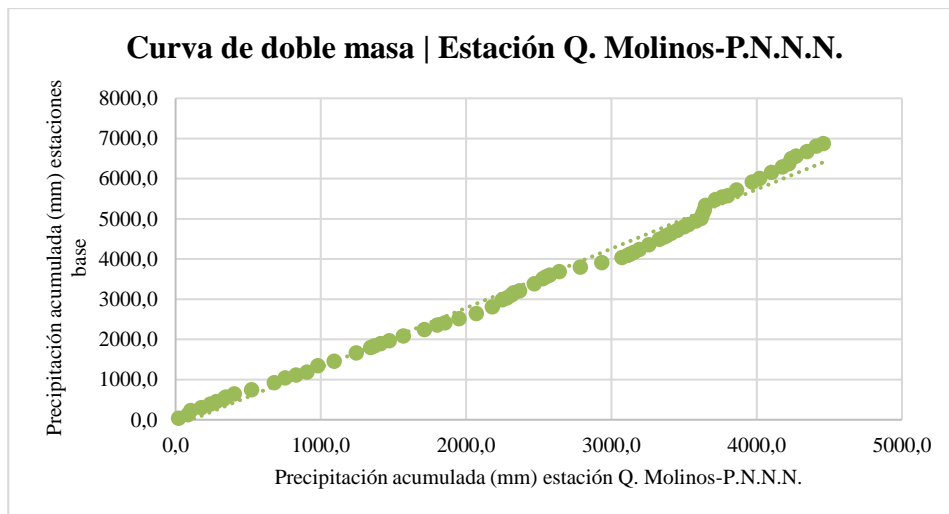


Fig. 46. Curva de doble masa | Estación Q. Molinos-P.N.N.N.

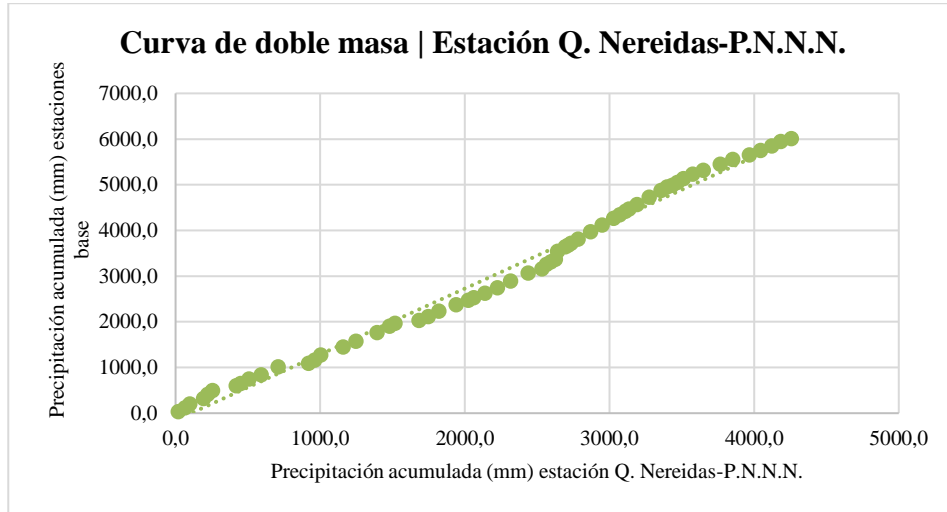


Fig. 47. Curva de doble masa | Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.

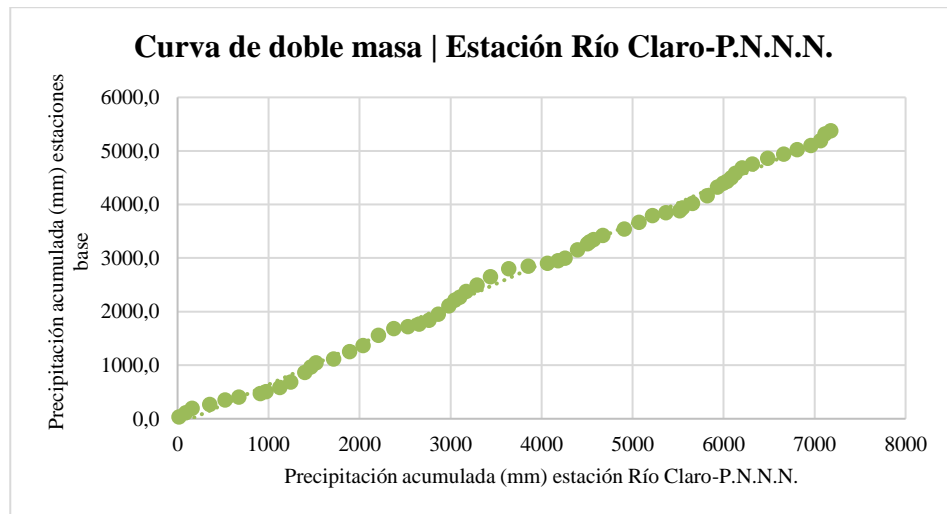


Fig. 48. Curva de doble masa | Estación Q. Río Claro-P.N.N.N.

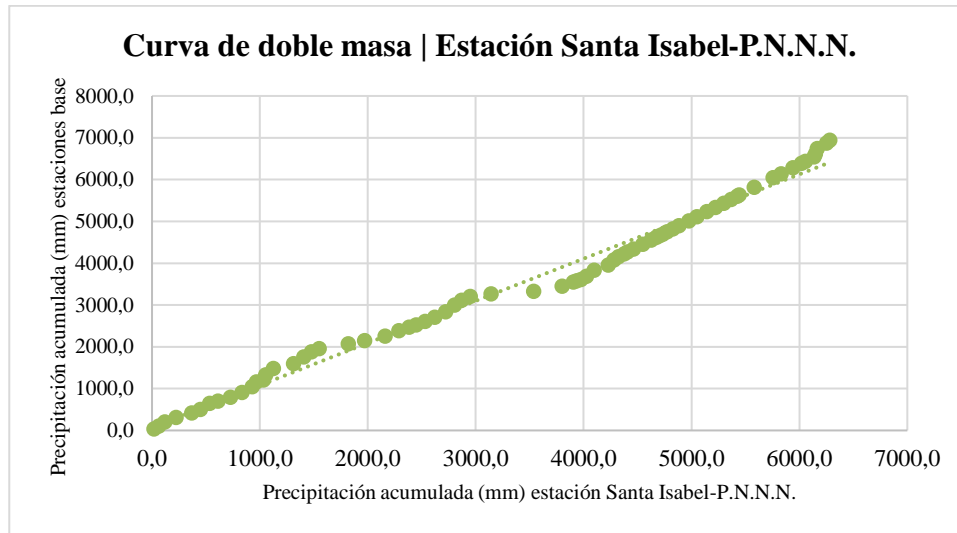


Fig. 49. Curva de doble masa | Estación Santa Isabel-P.N.N.N.

10.2.3 Outliers o datos anómalos

Corresponde a datos inusuales o valores extremos en una observación que se desvían de las otras o en otro sentido y que parecen inconsistentes con el conjunto de datos analizado que se caracterizan por ser variables muy grandes o muy pequeños posiblemente causados por mediciones erróneas causando efectos negativos en el análisis de datos aumentando la varianza del error. (Moreno, 2012).

La siguiente ecuación es usada para detectar y eliminar altos y bajos valores anómalos en una serie de datos de precipitación utilizando unidades logarítmicas según el Consejo de Recursos Hídricos (1982).

$$X = \bar{X} \pm K_N * S$$

Donde:

X: Umbral atípico en unidades logarítmicas

\bar{X} : Logaritmo medio de picos sistemáticos (X' s) excluyendo eventos de inundación cero, picos por debajo de la base de calibración y valores atípicos detectados previamente.

Kv: Valor K a partir del tamaño de la muestra N.

S: Desviación estándar

10.2.4 Coeficiente pluviométrico

Según Núñez et al. (2017), el coeficiente pluviométrico, también conocido como coeficiente de Angot, se define como un índice que refleja el nivel de pluviosidad de un mes en relación al conjunto del año. Al mismo tiempo, este coeficiente resuelve la dificultad que suponen las variaciones en la duración de los periodos mensuales analizados.

Cicero et al. (s.f.), muestra que el índice de Angot puede usarse para identificar meses secos y húmedos, a partir de las precipitaciones medias mensuales normales. Dicho índice clasifica los meses húmedos con valores mayores a 1, mientras que los clasifica como secos cuando son menores a 1.

Angot (1897) propone la siguiente fórmula para determinar el coeficiente pluviométrico:

$$\text{Coef. pluv.} = \frac{Pmm * 365}{Pma * d}$$

Donde:

Pmm: Precipitación media mensual

Pma: Precipitación media anual

d: Días del mes considerado

A partir de esta ecuación fue determinado el coeficiente pluviométrico para las estaciones de trabajo entre los años 2016-2021.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Claro-La Batea	2017	1,36	0,74	1,29	1,30	2,61	1,13	0,32	0,51	0,35	0,39	1,04	0,94
	2018	0,67	1,78	1,51	1,24	1,20	0,42	0,55	0,42	0,75	1,97	1,18	0,38
	2019	0,65	1,23	1,84	1,74	1,68	0,22	0,45	0,44	0,60	0,76	1,41	0,99
	2020	0,36	0,51	0,90	1,12	1,11	0,90	0,81	1,03	0,98	1,02	0,77	2,47
	2021	0,31	0,82	0,70	0,53	0,57	0,91	1,61	1,79	0,50	1,72	1,44	1,06

Tabla 12. Coeficiente pluviométrico / Estación Río Claro-La Batea.

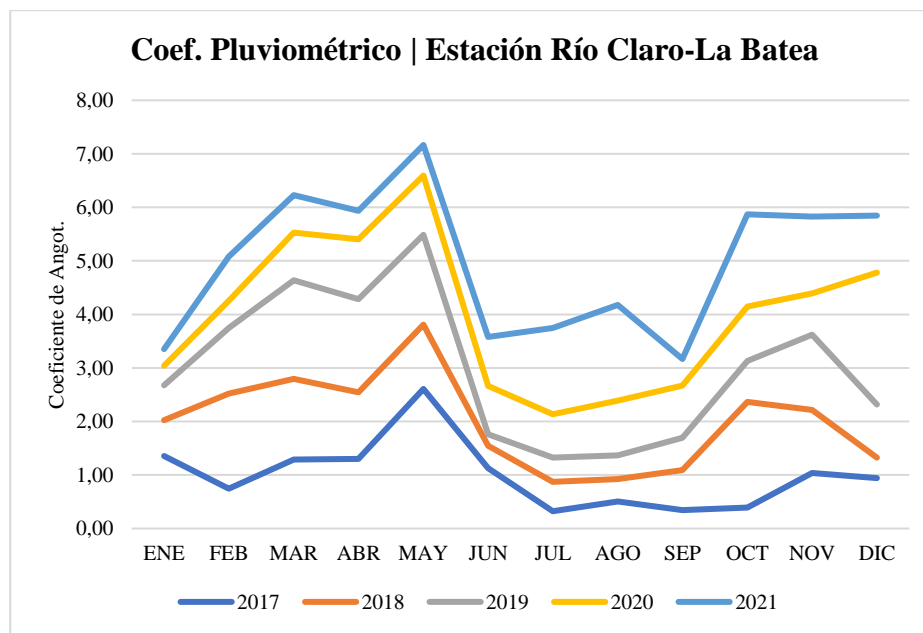


Fig. 50. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico / Estación Río Claro-La Batea.

Para esta estación Río Claro-La Batea fue descartada la determinación del coeficiente pluviométrico para el año 2016 debido a la falta de información de este año. A partir de la fig. 50, se puede distinguir que todos los años evaluados siguen más o menos la misma tendencia, con un primer periodo lluvioso entre abril y mayo, con picos en el mes de mayo, y un segundo periodo de lluvias determinado entre los meses de octubre y noviembre. Por otro lado, se identifican dos periodos de sequía, el primero comienza con la disminución de la precipitación entre diciembre y enero extendiéndose hasta febrero; el segundo periodo se da entre junio y septiembre.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Claro-La Guayana	2016	0,49	0,57	1,08	0,54	1,26	0,45	0,51	0,38	1,26	1,71	1,75	1,97
	2017	1,13	0,90	1,11	1,04	1,87	1,13	0,38	0,46	0,91	0,84	1,12	1,12
	2018	0,62	2,13	1,23	1,39	1,47	0,42	0,69	0,49	0,56	0,89	1,84	0,40
	2019	0,47	0,48	1,16	1,50	1,87	1,14	0,46	0,64	0,68	0,83	1,48	1,26
	2020	0,75	0,40	0,84	1,48	0,79	1,07	0,91	0,87	0,79	0,68	1,71	1,72
	2021	0,35	0,96	1,25	1,09	1,15	1,63	1,26	1,00	0,86	0,59	0,73	1,15

Tabla 13. Coeficiente pluviométrico | Estación Río Claro-La Guayana.

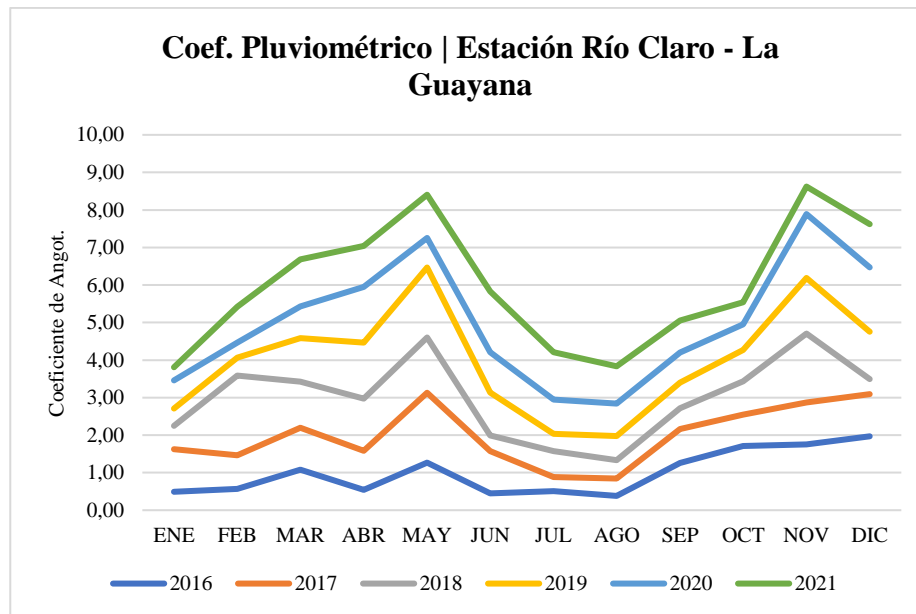


Fig. 51. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico | Estación Río Claro-La Guayana.

Para la estación Río Claro-La Guayana, la fig. 51 refleja las tendencias que se presentan en la precipitación a lo largo del año. Se identifican dos periodos marcados por un aumento en las precipitaciones, el primero se da entre marzo y mayo, alcanzando su punto máximo en mayo; el segundo se da entre octubre y noviembre, con su punto más alto en el mes de noviembre. Por otro lado, se presentan dos periodos de sequía, el primero comienza con la disminución de la precipitación entre diciembre y enero extendiéndose hasta febrero, y nuevamente de junio a agosto.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Papayal	2016	0,35	0,42	1,40	1,31	1,25	0,85	0,83	0,22	0,84	1,17	1,53	1,80
	2017	1,09	0,36	1,54	1,03	1,44	0,87	0,31	0,36	0,56	1,48	1,94	0,98
	2018	0,45	2,39	1,69	1,11	1,22	0,34	0,48	0,37	0,68	1,57	1,57	0,25
	2019	0,56	0,91	1,80	1,68	1,59	0,63	0,73	0,20	0,72	0,64	1,42	1,12
	2020	0,22	0,37	0,99	0,81	1,94	0,75	0,79	1,15	1,32	1,17	1,24	1,21
	2021	0,22	0,91	1,28	1,08	1,16	1,70	1,29	0,98	0,81	0,50	1,38	0,72

Tabla 14. Coeficiente pluviométrico | Estación Papayal.

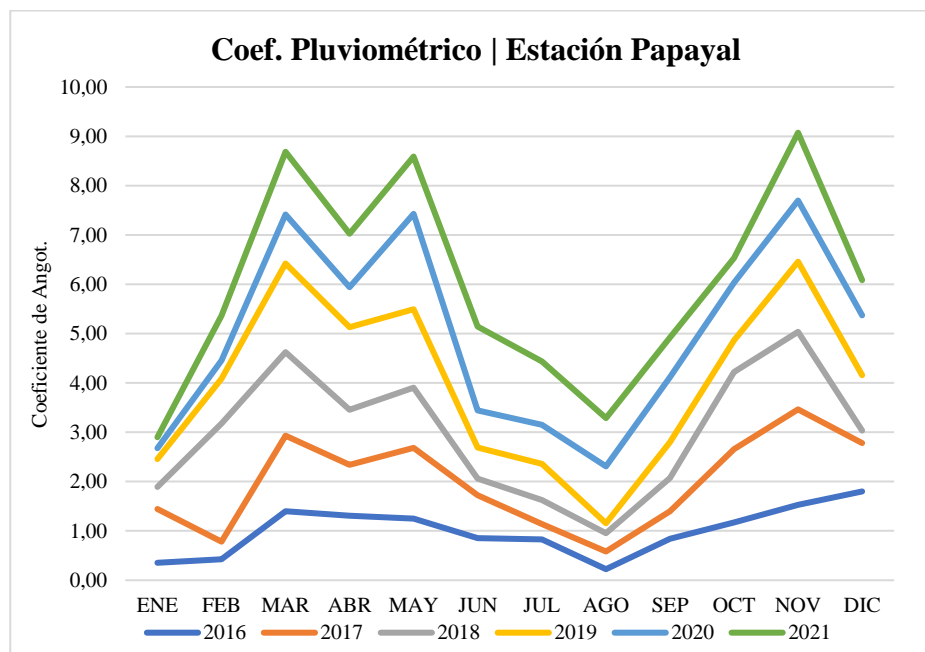


Fig. 52. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico | Estación Papayal.

En el caso de la estación Papayal, la fig. 52 representa las tendencias evidenciadas en la precipitación a lo largo del año. Se distinguen dos periodos marcados por un aumento en las precipitaciones, el primero ocurre durante los meses de marzo y mayo, mostrando dos picos similares separados por una reducción en la precipitación en el mes de abril; el segundo se da entre octubre y noviembre, con su punto más alto en el mes de noviembre, siendo este el valor más alto del año. Además, se identifican dos periodos de sequía, el primero entre diciembre y febrero, y

nuevamente de junio a agosto, siendo este último, el mes con menores índices de precipitación al año.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Q. Nereidas- CHEC	2016	0,25	0,63	0,71	0,35	1,44	0,56	0,72	0,30	0,95	1,93	2,07	2,08
	2017	0,95	0,59	0,33	0,93	1,82	1,59	0,48	0,63	0,70	1,04	1,85	1,10
	2018	0,58	1,41	1,29	2,25	1,17	0,26	0,69	0,66	0,60	0,94	1,67	0,55
	2019	0,60	1,06	1,08	0,89	1,22	0,56	0,18	0,86	0,67	1,58	2,48	0,85
	2020	0,37	0,97	0,97	1,23	0,47	1,04	0,81	1,25	0,88	1,48	1,94	0,62
	2021	0,32	0,90	1,43	1,02	1,16	1,52	1,38	0,53	0,39	0,74	1,74	0,89

Tabla 15. Coeficiente pluviométrico | Estación Q. Nereidas-CHEC.

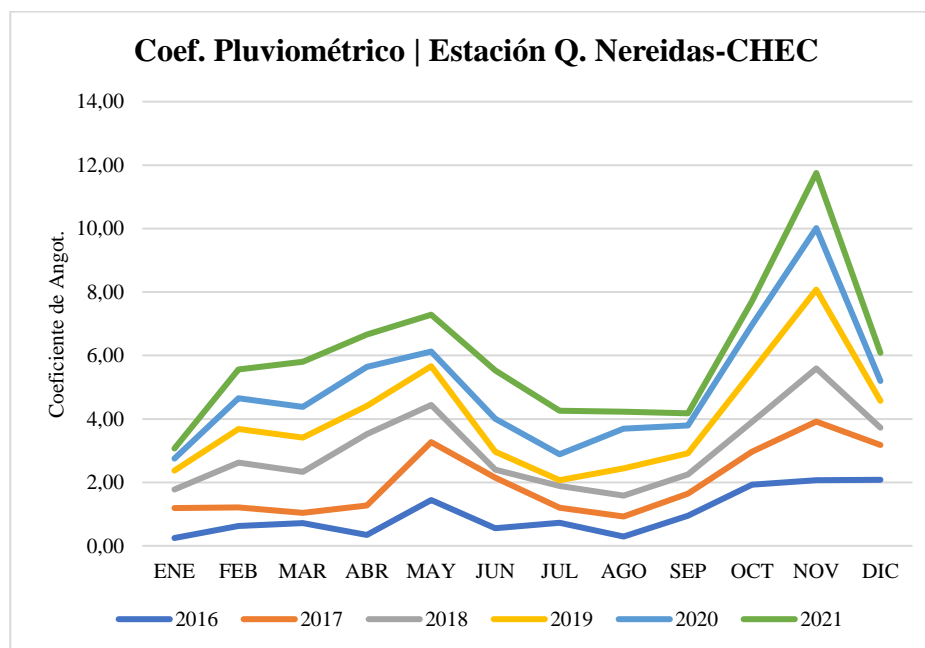


Fig. 53. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico | Estación Q. Nereidas-CHEC.

En el caso de la estación Q. Nereidas-CHEC, en la fig. 53 se presentan las tendencias en la precipitación a lo largo del año. Se distinguen dos periodos con incrementos en la precipitación, el primero entre los meses de marzo y mayo, alcanzando los picos más altos de este periodo en mayo. Para el segundo periodo lluvioso, que abarca los meses de octubre a noviembre, ocurre un incremento en las precipitaciones significativo en comparación del primer periodo, alcanzando el

máximo pico anual en noviembre. Además, se distinguen dos periodos de sequía, el primero abarca entre los meses de diciembre y febrero, mientras el segundo abarca los meses de junio a septiembre, con el punto más bajo en agosto.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Pirineos-CHEC	2016	0,72	1,21	2,03	0,41	1,34	0,68	0,38	0,62	0,76	1,55	1,50	0,79
	2017	0,43	1,30	1,35	1,01	1,60	1,11	0,25	0,43	0,66	1,39	1,48	1,02
	2018	0,59	1,13	1,02	1,59	1,61	0,38	0,46	0,39	0,71	2,30	1,38	0,46
	2019	0,34	1,11	1,36	1,80	1,51	0,70	0,31	0,76	0,78	1,19	1,42	0,75
	2020	0,55	0,59	1,05	0,95	0,47	0,97	0,40	1,25	1,01	1,56	2,05	1,16
	2021	0,26	1,78	2,03	0,87	1,27	0,96	0,43	0,91	0,63	1,16	1,20	0,57

Tabla 16. Coeficiente pluviométrico | Estación Pirineos-CHEC.

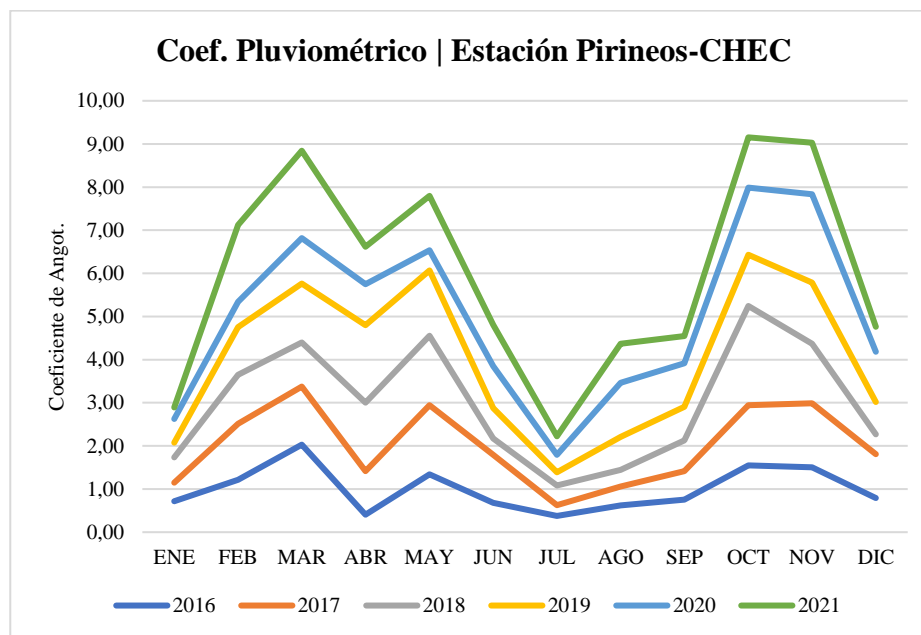


Fig. 54. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico | Estación Pirineos-CHEC.

Para la estación Pirineos-CHEC, la fig. 54 se muestra el comportamiento de la precipitación a lo largo del año. Se destacan dos periodos lluviosos. El primero comprende los meses de marzo a mayo, donde se observan dos picos, siendo marzo el mes con la precipitación más alta de este periodo. Estos picos están separados por una disminución en la precipitación durante abril. El

segundo periodo comprende los meses de octubre y noviembre, este periodo se caracteriza por ser un pico casi continuo de altas precipitaciones entre estos dos meses y, además, las más altas al año. Se observa una reducción en las precipitaciones entre diciembre y enero, marcando el primer período de sequía; el segundo período comprende los meses de junio a agosto, con los valores más bajos de precipitación al año en el mes de julio.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Las Brisas	2016	0,26	0,94	0,69	1,50	0,13	0,87	1,04	0,54	0,95	1,79	2,36	0,99
	2017	0,71	0,39	2,12	1,17	1,97	1,17	0,39	0,42	0,63	0,89	1,20	0,89
	2018	0,55	0,98	1,27	1,51	2,15	0,74	0,79	0,56	0,35	1,78	0,94	0,37
	2019	0,55	1,12	1,43	1,47	1,64	0,72	0,52	0,15	1,01	1,47	1,32	0,62
	2020	0,45	0,57	0,67	0,92	1,02	1,24	1,03	1,25	1,59	1,35	1,42	0,50
	2021	0,25	1,39	1,64	0,76	1,39	1,39	0,60	1,48	0,78	0,93	1,03	0,40

Tabla 17. Coeficiente pluviométrico | Estación Las Brisas.

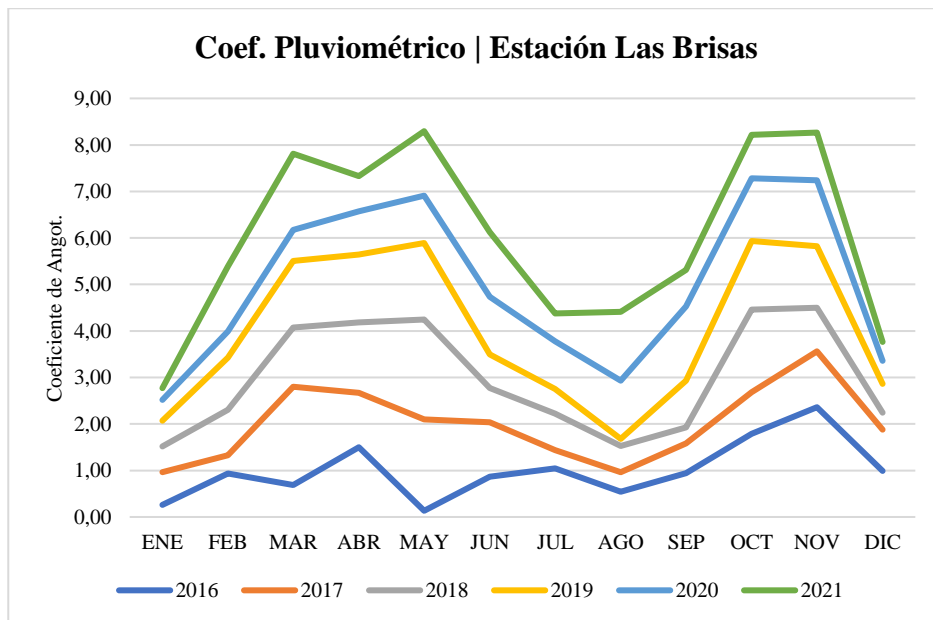


Fig. 55. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico | Estación Las Brisas.

En este caso, para la estación Las Brisas, la fig. 55 se muestra el comportamiento de la precipitación a lo largo del año. Se distinguen dos periodos lluviosos. El primero comprende los meses de marzo a mayo, en donde generalmente el índice de precipitación más alta de este periodo

se da en el mes de mayo. El segundo periodo comprende los meses de octubre y noviembre, este periodo se caracteriza generalmente por ser un pico casi continuo de altas precipitaciones entre estos dos meses y, además, las más altas al año. Se observa una reducción en las precipitaciones entre diciembre y enero, marcando el primer período de sequía; el segundo período comprende los meses de julio a septiembre, con el índice de precipitación más bajo del año en el mes de agosto.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Q. Molinos-P.N.N.N.	2016	0,33	1,06	0,32	1,20	0,94	0,68	0,82	0,18	0,93	1,85	2,55	1,17
	2017	0,84	0,94	0,83	1,33	1,71	1,15	0,30	0,46	0,91	1,09	1,69	1,00
	2018	0,61	1,69	1,87	1,77	1,06	0,55	0,48	0,26	0,56	1,58	0,97	0,35
	2019	0,28	1,06	2,11	2,18	2,02	0,60	0,25	0,35	0,36	0,94	1,10	0,48
	2020	0,21	0,95	1,21	1,41	0,95	1,52	1,07	0,30	0,54	0,26	2,07	1,40
	2021	0,43	1,14	1,82	0,90	1,37	1,34	0,75	0,27	0,31	1,28	1,08	0,82

Tabla 18. Coeficiente pluviométrico / Estación Q. Molinos-P.N.N.N.

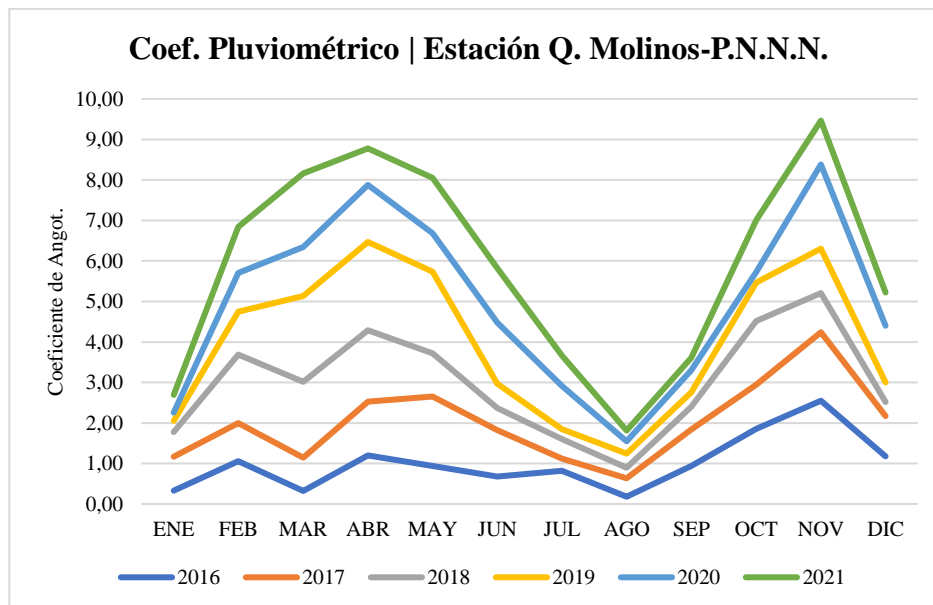


Fig. 56. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico / Estación Q. Molinos-P.N.N.N.

En relación a la estación Q. Molinos-P.N.N.N., la fig. 56 representa las tendencias que se muestran en la precipitación a lo largo del año. Se muestran dos periodos marcados por un aumento en las precipitaciones. El primero abarca desde febrero hasta mayo, mostrando algunas altas y

bajas, en donde se destacan una disminución en el índice de precipitación durante el mes de marzo y el valor más alto de precipitación para este periodo durante abril. El segundo periodo se da entre octubre y noviembre, con su punto más alto en el mes de noviembre, siendo este el valor más alto del año. Además, se identifican dos periodos de sequía, el primero entre diciembre y enero, el segundo comienza con una disminución en las precipitaciones durante el mes de junio extendiéndose hasta septiembre, siendo agosto donde se dan los menores índices de precipitación al año.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Q. Nereidas-P.N.N.N.	2016	0,24	0,64	0,41	1,27	0,37	0,43	2,10	0,39	0,79	1,07	1,56	2,69
	2017	0,45	0,49	1,64	0,98	1,56	0,96	0,41	1,76	0,71	0,79	1,30	0,90
	2018	0,65	1,48	1,44	1,60	2,09	1,69	0,52	0,55	0,53	0,25	0,97	0,32
	2019	0,36	0,92	1,49	1,43	1,36	0,76	0,67	0,43	0,96	1,46	1,44	0,73
	2020	0,47	0,53	0,59	0,89	1,01	1,67	1,18	1,57	1,11	1,05	0,89	1,01

Tabla 19. Coeficiente pluviométrico | Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.

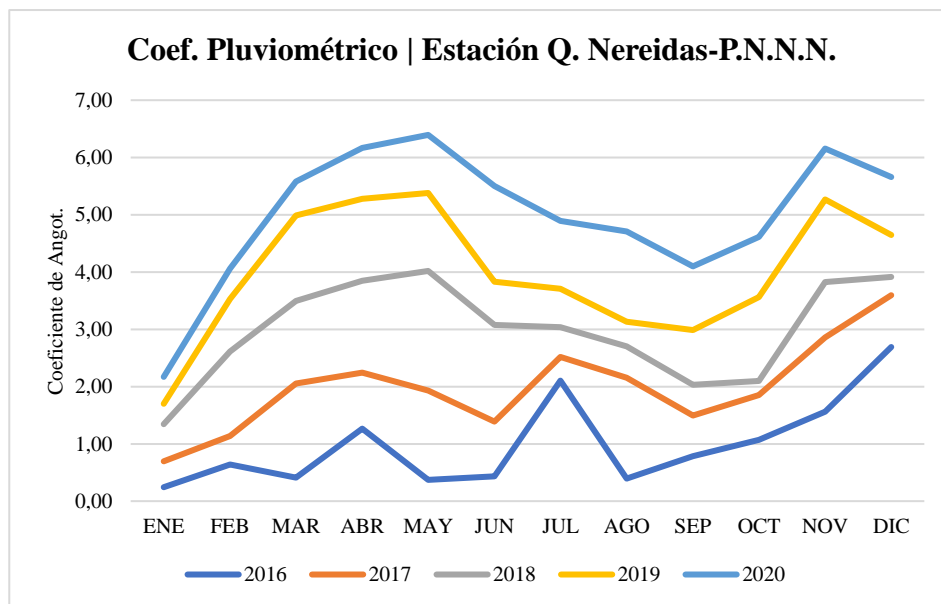


Fig. 57. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico | Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.

Para esta estación Q. Nereidas-P.N.N.N. la determinación del coeficiente pluviométrico para el año 2021 fue descartada debido a la falta de información disponible. La fig. 57 muestra las tendencias de la precipitación a lo largo del año. Se puede distinguir un primer periodo lluvioso que suele ocurrir entre marzo y mayo, mostrando una curva creciente hasta el mes de mayo, cuando se alcanzan las precipitaciones anual más altas para esta estación. El segundo periodo de lluvias determinado entre octubre y noviembre. Asimismo, se identifican dos periodos de sequía, el primero se da con la disminución de la precipitación entre diciembre y enero, siendo enero el mes con los valores más bajos de precipitación; el segundo periodo se da generalmente entre junio y septiembre.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Río Claro-P.N.N.N.	2016	0,13	0,63	0,57	1,61	1,38	1,26	1,88	0,52	1,27	0,96	1,31	0,52
	2017	0,43	1,59	1,31	1,12	1,26	1,29	1,14	0,93	0,83	0,76	0,88	0,51
	2018	0,40	0,64	0,93	1,24	1,57	1,79	1,67	0,92	0,63	1,09	0,89	0,21
	2019	0,33	0,91	1,89	1,34	1,20	1,22	1,22	0,24	0,91	1,31	0,93	0,52
	2020	0,42	0,49	0,45	0,78	1,11	1,74	1,76	1,48	1,59	1,03	0,54	0,62

Tabla 20. Coeficiente pluviométrico / Estación Río Claro-P.N.N.N.

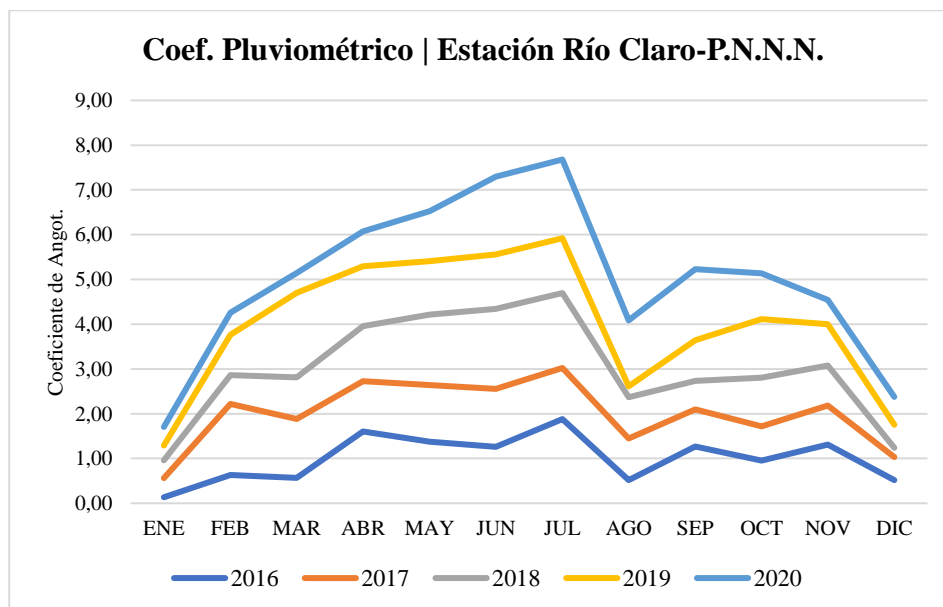


Fig. 58. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico / Estación Río Claro-P.N.N.N.

Para esta estación Río Claro-P.N.N.N. la determinación del coeficiente pluviométrico para el año 2021 fue descartada debido a la falta de información disponible. En la fig. 58 se muestra la tendencia de la precipitación a lo largo del año. Se identifica un primer periodo de lluvias que suele ocurrir entre abril y julio, en donde se alcanzan los valores más altos de precipitación al año para esta estación. El segundo periodo de lluvias se da aproximadamente entre septiembre y noviembre. Asimismo, se identifican dos periodos de sequía, el primero se da con la disminución de la precipitación entre diciembre y enero, siendo enero el mes con los valores más bajos de precipitación; el segundo periodo se da generalmente en agosto y parte de septiembre.

Coeficiente Pluviométrico													
Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Santa Isabel-P.N.N.N.	2016	0,20	0,59	0,68	1,30	1,76	1,03	1,04	0,93	1,48	1,31	1,17	0,50
	2017	0,53	0,20	0,60	1,60	0,78	0,63	0,60	2,24	1,30	1,57	1,12	0,78
	2018	0,49	0,71	0,67	0,78	0,63	0,51	0,59	1,46	3,10	2,00	0,80	0,26
	2019	0,61	0,90	1,16	2,16	0,86	0,67	0,88	0,48	0,95	1,40	1,28	0,68
	2020	0,47	0,53	0,68	0,86	0,88	1,48	1,17	1,43	1,27	1,20	1,11	0,90
	2021	0,25	2,12	2,41	1,03	1,51	1,14	0,51	1,08	0,16	0,28	1,22	0,40

Tabla 21. Coeficiente pluviométrico | Estación Santa Isabel-P.N.N.N.

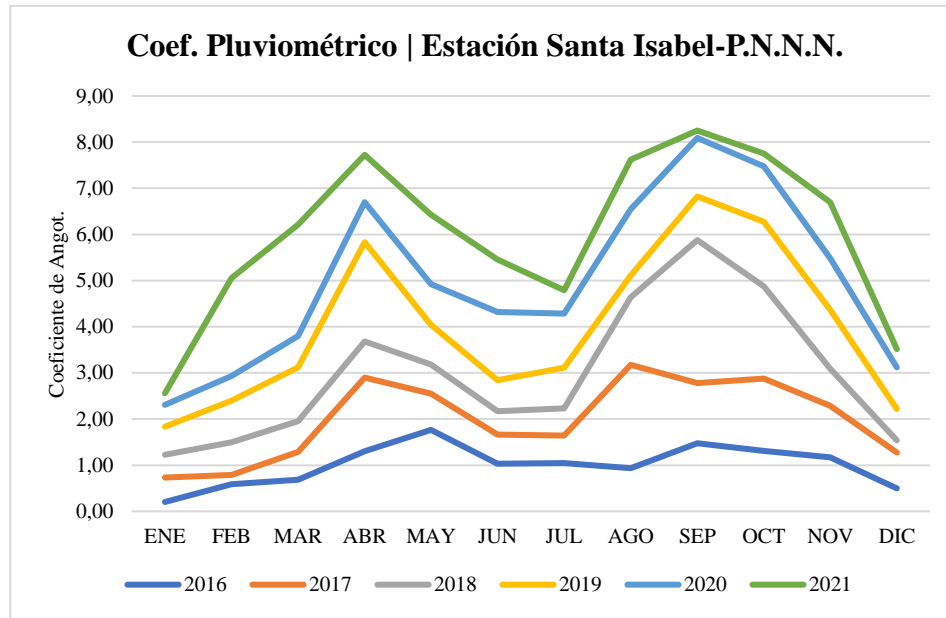


Fig. 59. Representación gráfica del coeficiente pluviométrico | Estación Santa Isabel-P.N.N.N.

En este caso, para la estación Santa Isabel-P.N.N.N., la fig. 59 se muestra el comportamiento de la precipitación a lo largo del año. Se distinguen dos periodos lluviosos. El primero comprende los meses de febrero a abril, en donde generalmente el índice de precipitación más alta de este periodo se da en el mes de abril. El segundo periodo comprende los meses de agosto y octubre, este periodo se caracteriza generalmente por ser un pico de precipitación máxima en el mes de septiembre que, además, es el más alto del año. Se observa una reducción en las precipitaciones empezando desde noviembre, los valores más bajos del índice de precipitación se alcanzan entre diciembre y enero, marcando el primer período de sequía; el segundo período comprende los meses de julio a septiembre.

En general, el coeficiente pluviométrico permitió definir los patrones recurrentes que se presentan en la precipitación de la subcuenca de Río Claro. En todas las estaciones fue posible definir un patrón bimodal, con dos periodos de lluvia que generalmente ocurren entre marzo a mayo y entre octubre y noviembre, siendo el segundo periodo el que alcanza los índices de

precipitación más altos. Por otro lado, se identificaron dos periodos de sequía. El primero de ellos ocurre generalmente entre diciembre y enero, el segundo periodo se extiende generalmente entre junio y septiembre, siendo agosto el mes con los valores de precipitación más bajos al año. De esta manera se puede definir el inicio del año hidrológico para la subcuenca de Río Claro generalmente entre los meses de octubre y noviembre.

10.2.5 Precipitación media

Según Béjar (2004), la precipitación que cae en un sitio específico es diferente a la que cae en sus alrededores, así sean sitios cercanos, además los pluviómetros solo registran la precipitación puntual del sitio en donde se encuentra instalado el instrumento. En algunos trabajos hidrológicos se requiere conocer la precipitación media de la zona de estudio, por lo que se requiere promediar la altura de precipitación correspondiente a un cierto número de estaciones por diversos métodos.

Para conocer la precipitación media en la zona de estudio se aplicaron los métodos: aritmético, polígonos de Thiessen e Isoyetas con la ayuda de los softwares ArcGIS 10.8 y Excel.

10.2.5.1 Método aritmético

Según Béjar (2004), consiste en realizar la sumatoria del promedio aritmético de la precipitación registrada en cada una de las estaciones localizadas en la zona de estudio. La precisión de este método depende de la cantidad de estaciones disponibles, entre mayor sea el número, más preciso será el resultado; y de la distribución espacial de las estaciones en la zona estudiada. En este caso la zona cuenta con 10 estaciones bien distribuidas a lo largo de la cuenca, por lo que se puede esperar que el valor obtenido a partir de este método sea relativamente más preciso. El promedio aritmético se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$P_{med} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n P_i$$

Donde:

P_{med} : Precipitación media de la zona o de la cuenca.

P_i : Precipitación de la estación i .

n : Número de estaciones utilizadas.

10.2.5.1.1 Precipitación media multianual de la subcuenca de Río Claro

n	10
Papayal (mm)	1897.67
Las Brisas (mm)	1399.86
Río Claro-La Batea (mm)	1424.30
Río Claro-La Guayana (mm)	1638.52
Q. Molinos-P.N.N.N. (mm)	610.45
Q. Nereidas-P.N.N.N. (mm)	709.50
Río Claro-P.N.N.N. (mm)	1435.45
Santa Isabel-P.N.N.N. (mm)	792.91
Q. Nereidas-CHEC (mm)	825.92
Pirineos-CHEC (mm)	1119.70
P med (mm)	1185.43

Tabla 22. Precipitación media multianual de la subcuenca de Río Claro a partir del método aritmético.

La precipitación media multianual de la subcuenca de Río Claro a partir del método aritmético fue de 1185.43 mm, la cual, según la OMM (2008), las características climáticas de la cuenca a partir la precipitación total anual serían las de una región climática con precipitación abundante. Cabe recordar que algunas estaciones carecen de datos en ciertos años, como Río Claro-P.N.N.N. y Q. Nereidas-P.N.N.N. que no presentan datos durante el año 2021, y la estación Río Claro-La Batea que no presenta datos durante el año 2016. Por lo que el valor promedio de dichas estaciones solo contempla los valores de precipitación anual que presentan registros de

precipitación, es decir, se contemplan los valores de 5 años, mientras las demás estaciones contemplan el promedio de 6 años.

Precipitación media mensual multianual (mm)													
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (mm)
Papayal	78,5	136,0	235,1	183,0	224,1	140,4	121,9	87,5	123,8	172,5	237,5	157,5	1897,7
Las Brisas	56,1	100,7	165,6	140,9	173,7	122,2	85,5	91,9	100,1	161,4	157,0	75,2	1430,2
Río Claro-La Batea	96,2	140,8	178,5	159,6	199,0	95,6	108,7	118,0	84,3	180,4	164,6	144,7	1670,4
Río Claro-La Guayana	86,8	115,7	153,4	159,4	197,9	130,1	93,6	86,9	107,5	121,8	188,2	165,1	1606,5
Q. Molinos-P.N.N.N.	38,5	65,5	84,5	90,0	88,7	56,7	34,5	19,7	40,4	77,6	94,3	52,4	743,0
Q. Nereidas-P.N.N.N.	30,9	50,2	80,1	83,6	90,1	75,1	71,6	73,5	57,2	66,6	86,8	85,9	851,7
Río Claro-P.N.N.N.	41,4	97,4	128,8	145,0	159,8	170,5	185,2	96,6	120,2	124,7	108,7	57,1	1435,4
Santa Isabel-P.N.N.N.	38,6	62,2	84,7	107,3	90,3	72,0	67,0	123,0	135,2	123,9	92,8	49,6	1046,6
Q. Nereidas-CHEC	40,7	65,3	73,8	85,1	96,4	70,0	55,6	53,6	52,5	98,4	145,6	79,5	916,6
Pirineos-CHEC	45,1	106,2	142,5	99,6	125,8	74,3	35,3	67,5	68,4	144,8	136,2	74,0	1119,7

Tabla 23. Precipitación media multianual mensual por el método aritmético (2016-2021).

10.2.5.1.2 Precipitación media multianual de la zona de interés

n	2
Q. Nereidas-CHEC	825,92
Pirineos-CHEC	1119,70
P med	972,81

Tabla 24. Precipitación media multianual del área de estudio a partir del método aritmético.

La precipitación media multianual de la zona de interés del proyecto geotérmico a partir del método aritmético fue de 972.81 mm, la cual, según la OMM (2008), las características climáticas del área a partir la precipitación total anual serían las de una región climática con precipitación normal. Cabe resaltar que dentro de la zona de interés solo hay dos estaciones meteorológicas, por lo que el promedio podría no ser tan preciso.

10.2.5.2 Método de polígonos de Thiessen

Según Béjar (2004), para este método se necesita localizar espacialmente las estaciones a utilizar en la zona de estudio, ya que este método delimita polígonos o áreas de influencia para cada una de las estaciones. Es equivalente a un promedio ponderado, donde el valor que pondera la precipitación es el área de influencia que tiene la estación dentro de cuenca.

$$P_{med} = \frac{1}{A_T} * \sum_{i=1}^n A_i * P_i$$

Donde:

A_T : Área Total

A_i : Área de influencia del polígono de Thiessen para la estación i

P_i : Precipitación media de la estación i

n : Número de estaciones

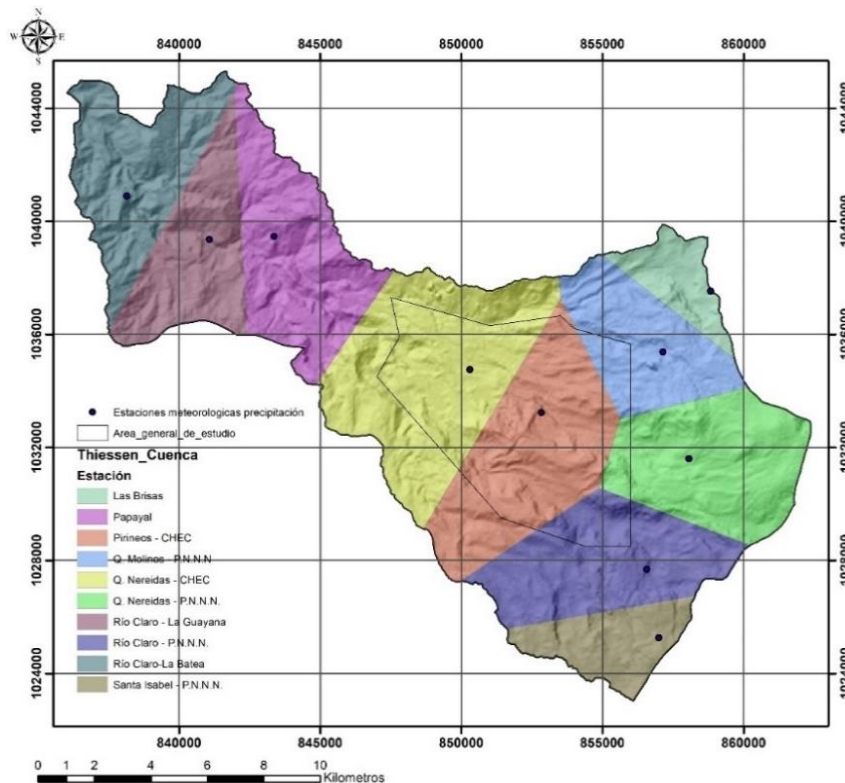


Fig. 60. Polígonos de Thiessen en la subcuenca de Río Claro.

10.2.5.2.1 Precipitación media anual para la subcuenca de Río Claro

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2016						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Papayal	843359,794	1039469,36	2304	1843	28,0	51646,7
Las Brisas	858825,734	1037533,86	4133	1241	8,1	10043,9
Río Claro-La Guayana	841067,712	1039358,33	1864	1214	45,0	54674,0
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	755	20,2	15263,1
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	920	28,0	25751,8
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1463	27,9	40820,8
Santa Isabel-P.N.N.N.	856987,809	1025265,76	4812	967	12,1	11738,5
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	944	42,2	39852,8
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1105	32,9	36411,9
Total					244,6	286203,5
Precipitación promedio (mm)						1170,2

Tabla 25. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2016 de la Subcuenca de Río Claro.

Cabe resaltar que la estación Río Claro-La Batea no registra datos durante el año 2016, por lo que la estación fue descartada del cálculo de la precipitación media anual.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2017						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Papayal	843359,794	1039469,36	2304	1992,5	28,0	55836,2
Las Brisas	858825,734	1037533,86	4133	1630,6	8,1	13201,2
Río Claro-La Batea	838137,828	1040891,11	1589	1631,7	24,1	39373,5
Río Claro-La Guayana	841067,712	1039358,33	1864	1712,1	20,9	35818,0
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	1045,4	20,2	21127,2
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	1104,2	28,0	30921,2
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1586,4	27,9	44272,2
Santa Isabel-P.N.N.N.	856987,809	1025265,76	4812	1414,0	12,1	17159,8
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	1063,4	42,2	44890,2
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1246,7	32,9	41076,6
Total					244,6	343676,0
Precipitación promedio (mm)						1405,1

Tabla 26. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2017 de la Subcuenca de Río Claro.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2018						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km²)	Ppt*Área
Papayal	843359,794	1039469,36	2304	2000,9	28,0	56071,6
Las Brisas	858825,734	1037533,86	4133	1439,1	8,1	11650,6
Río Claro-La Batea	838137,828	1040891,11	1589	2258,4	24,1	54495,2
Río Claro-La Guayana	841067,712	1039358,33	1864	1786,7	20,9	37377,3
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	749,9	20,2	15156,4
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	690,2	28,0	19329,0
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1481,0	27,9	41330,7
Santa Isabel-P.N.N.N.	856987,809	1025265,76	4812	1555,7	12,1	18880,0
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	1025,8	42,2	43302,0
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1155,2	32,9	38061,8
Total					244,6	335654,5
Precipitación promedio (mm)						1372,3

Tabla 27. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2018 de la Subcuenca de Río Claro.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2019						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km²)	Ppt*Área
Papayal	843359,794	1039469,36	2304	1745,5	28,0	48914,5
Las Brisas	858825,734	1037533,86	4133	1297,7	8,1	10506,6
Río Claro-La Batea	838137,828	1040891,11	1589	1476,1	24,1	35618,5
Río Claro-La Guayana	841067,712	1039358,33	1864	2025,0	20,9	42363,5
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	814,1	20,2	16452,1
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	684,8	28,0	19176,0
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1465,2	27,9	40889,8
Santa Isabel-P.N.N.N.	856987,809	1025265,76	4812	731,0	12,1	8871,6
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	733,5	42,2	30962,6
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	940,5	32,9	30987,8
Total					244,6	284742,9
Precipitación promedio (mm)						1164,2

Tabla 28. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2019 de la Subcuenca de Río Claro.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2020						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km²)	Ppt*Área
Papayal	843359,794	1039469,36	2304	1366,9	28,0	38304,9
Las Brisas	858825,734	1037533,86	4133	1195,3	8,1	9677,2
Río Claro-La Batea	838137,828	1040891,11	1589	1057,1	24,1	25508,9
Río Claro-La Guayana	841067,712	1039358,33	1864	1345,7	20,9	28153,1
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	397,8	20,2	8038,7
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	859,5	28,0	24068,7
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1181,9	27,9	32984,2
Santa Isabel-P.N.N.N.	856987,809	1025265,76	4812	755,5	12,1	9168,7
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	858,3	42,2	36230,2
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	934,3	32,9	30782,1
Total					244,6	242916,5
Precipitación promedio (mm)						993,2

Tabla 29. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2020 de la Subcuenca de Río Claro.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2021						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km²)	Ppt*Área
Papayal	843359,794	1039469,36	2304	2437,2	28,0	68298,1
Las Brisas	858825,734	1037533,86	4133	1778,1	8,1	14395,6
Río Claro-La Batea	838137,828	1040891,11	1589	1928,6	24,1	46536,0
Río Claro-La Guayana	841067,712	1039358,33	1864	1555,3	20,9	32537,9
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	695,4	39,4	27400,5
Santa Isabel-P.N.N.N.	856987,809	1025265,76	4812	856,3	40,3	34492,8
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	874,5	42,2	36917,7
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1336,4	41,5	55488,6
Total					244,6	316067,2
Precipitación promedio (mm)						1292,2

Tabla 30. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2021 de la Subcuenca de Río Claro.

Cabe recordar que las estaciones Río Claro-P.N.N.N. y Q. Nereidas-P.N.N.N. no cuentan con datos de precipitación para el año 2021 por lo que fueron descartadas del cálculo de la precipitación media en este año.

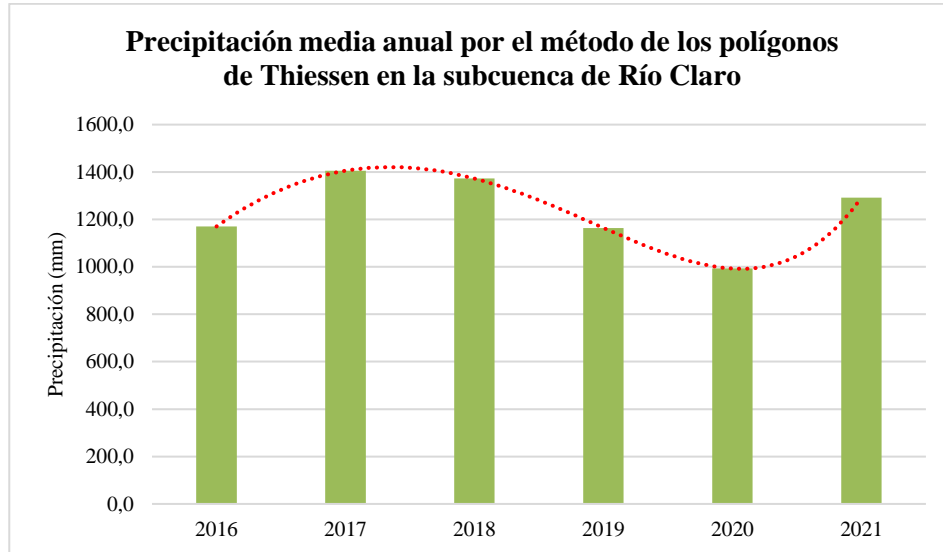


Fig. 61. Variación de la precipitación media anual por el método de los polígonos de Thiessen en la subcuenca de Río Claro durante los años 2016-2021.

La precipitación media anual en la subcuenca de Río Claro no es constante en el transcurso de los años, presenta variaciones anuales con un comportamiento parabólico, que se va alternando entre ascendente y descendente como lo sugiere la fig. 61, indicando que la variación de las precipitaciones se da de manera gradual (Román, 2021). Según la clasificación de la OMM (2008), las características climáticas de la subcuenca de Río Claro varían entre una precipitación total anual normal (500-1000 mm/año) y abundante (1000-2000 mm/año).

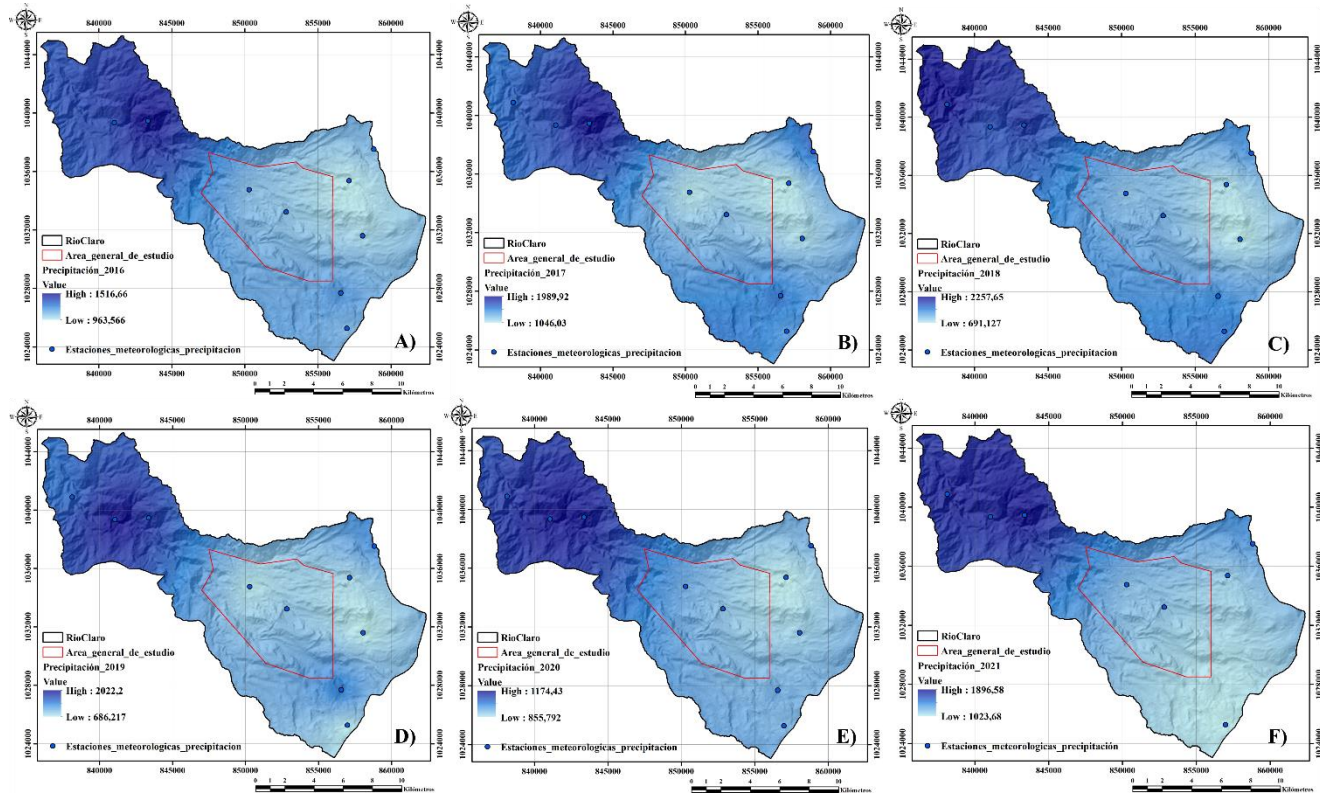


Fig. 62. Distribución espacio-temporal de la precipitación en la subcuenca de Río Claro. (A). Año 2016. (B). Año 2017. (C). Año 2018. (D). Año 2019. (E). Año 2020. (F). Año (2021).

Como se muestra en la fig. 62 elaborada en el software ArcGIS 10.8 a partir de la interpolación por el método de kriging, los valores de precipitación más altos se alcanzan en las zonas más bajas de la cuenca, es decir, hacia el NW de la zona de interés, que corresponden a las estaciones de Río Claro-La Batea (1589 m.s.n.m.), Río Claro-La Guayana (1864 m.s.n.m.) y Papayal (2304 m.s.n.m.), siendo esta última la que generalmente presenta los valores más altos de precipitación anual. Por otro lado, las variaciones anuales más notables en la precipitación se dan en las zonas más altas de la cuenca, en donde, por ejemplo, la secuencia desde la fig. 62(A) hasta la fig. 62(C) evidencia un aumento en las precipitaciones entre los años 2016 a 2018, reflejado en un aumento en el área de color amarillo.

Según Pabón et al. (1998) a la escala interanual, estas fluctuaciones en la precipitación media anual corresponden a ciclos climáticos de más de un año caracterizados por la alternancia

de años lluviosos con años secos que podrían estar relacionados con la influencia de los fenómenos de El Niño y La Niña con una oscilación entre uno y otro de entre 2 a 2.5 años, denominada oscilación cuasibienal.

10.2.5.2.2 Precipitación media multianual para la subcuenca de Río Claro

Ppt media multianual por el método de polígonos de Thiessen (2016-2021)						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Papayal	843359,794	1039469,36	2304	1897,7	28,0	53178,7
Las Brisas	858825,734	1037533,86	4133	1430,2	8,1	11579,2
Río Claro-La Batea	838137,828	1040891,11	1589	1670,4	24,1	40306,4
Río Claro-La Guayana	841067,712	1039358,33	1864	1606,5	20,9	33607,7
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	743,0	20,2	15015,3
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	851,7	28,0	23849,3
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1435,4	27,9	40059,5
Santa Isabel-P.N.N.N.	856987,809	1025265,76	4812	1046,6	12,1	12701,7
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	916,6	42,2	38692,6
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1119,7	32,9	36892,0
Total					244,6	305882,4
Precipitación promedio (mm)						1250,6

Tabla 31. Precipitación media multianual a partir del método de polígonos de Thiessen de la Subcuenca de Río Claro (2016-2021).

La cuenca presenta una precipitación media multianual de 1250.6 mm, que, a partir de la clasificación climática de la OMM (2008), corresponde a una región climática con precipitación abundante. Como indica la fig. 63, al igual que en la fig. 62, la precipitación tiene un comportamiento que aumenta de SE al NW. Este comportamiento está asociado a la elevación de las estaciones, en donde las zonas más bajas hacia el NW presentan mayores precipitaciones. Por el contrario, las zonas ubicadas hacia el SE presentan las mayores alturas y, por ende, las precipitaciones relativamente más bajas.

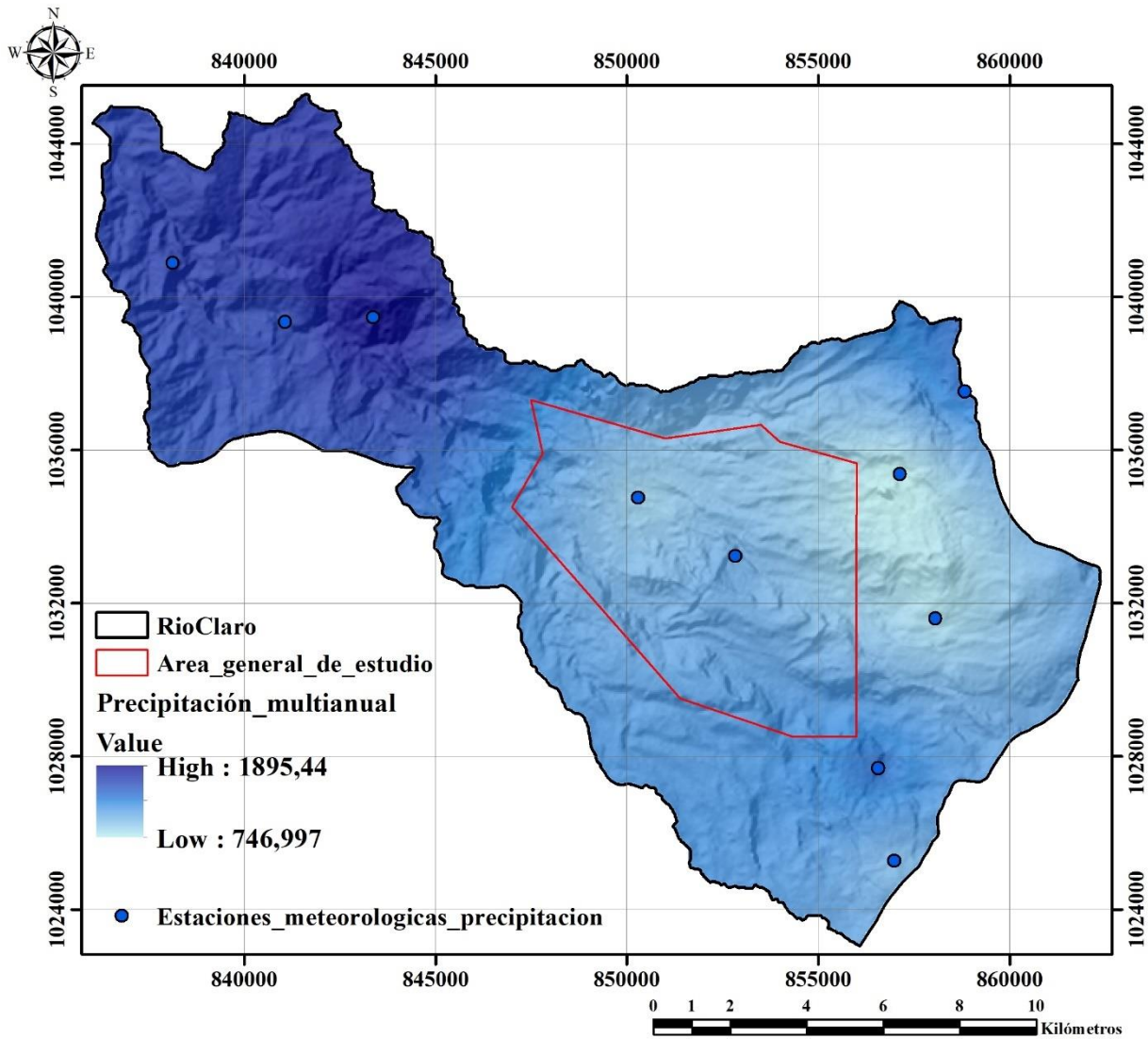


Fig. 63. Distribución espacial de la precipitación en la subcuenca de Río Claro (2016-2021).

10.2.5.2.3 Precipitación media anual para el área de estudio

Se realizó el mismo método buscando obtener solo la precipitación media anual correspondiente al área de estudio, pero en este caso solo se utilizaron las estaciones que, según la fig. 60, tienen influencia directa en las precipitaciones en la zona de interés, las cuales son Q. Molinos-P.N.N.N., Q. Nereidas-P.N.N.N., Río Claro-P.N.N.N., Q. Nereidas-CHEC y Pirineos-CHEC.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2016						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	755	3,2	2388,4
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	920	2,1	1910,8
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1463	4,5	6625,9
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	944	18,8	17781,4
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1105	25,2	27902,5
Total					53,9	56608,9
Precipitación promedio (mm)						1051,2

Tabla 32. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2016 en la zona de interés.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2017						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	1045,4	3,2	3306,1
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	1104,2	2,1	2294,3
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1586,4	4,5	7186,1
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	1063,4	18,8	20029,0
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1246,7	25,2	31477,0
Total					53,9	64292,4
Precipitación promedio (mm)						1193,8

Tabla 33. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2017 en la zona de interés.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2018						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	749,9	3,2	2371,7
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	690,2	2,1	1434,2
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1481,0	4,5	6708,6
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	1025,8	18,8	19320,3
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1155,2	25,2	29166,7
Total					53,9	59001,6
Precipitación promedio (mm)						1095,6

Tabla 34. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2018 en la zona de interés.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2019						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	814,1	3,2	2574,5
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	684,8	2,1	1422,8
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1465,2	4,5	6637,1
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	733,5	18,8	13814,8
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	940,5	25,2	23745,9
Total					53,9	48195,1
Precipitación promedio (mm)						894,9

Tabla 35. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2019 en la zona de interés.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2020						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	397,8	3,2	1257,9
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	859,5	2,1	1785,9
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1181,9	4,5	5353,9
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	858,3	18,8	16165,1
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	934,3	25,2	23588,3
Total					53,9	48151,0
Precipitación promedio (mm)						894,1

Tabla 36. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2020 en la zona de interés.

Ppt media por el método de polígonos de Thiessen para 2021						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	695,4	3,3	2305,5
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	874,5	18,8	16471,8
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1336,4	31,7	42368,0
Total					53,9	61145,2
Precipitación promedio (mm)						1135,4

Tabla 37. Precipitación media anual a partir del método de polígonos de Thiessen para el año 2021 en la zona de interés.

Cabe resaltar que, durante este año, las estaciones Q. Nereidas-P.N.N.N. y Río Claro-P.N.N.N. no presentan datos de precipitación por lo que fueron descartadas, y su área de influencia fue redistribuida entre las demás estaciones.

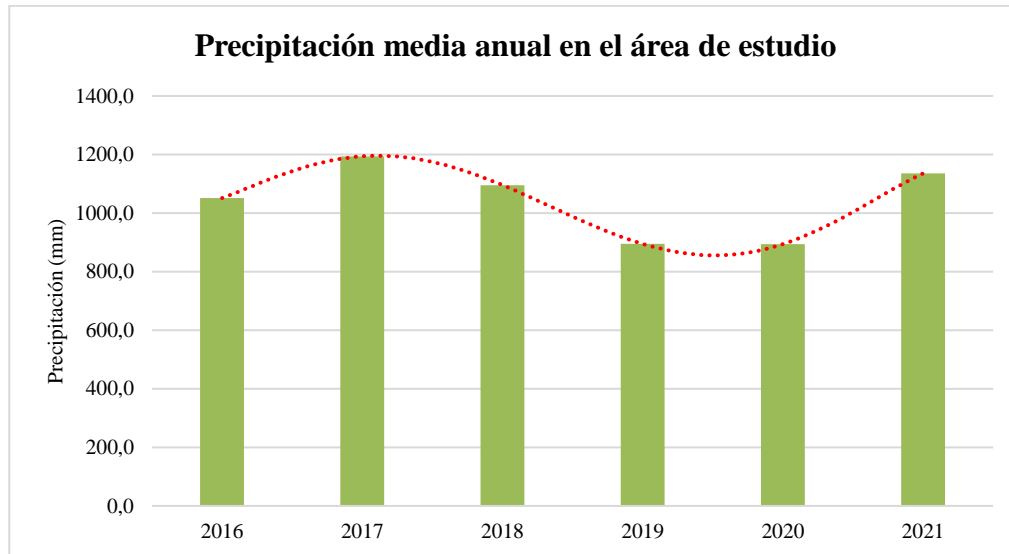


Fig. 64. Variación de la precipitación media anual en la zona de interés durante los años 2016-2021.

La precipitación media anual en la zona de interés geotérmico, al igual que en el resto de la subcuenca de Río Claro, no es constante en el transcurso de los años, también presenta variaciones anuales con un comportamiento parabólico, que se va alternando entre ascendente y descendente como se muestra en la fig. 64, Según la clasificación de la OMM (2008), las características climáticas de la zona de interés geotérmico varían entre una precipitación total anual normal (500-1000 mm/año) y abundante (1000-2000 mm/año).

En general, la precipitación dentro del área de estudio tiene un comportamiento similar al de la cuenca a la que pertenece, pero ligado al factor altitud, ya que esta zona se encuentra en la parte medio alta de la cuenca, por lo que los factores climáticos presentan un comportamiento similar a cualquier área de la cuenca, pero con valores relativamente menores debido a la altitud.

10.2.5.2.4 Precipitación media multianual para el área de estudio

Ppt media multianual por el método de polígonos de Thiessen (2016-2021)						
Estación	Este (x)	Norte (y)	Altura (z)	Ppt anual (mm)	Área (km ²)	Ppt*Área
Q. Molinos-P.N.N.N.	857136,051	1035380,13	4059	743,0	3,2	2349,6
Q. Nereidas-P.N.N.N.	858059,73	1031605,41	4415	851,7	2,1	1769,6
Río Claro-P.N.N.N.	856566,971	1027687,67	4076	1435,4	4,5	6502,3
Q. Nereidas-CHEC	850292,765	1034754,31	2950	916,6	18,8	17263,7
Pirineos-CHEC	852831,821	1033234,79	3390	1119,7	25,2	28270,3
Total					53,9	56155,6
Precipitación promedio (mm)						1042,8

Tabla 38. Precipitación media multianual a partir del método de polígonos de Thiessen en la zona de interés (2016-2021).

La zona de interés presenta una precipitación media multianual de 1042.8 mm, que, a partir de la clasificación climática de la OMM (2008), corresponde a una región climática con precipitación abundante.

10.2.5.3 Método de las Isoyetas

Según Béjar (2004), las isoyetas son curvas que unen puntos de igual precipitación y considera este método como el más exacto. Para realizarlo se necesita localizar espacialmente las estaciones a utilizar en la zona de estudio, y trazar un plano de isoyetas interpolando las alturas de precipitación entre las diferentes estaciones, esto crea un área curvada alrededor de la estación, se debe hallar el área entre isoyetas que, posteriormente se multiplicarán entre la precipitación media entre isoyetas. La fórmula para realizar este método es la siguiente:

$$P_{med} = \frac{1}{A_t} * \sum_{i=1}^n \frac{P_{i-1} + P_i}{2} * A_i$$

Donde:

A_t : Área total de la cuenca.

P_i : Altura de precipitación de la isoyeta i .

A_i : Área parcial comprendida entre las isoyetas P_{i-1} y P_i .

n : Número de áreas parciales.

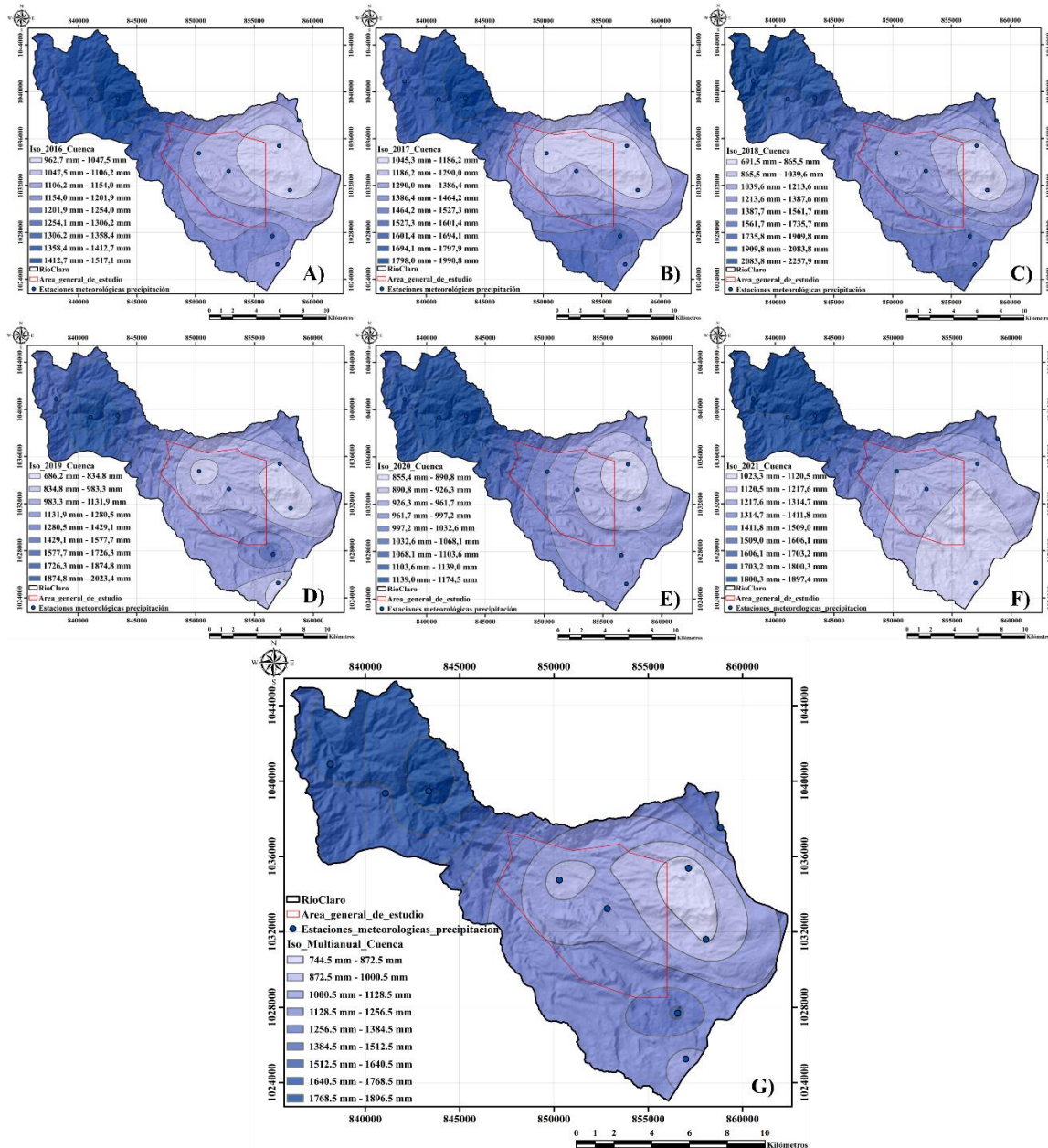


Fig. 65. Mapa de isoyetas (A). Año 2016. (B). Año 2017. (C). Año 2018. (D). Año 2019. (E). Año 2020. (F). Año 2021. (G). Multianual

10.2.5.3.1 Precipitación media anual para la subcuenca de Río Claro

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2016					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km ²)	pp_prom*Área
1	962.7	1047.5	1005.1	32.9	33056.9
2	1047.5	1106.2	1076.9	49.5	53259.4
3	1106.2	1154.0	1130.1	45.0	50825.0
4	1154.0	1201.9	1178.0	31.4	36973.0
5	1201.9	1254.0	1228.0	7.9	9708.0
6	1254.1	1306.2	1280.1	6.2	7898.0
7	1306.2	1358.4	1332.3	24.0	31912.4
8	1358.4	1412.7	1385.6	29.3	40603.4
9	1412.7	1517.1	1464.9	18.5	27155.3
Total				244.6	291391.3
Precipitación promedio (mm)					1191.4

Tabla 39. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2016 de la Subcuenca de Río Claro.

Es de resaltar que la estación Río Claro-La Batea no registra datos durante el año 2016, por lo que la estación fue descartada de este cálculo de precipitación media anual por medio de las isoyetas.

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2017					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km ²)	pp_prom*Área
1	1045.26	1186.15	1115.71	37.3	41589.56
2	1186.16	1289.97	1238.06	39.1	48390.7
3	1289.98	1386.38	1338.18	36.3	48549.78
4	1386.38	1464.24	1425.31	24.4	34789.45
5	1464.24	1527.27	1495.76	23	34852.22
6	1527.28	1601.43	1564.35	23	36131.91
7	1601.44	1694.13	1647.78	26	42477.79
8	1694.13	1797.94	1746.04	20	34797.01
9	1797.95	1990.76	1894.35	15	29207.18
Total				244.6	350785.6
Precipitación promedio (mm)					1434.27

Tabla 40. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2017 de la Subcuenca de Río Claro.

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2018					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	691.48	865.52	778.50	16.0	12429.39
2	865.53	1039.56	952.55	25.1	23935.05
3	1039.57	1213.60	1126.59	50.2	56574.73
4	1213.61	1387.65	1300.63	42.9	55761.34
5	1387.66	1561.69	1474.68	35	51261.4
6	1561.71	1735.74	1648.72	13	20630.47
7	1735.78	1909.77	1822.77	19	34793.68
8	1909.78	2083.82	1996.80	24	47251.65
9	2083.83	2257.87	2170.85	20	44209.27
Tota				244.6	346847
Precipitación promedio (mm)					1418.164

Tabla 41. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2018 de la Subcuenca de Río Claro.

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2019					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	686.2	834.8	760.5	20.6	15638.4
2	834.8	983.3	909.1	63.7	57949.3
3	983.3	1131.9	1057.6	61.4	64935.6
4	1131.9	1280.5	1206.2	22.1	26608.0
5	1280.5	1429.1	1354.8	9.0	12230.9
6	1429.1	1577.7	1503.4	20.7	31098.9
7	1577.7	1726.3	1652.0	28.0	46244.1
8	1726.3	1874.8	1800.5	15.1	27232.6
9	1874.8	2023.4	1949.1	4.0	7750.6
Total				244.6	289688.2
Precipitación promedio (mm)					1184.5

Tabla 42. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2019 de la Subcuenca de Río Claro.

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2020					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	855.4	890.8	873.1	13.5	11749.8
2	890.8	926.3	908.5	39.4	35790.7
3	926.3	961.7	944.0	73.3	69206.1
4	961.7	997.2	979.5	25.3	24775.7
5	997.2	1032.6	1014.9	10.7	10858.0
6	1032.6	1068.1	1050.4	9.0	9493.0
7	1068.1	1103.6	1085.8	10.9	11828.1
8	1103.6	1139.0	1121.3	33.4	37502.1
9	1139.0	1174.5	1156.7	29.0	33593.5
Total				244.6	244796.9
Precipitación promedio (mm)					1000.9

Tabla 43. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2020 de la Subcuenca de Río Claro.

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2021					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	1023.3	1120.5	1071.9	56.4	60429.0
2	1120.5	1217.6	1169.0	58.1	67972.5
3	1217.6	1314.7	1266.1	27.9	35300.0
4	1314.7	1411.8	1363.3	17.9	24344.1
5	1411.8	1509.0	1460.4	8.9	13054.6
6	1509.0	1606.1	1557.5	6.3	9809.9
7	1606.1	1703.2	1654.6	5.8	9656.9
8	1703.2	1800.3	1751.7	29.2	51096.0
9	1800.3	1897.4	1848.8	34.1	62999.2
Total				244.6	334662.2
Precipitación promedio (mm)					1368.3

Tabla 44. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2021 de la Subcuenca de Río Claro.

Es importante resaltar que las estaciones Río Claro-P.N.N.N. y Q. Nereidas-P.N.N.N. no cuentan con datos de precipitación para el año 2021 por lo que fueron descartadas del cálculo de la precipitación media en este año.

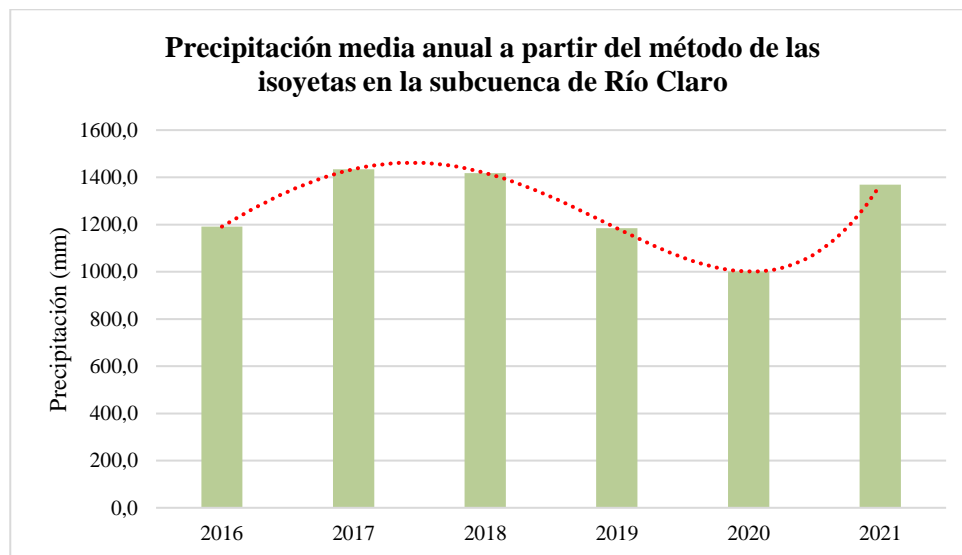


Fig. 66. Variación de la precipitación media anual por el método de las Isoyetas en la subcuenca de Río Claro durante los años 2016-2021.

La precipitación media anual a partir del método de las isoyetas en la subcuenca de Río Claro muestra, al igual que por el método de los polígonos de Thiessen, que no se presenta de forma constante en el transcurso de los años, presenta variaciones anuales con un comportamiento

parabólico, que se va alternando entre ascendente y descendente como lo sugiere la fig. 66 y, de igual manera, indica que la variación de las precipitaciones se da de manera gradual (Román, 2021). Según la clasificación de la OMM (2008), las características climáticas de la subcuenca de Río Claro son de una precipitación total abundante (1000-2000 mm/año).

10.2.5.3.2 Precipitación media multianual para la subcuenca de Río Claro

Ppt media multianual por el método de las Isoyetas					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km ²)	pp_prom*Área
1	744.5	872.5	808.5	9.5	7709.2
2	872.5	1000.5	936.5	24.8	23243.3
3	1000.5	1128.5	1064.5	51.9	55276.4
4	1128.5	1256.5	1192.5	63.4	75578.1
5	1256.5	1384.5	1320.5	19.6	25939.2
6	1384.5	1512.5	1448.5	7.2	10376.9
7	1512.5	1640.5	1576.5	27.4	43229.5
8	1640.5	1768.5	1704.5	33.0	56188.2
9	1768.5	1896.5	1832.5	7.7	14156.2
Total				244.6	311697.0
Precipitación promedio (mm)					1274.4

Tabla 45. Precipitación media multianual a partir del método de las Isoyetas de la subcuenca de Río Claro (2016-2021).

La cuenca presenta una precipitación media multianual de 1274.4 mm que, a partir de la clasificación climática de la OMM (2008), corresponde a una región climática con precipitación abundante.

10.2.5.3.3 Precipitación media anual para el área de estudio

Se realizó el mismo método buscando obtener solo la precipitación media anual correspondiente al área de estudio, pero solo se tuvo en cuenta las isoyetas que se encontraban dentro del área del proyecto geotérmico según la fig. 65.

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2016					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	990.6	1047.5	1019.1	8.3	8411.8
2	1047.5	1106.2	1076.9	23.5	25354.6
3	1106.2	1154.0	1130.1	16.0	18134.7
4	1154.1	1201.9	1178.0	4.0	4663.4
5	1201.9	1254.0	1228.0	1.9	2369.7
6	1254.1	1275.2	1264.6	0.1	150.7
Total				53.9	59084.9
Precipitación promedio (mm)					1097.1

Tabla 46. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2016 de la zona de interés.

Es de resaltar que la estación Río Claro-La Batea no registra datos durante el año 2016, por lo que la estación fue descartada de este cálculo de precipitación media anual por medio de las isoyetas.

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2017					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	1063.6	1186.2	1124.9	20.6	23161.7
2	1186.2	1290.0	1238.1	18.7	23184.9
3	1290.0	1386.4	1338.2	10.9	14584.2
4	1386.4	1464.2	1425.3	3.4	4828.4
5	1464.3	1491.1	1477.7	0.2	295.5
Total				53.9	66054.7
Precipitación promedio (mm)					1227.7

Tabla 47. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2017 de la zona de interés.

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2018					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	812.4	865.5	839.0	1.4	1160.3
2	865.6	1039.6	952.6	9.6	9124.9
3	1039.6	1213.6	1126.6	28.8	32478.9
4	1213.6	1387.6	1300.6	13.8	17973.2
5	1387.9	1456.1	1422.0	0.2	344.6
Total				53.9	61081.9
Precipitación promedio (mm)					1134.2

Tabla 48. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2018 de la zona de interés.

Ppt media por el método de las Isoyetas para 2019					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	734.8	834.8	784.8	5.3	4159.7
2	834.8	983.3	909.1	31.8	28944.0
3	983.3	1131.9	1057.6	14.4	15263.8
4	1131.9	1281.2	1206.6	2.3	2732.6
5	1281.2	1295.4	1288.3	0.02	21.3
Total				53.9	51121.4
Precipitación promedio (mm)					949.3

Tabla 49. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2019 de la zona de interés.

Ppt promedio por el método de las Isoyetas para 2020					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	872,8	890,8	881,8	3,0	2670,9
2	890,8	926,3	908,5	15,6	14213,2
3	926,3	961,7	944,0	21,8	20594,1
4	961,7	997,2	979,5	7,9	7720,6
5	997,2	1032,6	1014,9	4,9	4971,7
6	1032,6	1053,5	1043,1	0,6	608,7
Total				53,9	50779,1
Precipitación promedio (mm)					942,9

Tabla 50. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2020 de la zona de interés.

Ppt promedio por el método de las Isoyetas para 2021					
Isoyeta	Min	Max	PP_Prom	Área (km²)	pp_prom*Área
1	1058.7	1120.5	1089.6	10.3	11176.3
2	1120.5	1217.6	1169.0	26.8	31335.2
3	1217.6	1314.7	1266.1	10.9	13762.0
4	1314.7	1411.8	1363.3	4.5	6090.1
5	1411.8	1509.1	1460.5	1.4	2080.2
6	1509.1	1524.9	1517.0	0.03	46.4
Total				53,9	64490.1
Precipitación promedio (mm)					1197.5

Tabla 51. Precipitación media anual a partir del método de las Isoyetas para el año 2021 de la zona de interés.

Es importante resaltar que las estaciones Río Claro-P.N.N.N. y Q. Nereidas-P.N.N.N. no cuentan con datos de precipitación para el año 2021 por lo que fueron descartadas del cálculo de la precipitación media en este año.

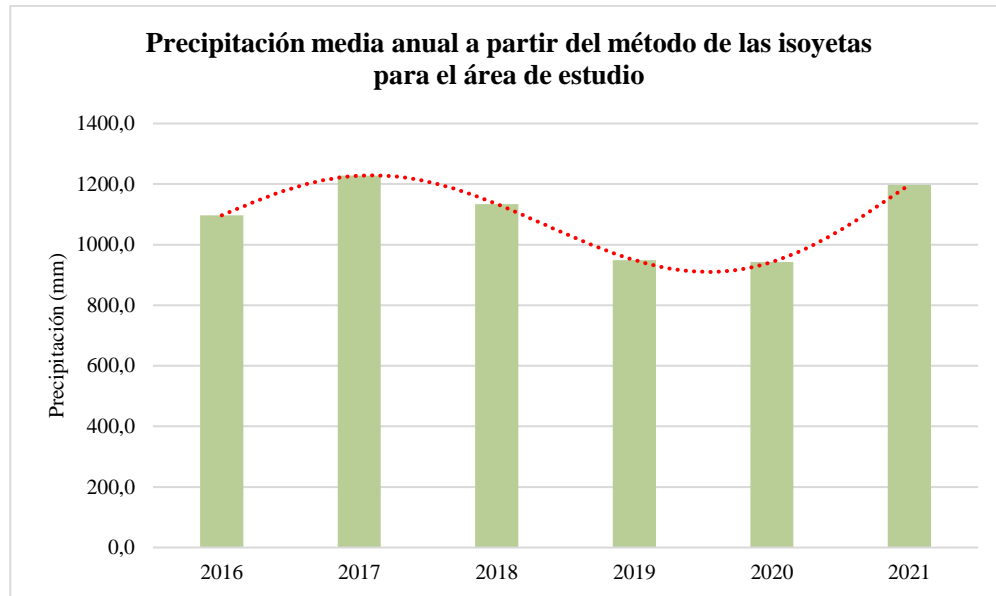


Fig. 67. Variación de la precipitación media anual por el método de las Isoyetas en la zona de interés durante los años 2016-2021.

La precipitación media anual a partir del método de las isoyetas en la zona de interés geotérmico muestra que la precipitación presenta variaciones anuales con un comportamiento parabólico, que se va alternando entre ascendente y descendente como lo sugiere la fig. 67 y, de igual manera, indica que la variación de las precipitaciones se da de manera gradual (Román, 2021). Según la clasificación de la OMM (2008), las características climáticas del área de interés están entre una precipitación total normal (500-1000 mm/año) y abundante (1000-2000 mm/año).

En general, la precipitación dentro del área de estudio, al igual que por el método de los polígonos de Thiessen, tiene un comportamiento similar al de la cuenca a la que pertenece, pero ligado al factor altitud, lo que hace que los valores de precipitación sean relativamente menores.

10.2.5.3.4 Precipitación media multianual para el área de estudio

Ppt media multianual por el método de las Isoyetas					
Isoyeta	Mín	Max	PP_Prom	Área (km2)	pp_prom*Área
1	830,1	872,5	851,3	0,9	754,3
2	872,5	1000,5	936,5	11,5	10768,6
3	1000,5	1128,5	1064,5	25,9	27518,5
4	1128,5	1256,5	1192,5	14,5	17305,4
5	1256,5	1358,2	1307,4	1,1	1446,7
Total				53,9	57793,5
Precipitación promedio (mm)					1073,2

Tabla 52. Precipitación media multianual a partir del método de las Isoyetas de la zona de interés (2016-2021).

La zona de interés presenta una precipitación media multianual de 1073.2 mm que, a partir de la clasificación climática de la OMM (2008), corresponde a una región climática con precipitación abundante.

10.2.5.4 Comparación de la precipitación media

En general, el cálculo de la precipitación media medida principalmente por los métodos de los polígonos de Thiessen y las Isoyetas producen valores relativamente similares, siendo un poco mayores los valores a partir del método de las isoyetas. Para ambos métodos se coincide que tanto, la cuenca como el área de estudio, presentan las características climáticas de precipitación anual total normales y abundantes, además coinciden cuales son los años con mayores y menores precipitaciones, es decir, presentan un mismo comportamiento con valores relativamente cercanos. Si bien ambos promedios son valores ponderados en función de un área de influencia, el método de las Isoyetas podría estar más ajustado a la realidad, ya que se genera a partir de una interpolación entre los valores de precipitación entre las diferentes estaciones del área.

Año	Isoyetas	Thiessen
2016	1191.4	1170.2
2017	1434.3	1405.1
2018	1418.2	1372.3
2019	1184.5	1164.2
2020	1000.9	993.2
2021	1368.3	1292.2
Multianual	1274.4	1250.6

Tabla 53. Valores de precipitación media en la subcuenca de Río Claro Isoyetas vs. Thiessen.

Año	Isoyetas	Thiessen
2016	1097.1	1051.2
2017	1227.7	1193.8
2018	1134.2	1095.6
2019	949.3	894.9
2020	942.9	894.1
2021	1197.5	1135.4
Multianual	1073.2	1042.8

Tabla 54. Valores de precipitación media en la zona de interés Isoyetas vs. Thiessen.

10.3 Temperatura

La temperatura es una magnitud física representa de la energía cinética interna media de las moléculas que integran el cuerpo estudiado (Aricapa, 2020). De manera general, la disposición espacial de la temperatura obedece a los mismos factores que la precipitación. En este contexto, la altitud y la exposición del terreno a la radiación solar son los más determinantes, de manera que las mayores temperaturas se dan en las zonas más llanas, de menor altimetría y expuestas al mediodía, al contrario de lo que ocurre con las temperaturas mínimas. (Guirado & Bermúdez, 2011).

Según el POMCA del Río Chinchiná (2013) las temperaturas en toda la cuenca presentan un comportamiento bimodal típico. Al analizar la distribución espacial de los datos de temperatura sobre el terreno y basados en la temperatura media, determinaron que en la cuenca del Río Chinchiná se presentan todos los pisos térmicos y, específicamente para la subcuenca de Río Claro, se presentan los pisos de: Nieves perpetuas (-3.5 a 0°C), Páramo alto (0 a 7°C), Páramo bajo (7 a 12°C), Piso térmico frío (12 a 17.5°C) y Piso térmico templado (17.5 a 24°C).

Para realizar un análisis de la temperatura a lo largo de la subcuenca se analizaron las mismas estaciones utilizadas para el análisis de la precipitación, exceptuando la estación Papayal (2304 m.s.n.m.) ya que no cuenta con información de temperatura. Por lo que el análisis se realizará a partir de nueve estaciones meteorológicas en un rango temporal de 6 años (2016-2021) en donde se pretende determinar la temperatura media, mínima y máxima de la subcuenca, y además, se pretende analizar la distribución espacial de este factor a partir de la interpolación de los datos por el método de interpolación de kriging en el software ArcGIS 10.8.

10.3.1 Temperatura media

A partir de la tabla 55, es posible distinguir una variación de temperatura media en la subcuenca de Río Claro que va desde los 18.78°C hasta los 0.76 °C la cual, según el instructivo de Zonificación Climática del IGAC (2014) determina que la subcuenca se encuentra entre los pisos térmicos templados, fríos, de páramo bajo y de páramo alto.

Temperatura media mensual multianual (°C) entre los años 2016-2021													
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (°C)
Las Brisas	3,96	4,70	5,33	6,39	6,16	5,44	5,86	5,88	5,04	5,98	5,84	5,35	5,49
Río Claro-La Batea	18.32	19.00	18.84	18.96	19.02	18.98	19.00	19.06	18.84	18.32	18.54	18.53	18.78
Río Claro-La Guayana	17.24	17.70	17.65	17.78	17.77	17.40	17.58	18.57	17.28	16.96	16.97	16.98	17.49
Q. Molinos-P.N.N.N.	5.38	5.62	6.00	5.38	5.57	5.22	4.90	4.98	4.85	5.00	5.20	5.28	5.28
Q. Nereidas-P.N.N.N.	5.34	5.40	4.32	5.50	5.62	5.12	4.82	4.98	5.06	4.90	4.83	5.05	5.08
Río Claro-P.N.N.N.	3.34	3.68	3.96	4.04	4.32	3.82	3.50	3.72	3.76	3.52	3.38	3.63	3.72
Santa Isabel-P.N.N.N.	0.68	1.05	1.27	1.33	1.22	0.55	0.03	0.04	0.26	0.73	1.10	0.80	0.76
Q. Nereidas-CHEC	13.32	13.56	13.59	13.62	13.81	13.48	13.51	13.28	13.58	12.97	12.90	12.81	13.43
Pirineos-CHEC	9.11	9.42	9.51	9.87	10.05	9.72	9.52	9.45	9.31	9.29	9.25	9.04	9.48

Tabla 55. Temperatura media mensual multianual (2016-2021).

Piso térmico	Rango de altura en metros	Temperatura en °C	Variación altitudinal por condiciones locales
Cálido	0 - 1000	T > 24.0	Límite superior +/- 400 mt.
Templado	1001 - 2000	17.6 – 24.0	Límite superior +/- 500 mt. Límite inferior +/- 500 mt.
Frío	2001 - 3000	12.1 – 17.5	Límite superior +/- 400 mt. Límite inferior +/- 400 mt.
Páramo bajo	3200 - 3700	7.1 – 12.0	
Páramo alto	3701 - 4200	< 7.0	

Tabla 56. Clasificación Caldas-Lang según el Instructivo de Zonificación Climática del IGAC (2014).

Esta variación climática se encuentra muy ligada al factor altitud. Como se puede evidenciar en la tabla 55 y en la fig. 68, la estación Santa Isabel-P.N.N.N. presenta las temperaturas medias más bajas en la subcuenca (0.76°C), pero a su vez, es la estación con la mayor altitud (4812 m.s.n.m.). Por el contrario, las estaciones con las temperaturas medias más altas son Río Claro-La Batea (18.78°C) y Río Claro-La Guayana (17.49°C), las cuales se encuentran a una altura de 1589 m.s.n.m. y 1864 m.s.n.m., respectivamente, indicando la variación de la temperatura en función de la altura.

Es importante resaltar que, aunque la altitud ejerce un papel principal en la regulación de la temperatura, no es su único factor modificante. Esto se evidencia en la estación Q. Nereidas-P.N.N.N., situada a 4415 m.s.n.m., siendo la segunda estación con mayor altitud después de Santa Isabel-P.N.N.N., por consiguiente, se esperaría que presentara la segunda temperatura media más

baja de la subcuenca, sin embargo, esto no ocurre. Si bien esta estación si se presenta temperaturas medias bajas (5.08°C), también se presentan estaciones con menor altitud y temperaturas más bajas que esta. Esto indica que cada estación presenta sus propias particularidades climáticas y que la variación de la temperatura no se encuentra exclusivamente determinada por la altitud, sino que otros factores como la insolación, también desempeñan un rol importante en este parámetro.

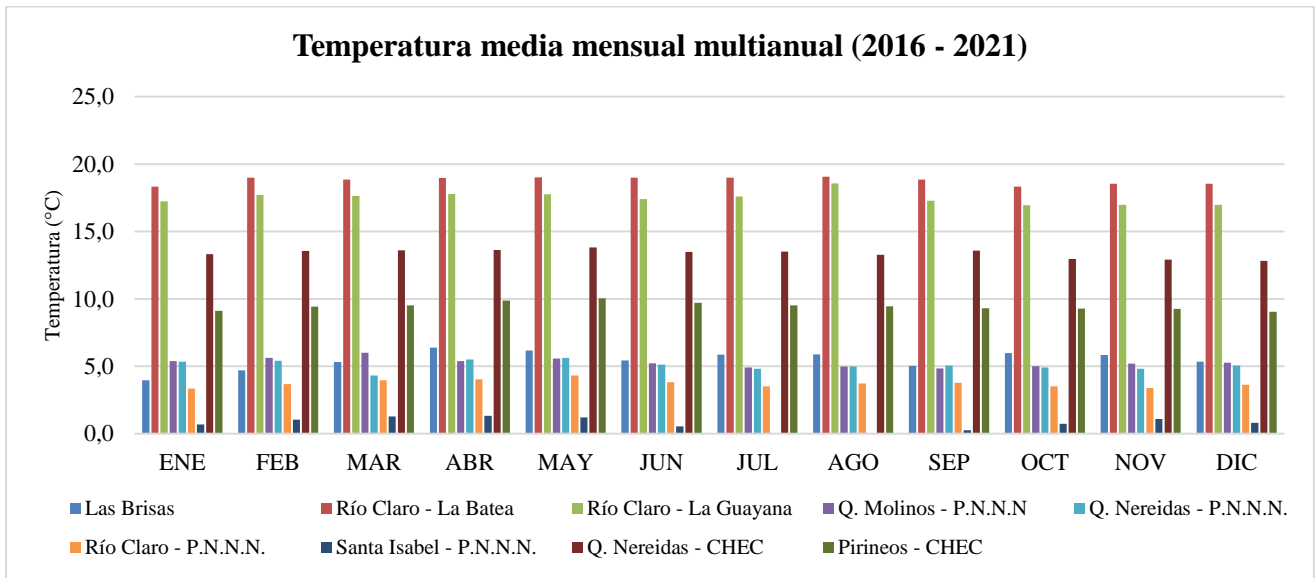


Fig. 68. Histograma de temperatura media mensual multianual de las estaciones trabajadas

En cuanto a la distribución espacial (fig. 69), la temperatura sigue un comportamiento similar al de la precipitación, de SE a NW, en donde las temperaturas más bajas se concentran en el sector SE de la subcuenca, y va incrementando en dirección NW. Este comportamiento está determinado en primer lugar por la altitud.

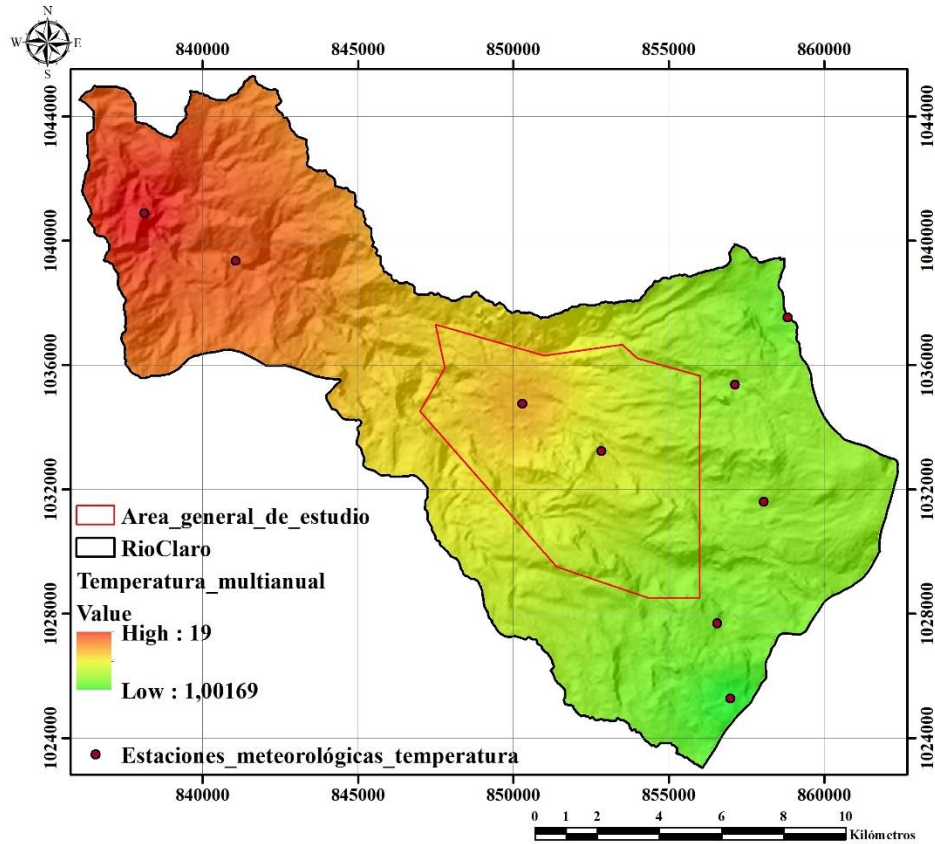


Fig. 69. Distribución espacial de la temperatura en la subcuenca de Río Claro.

10.3.2. Temperatura mínima

La estación con las temperaturas mínimas anuales más bajas corresponde a Santa Isabel-P.N.N.N. con elevación de 4812 m.s.n.m., alcanzando temperaturas de -3.82°C durante el mes de agosto, siendo este el mes más frío del año dentro de la subcuenca. Otras estaciones que alcanzan valores de temperatura bajo cero son Río Claro-P.N.N.N. y Las Brisas, ambas situadas en altitudes por encima de los 4000 m.s.n.m. registrando temperaturas mínimas promedio de -1.20°C y -1.52°C respectivamente. Por el contrario, las estaciones Río Claro-La Batea y Río Claro-La Guayana presentan las temperaturas mínimas promedio más altas de las estaciones evaluadas de 13.55°C y 11.11°C respectivamente.

Temperatura mínima mensual multianual (°C) entre los años (2016-2021)													
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (°C)
Las Brisas	-3,30	-3,23	-2,23	-0,55	-0,64	-2,13	-1,28	-1,46	-2,00	-0,05	0,24	-1,62	-1,52
Río Claro-La Batea	12,56	13,53	13,36	13,84	14,00	13,92	13,85	13,46	13,54	13,56	13,70	13,28	13,55
Río Claro-La Guayana	10,14	10,73	10,82	11,68	11,72	11,75	11,83	13,08	10,96	11,16	10,70	11,13	11,31
Q. Molinos-P.N.N.N.	1,48	1,43	2,02	1,78	2,57	2,33	2,00	1,53	1,13	1,20	1,07	1,85	1,70
Q. Nereidas-P.N.N.N.	0,12	0,00	1,04	1,42	2,44	1,40	1,42	1,22	0,60	0,40	0,10	0,78	0,91
Río Claro-P.N.N.N.	-2,30	-1,94	-1,34	-1,02	-0,12	-0,56	-0,30	-0,60	-1,24	-1,44	-1,56	-2,03	-1,20
Santa Isabel-P.N.N.N.	-3,35	-3,18	-2,28	-2,17	-1,83	-2,37	-2,38	-3,64	-3,82	-2,15	-1,47	-2,65	-2,61
Q. Nereidas-CHEC	7,72	7,67	8,67	9,47	9,69	9,20	8,90	8,68	9,22	8,30	7,77	7,91	8,71
Pirineos-CHEC	3,80	4,31	4,57	5,99	6,30	6,07	5,86	5,40	5,39	5,29	4,82	4,81	5,30

Tabla 57. Temperatura mínima mensual multianual (2016-2021).

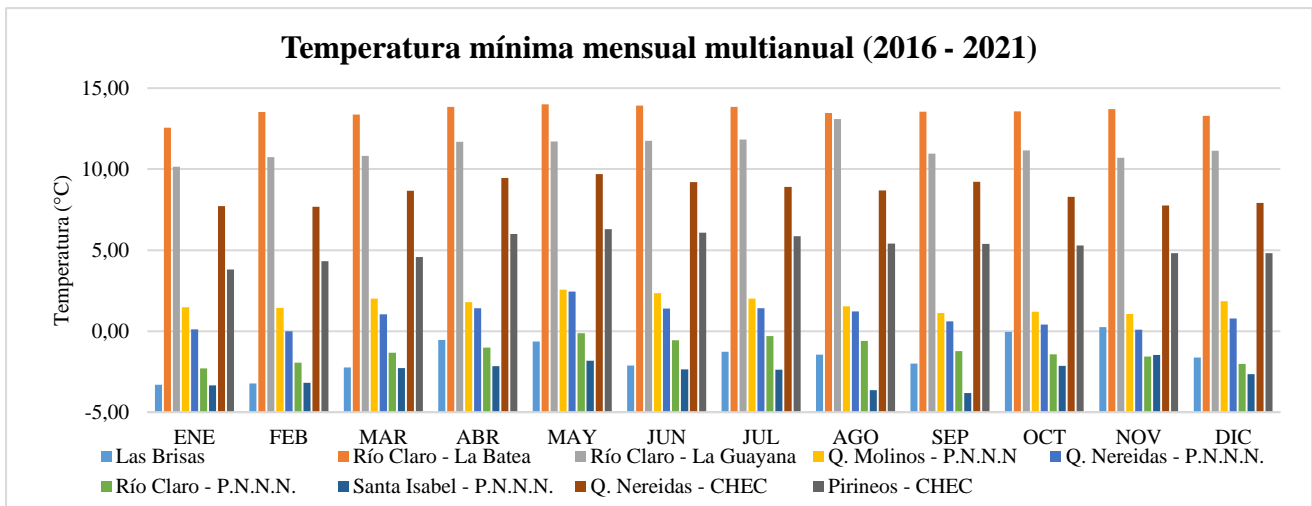


Fig. 70. Histograma de temperatura mínima mensual multianual de las estaciones trabajadas.

10.3.3 Temperatura máxima

Las temperaturas máximas en la subcuenca de Río Claro, las registran las estaciones Río Claro-La Batea y Río Claro-La Guayana, alcanzando en promedio los 26.97°C y 26.55°C respectivamente, siendo febrero el mes que registra la temperatura más alta para la estación Río Claro-La Batea y, en general, para toda la subcuenca, llegando a los 28.33°C. Por otro lado, la estación Santa Isabel registra las temperaturas máximas más bajas de todas las estaciones evaluadas, siendo la única estación que no logra llegar a los 10°C en ningún momento del año, en

promedio registra temperaturas máximas de 5.07°C y el mes que registra con la temperatura más alta es marzo, llegando a los 6.05°C.

Temperatura máxima mensual multianual (°C) entre los años 2016-2021													
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual (°C)
Las Brisas	11,22	12,63	12,88	13,33	12,96	13,00	13,00	13,22	12,08	12,00	11,44	12,32	12,51
Río Claro-La Batea	27,42	28,33	27,50	26,96	27,10	26,72	27,10	27,24	27,74	25,82	25,50	26,22	26,97
Río Claro-La Guayana	27,46	27,30	26,62	26,10	26,37	26,03	26,05	26,38	26,64	26,34	26,72	26,65	26,55
Q. Molinos-P.N.N.N.	11,00	12,13	11,25	9,70	10,20	10,12	9,22	10,18	9,45	9,57	11,43	11,68	10,49
Q. Nereidas-P.N.N.N.	12,46	13,54	10,20	11,62	11,50	10,70	9,72	11,16	11,60	10,68	10,70	11,85	11,31
Río Claro-P.N.N.N.	12,32	12,00	12,24	11,8	11,76	11,86	10,42	11,2	11,82	10,74	11,08	11,5	11,56
Santa Isabel-P.N.N.N.	5,77	5,97	6,05	5,78	5,27	5,18	3,17	3,72	4,70	5,20	4,97	5,12	5,07
Q. Nereidas-CHEC	17,39	18,37	18,15	18,00	18,84	18,05	19,09	18,70	18,83	17,99	17,03	16,86	18,19
Pirineos-CHEC	15,53	16,08	15,65	15,20	16,40	15,82	15,73	16,14	14,99	14,93	15,17	14,41	15,48

Tabla 58. Temperatura máxima mensual multianual (2016-2021).

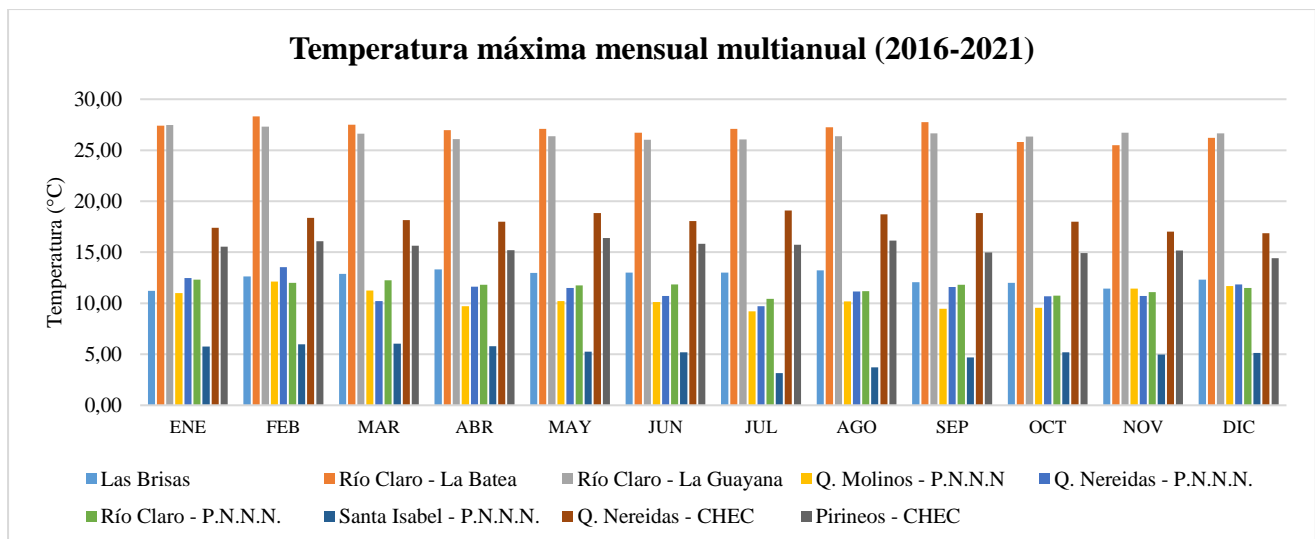


Fig. 71. Histograma de temperatura máxima mensual multianual de las estaciones trabajadas.

10.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración puede definirse como “la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo” (Allen et al., 2006). Según Thornthwaite (1948), la evapotranspiración “Representa el transporte del agua desde la Tierra de vuelta a la atmósfera, el reverso de la precipitación”.

La evaporación o vaporización, según Allen et al. (2006), es un proceso por el que el agua líquida es convertida en vapor, para lo cual se requiere energía que es proporcionada principalmente por la radiación solar directa, y en menor proporción por la temperatura del aire, posteriormente se el vapor es removido de la superficie en la que se encuentra (ríos, lagos, suelo, vegetación mojada, etc.) debido a la diferencia de presiones entre el vapor de agua atmosférico y el vapor de agua de la superficie evaporante.

Por otro lado, según Allen et al. (2006), la transpiración se trata de la vaporización del agua contenida en los tejidos de las plantas por absorción a través de las raíces para la obtención de nutrientes, una vez obtenidos los nutrientes, el agua se evapora en el interior de la planta debido al aporte energético de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento; el agua vaporizada dentro de la planta se remueve a través de los estomas, que son unos pequeños orificios en la hoja de las plantas.

Ambos procesos ocurren simultáneamente y forman lo que se conoce como la evapotranspiración. “La importancia de cuantificar de manera precisa la ET radica en que este proceso es parte fundamental tanto del ciclo hidrológico como del balance hídrico” (Marín, 2010).

Thornthwaite (1948) definió el concepto de evapotranspiración potencial (ETP) como una transferencia teórica de vapor de agua que se daría bajo condiciones ideales de humedad en el suelo y una superficie completamente cubierta de vegetación, pero no representa una transferencia real de vapor de agua a la atmósfera.

El concepto de evapotranspiración real (ETR) por su parte, hace referencia a la transferencia real de vapor de agua a la atmósfera, bajo las condiciones reales de humedad y vegetación de la localidad evaluada.

Según Sánchez (2019), el cálculo de la ETP, normalmente se realiza mes a mes para una serie de datos de años, una vez calculada la ETP mensual y, con los datos de precipitaciones mensuales se realiza un balance hídrico para evaluar la humedad en el suelo, con lo que se obtiene la ETR, la diferencia entre ETP y ETR se denomina déficit, si la ETP es mayor que la ETR es indicativo de que el suelo no tiene la humedad suficiente para producir la evapotranspiración que el sistema demande, mientras que una diferencia nula indica que el suelo tiene las condiciones ideales para el crecimiento y desarrollo de vegetación, cuando se dan estas condiciones de diferencia nula entre ETP Y ETR se pueden obtener excesos o excedentes, que hacen referencia a una sobresaturación de agua en el suelo, en donde el suelo ya no tiene la capacidad de retener más agua, permitiendo que esta se escape por escorrentía o por infiltración.

Para este estudio, el cálculo de la ETP se realiza a partir de la metodología propuesta por Thornthwaite de la siguiente manera:

(1) Se calcula la ETP sin corregir a partir de la siguiente fórmula:

$$ETP_{sincorr} = 16 * \left(\frac{10t}{I}\right)^a$$

Donde:

t: Temperatura media mensual en °C.

I: Índice térmico anual.

a: Exponente que varía según la estación.

El índice térmico anual corresponde a la sumatoria de los índices térmicos mensuales, y la fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j = i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

Donde:

i: Índice térmico mensual

t: Temperatura media mensual en °C

A partir del índice térmico anual, se calcula el exponente “a” de la siguiente manera:

$$a = 0,000000675 * I^3 - 0,0000771 * I^2 + 0,01792 * I + 0,49239$$

(2) Una vez calculado el ETP, se le aplica una corrección que tiene en cuenta el número máximo de insolación diaria dependiendo de la latitud y del número de días del mes evaluado.

$$ETP_{corr} = (ETP_{sincorr}) * \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{d}{30}\right)$$

Donde:

N: Insolación máxima diaria.

d: Número de días del mes evaluado.

Este método fue aplicado para hallar la ETP para nueve de las estaciones seleccionadas dentro de la subcuenca de Río Claro, por un periodo de seis años (2016-2021), exceptuando el registro de la estación Río Claro-La Batea para el 2016, debido a la falta de datos durante este año, y la estación Papayal, ya que esta no cuenta con registro de temperatura.

10.4.1 Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea

Evapotranspiración Potencial 2017												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	18,10	19,00	18,30	19,20	19,10	19,00	19,00	19,20	19,10	18,10	18,70	18,60
i	7,01	7,55	7,13	7,67	7,61	7,55	7,55	7,67	7,61	7,01	7,37	7,31
ETP Sin Corr.	64,0	70,3	65,4	71,8	71,0	70,3	70,3	71,8	71,0	64,0	68,2	67,5
ETP Corr.	65,0	65,1	67,5	73,0	75,3	72,7	74,5	76,0	71,6	66,1	67,6	68,5
I	a											
	89,02	1,95										

Tabla 59. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2017).

Evapotranspiración Potencial 2018												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	18,30	18,80	19,20	18,40	18,40	19,20	19,00	18,70	18,80	18,40	18,50	18,60
i	7,13	7,43	7,67	7,19	7,19	7,67	7,55	7,37	7,43	7,19	7,25	7,31
ETP Sin Corr.	65,7	69,2	72,1	66,4	66,4	72,1	70,6	68,5	69,2	66,4	67,1	67,8
ETP Corr.	66,7	64,0	74,5	67,5	70,3	74,5	74,8	72,5	69,8	68,6	66,5	68,9
I	a											
	88,36	1,94										

Tabla 60. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2018).

Evapotranspiración Potencial 2019												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	18,90	19,50	19,30	19,10	19,20	19,40	19,20	19,70	19,30	18,40	19,30	18,80
i	7,49	7,85	7,73	7,61	7,67	7,79	7,67	7,97	7,73	7,19	7,73	7,43
ETP Sin Corr.	68,3	72,7	71,2	69,7	70,5	72,0	70,5	74,2	71,2	64,7	71,2	67,6
ETP Corr.	69,4	67,3	73,6	70,9	74,7	74,4	74,7	78,6	71,8	66,9	70,6	68,6
I	a											
	91,84	2,01										

Tabla 61. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2019).

Evapotranspiración Potencial 2020												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	18,90	19,90	19,60	19,30	19,60	18,90	18,80	19,20	18,60	18,40	18,10	17,90
i	7,49	8,10	7,91	7,73	7,91	7,49	7,43	7,67	7,31	7,19	7,01	6,90
ETP Sin Corr.	69,1	76,5	74,2	72,0	74,2	69,1	68,4	71,3	66,9	65,5	63,4	62,1
ETP Corr.	70,2	73,3	76,7	73,2	78,6	71,4	72,4	75,5	67,5	67,7	62,9	63,1
I	a											
	90,12	1,98										

Tabla 62. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2020).

Evapotranspiración Potencial 2021												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	17,40	17,80	17,80	18,80	18,80	18,40	19,00	18,50	18,40	18,30	18,10	18,70
i	6,61	6,84	6,84	7,43	7,43	7,19	7,55	7,25	7,19	7,13	7,01	7,37
ETP Sin Corr.	60,8	63,5	63,5	70,4	70,4	67,6	71,8	68,3	67,6	66,9	65,5	69,7
ETP Corr.	61,8	58,8	65,6	71,6	74,5	69,8	76,1	72,3	68,1	69,1	65,0	70,8
I	a											
	85,82	1,89										

Tabla 63. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Batea (2021).

10.4.2 Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana

Evapotranspiración Potencial 2016												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	17,24	18,40	18,50	17,70	17,70	17,00	17,10	17,60	17,00	16,70	16,60	16,40
i	6,51	7,19	7,25	6,78	6,78	6,38	6,43	6,72	6,38	6,21	6,15	6,04
ETP Sin Corr.	63,3	70,9	71,6	66,3	66,3	61,7	62,4	65,6	61,7	59,8	59,2	57,9
ETP Corr.	64,3	68,0	74,0	67,4	70,2	63,8	66,0	69,5	62,2	61,8	58,7	58,9
I	a											
	78,82	1,76										

Tabla 64. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2016).

Evapotranspiración Potencial 2017												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	16,20	16,20	16,60	17,50	17,70	17,50	17,60	17,60	17,40	16,90	16,90	16,80
i	5,93	5,93	6,15	6,66	6,78	6,66	6,72	6,72	6,61	6,32	6,32	6,26
ETP Sin Corr.	57,6	57,6	60,1	65,8	67,1	65,8	66,5	66,5	65,2	62,0	62,0	61,3
ETP Corr.	58,5	53,3	62,1	66,9	71,1	68,0	70,4	70,4	65,7	64,0	61,5	62,3
I	a											
	77,07	1,72										

Tabla 65. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2017).

Evapotranspiración Potencial 2018												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	16,80	17,30	17,70	17,30	17,70	17,70	17,60	17,40	17,10	17,30	17,90	17,30
i	6,26	6,55	6,78	6,55	6,78	6,78	6,72	6,61	6,43	6,55	6,90	6,55
ETP Sin Corr.	60,1	63,3	65,9	63,3	65,9	65,9	65,3	64,0	62,0	63,3	67,3	63,3
ETP Corr.	61,1	58,6	68,1	64,4	69,8	68,1	69,1	67,8	62,6	65,4	66,7	64,3
I	a											
	79,46	1,77										

Tabla 66. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2018).

Evapotranspiración Potencial 2019												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	17,40	17,80	17,70	17,90	18,10	18,00	18,00	18,10	17,90	17,10	17,20	17,60
i	6,61	6,84	6,78	6,90	7,01	6,95	6,95	7,01	6,90	6,43	6,49	6,72
ETP Sin Corr.	62,9	65,5	64,9	66,2	67,6	66,9	66,9	67,6	66,2	61,0	61,6	64,2
ETP Corr.	63,9	60,7	67,0	67,3	71,6	69,1	70,8	71,6	66,8	63,0	61,1	65,3
I	a											
	81,60	1,81										

Tabla 67. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2019).

Evapotranspiración Potencial 2020												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	17,90	17,90	17,80	17,60	17,80	17,20	17,50	17,60	17,00	16,80	16,30	16,60
i	6,90	6,90	6,84	6,72	6,84	6,49	6,66	6,72	6,38	6,26	5,98	6,15
ETP Sin Corr.	67,6	67,6	66,9	65,6	66,9	63,0	64,9	65,6	61,7	60,4	57,3	59,2
ETP Corr.	68,7	64,8	69,1	66,7	70,9	65,1	68,8	69,5	62,2	62,5	56,8	60,1
I	a											
	78,84	1,76										

Tabla 68. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2020).

Evapotranspiración Potencial 2021												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	17,90	18,60	17,60	18,70	17,60	17,00	17,70	18,57	17,28	16,96	16,90	17,20
i	6,90	7,31	6,72	7,37	6,72	6,38	6,78	7,29	6,54	6,35	6,32	6,49
ETP Sin Corr.	66,4	71,2	64,4	71,9	64,4	60,5	65,1	70,9	62,3	60,3	59,9	61,8
ETP Corr.	67,5	65,9	66,6	73,1	68,2	62,6	68,9	75,1	62,9	62,3	59,4	62,8
I	a											
	81,16	1,80										

Tabla 69. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-La Guayana (2021).

10.4.3 Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC

Evapotranspiración Potencial 2016												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	13,32	13,56	13,59	12,81	12,96	12,67	12,35	12,40	12,08	12,01	12,31	12,68
i	4,41	4,53	4,55	4,16	4,23	4,09	3,93	3,96	3,80	3,77	3,91	4,09
ETP Sin Corr.	56,4	57,7	57,9	53,7	54,5	53,0	51,3	51,5	49,8	49,5	51,1	53,0
ETP Corr.	57,3	55,3	59,8	54,6	57,7	54,7	54,3	54,6	50,3	51,1	50,6	53,9
I	a											
	49,41	1,27										

Tabla 70. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2016).

Evapotranspiración Potencial 2017												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	12,69	11,85	12,15	12,37	12,64	12,47	12,61	12,33	12,08	12,60	12,38	12,48
i	4,10	3,69	3,84	3,94	4,07	3,99	4,06	3,92	3,80	4,05	3,95	3,99
ETP Sin Corr.	54,3	49,9	51,4	52,6	54,0	53,1	53,9	52,4	51,1	53,8	52,6	53,2
ETP Corr.	55,2	46,1	53,1	53,5	57,2	54,9	57,0	55,5	51,5	55,6	52,2	54,0
I	a											
	47,40	1,24										

Tabla 71. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2017).

Evapotranspiración Potencial 2018												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	12,06	12,37	12,39	12,25	12,41	12,04	12,47	12,33	12,31	12,55	13,61	13,30
i	3,79	3,94	3,95	3,88	3,96	3,78	3,99	3,92	3,91	4,03	4,55	4,40
ETP Sin Corr.	50,5	52,2	52,3	51,5	52,4	50,4	52,7	51,9	51,8	53,1	58,8	57,1
ETP Corr.	51,3	48,3	54,0	52,4	55,5	52,1	55,8	55,0	52,3	54,9	58,3	58,0
I	a											
	48,11	1,25										

Tabla 72. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2018).

Evapotranspiración Potencial 2019												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	13,64	14,66	14,83	14,64	14,53	14,63	14,89	14,53	13,56	12,64	12,90	12,88
i	4,57	5,10	5,19	5,09	5,03	5,08	5,22	5,03	4,53	4,07	4,20	4,19
ETP Sin Corr.	53,6	59,2	60,2	59,1	58,5	59,1	60,5	58,5	53,1	48,2	49,6	49,5
ETP Corr.	54,4	54,8	62,2	60,1	62,0	61,0	64,1	62,0	53,6	49,8	49,2	50,3
I	a											
	57,28	1,39										

Tabla 73. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2019).

Evapotranspiración Potencial 2020												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	14,20	14,23	14,22	14,68	15,07	14,18	13,99	13,77	13,53	13,39	13,31	13,07
i	4,86	4,87	4,87	5,11	5,31	4,85	4,75	4,64	4,51	4,44	4,40	4,28
ETP Sin Corr.	56,9	57,0	57,0	59,6	61,8	56,8	55,7	54,5	53,2	52,4	52,0	50,7
ETP Corr.	57,8	54,7	58,9	60,6	65,4	58,7	59,0	57,7	53,6	54,2	51,6	51,5
I	a											
	56,89	1,39										

Tabla 74. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2020).

Evapotranspiración Potencial 2021												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	14,00	14,66	14,37	14,98	15,22	14,89	14,74	14,31	13,71	14,30	12,90	12,51
i	4,75	5,10	4,94	5,27	5,39	5,22	5,14	4,91	4,61	4,91	4,20	4,01
ETP Sin Corr.	54,9	58,6	56,9	60,4	61,8	59,9	59,0	56,6	53,3	56,6	48,9	46,8
ETP Corr.	55,8	54,2	58,8	61,4	65,4	61,9	62,5	60,0	53,7	58,4	48,5	47,6
I	a											
	58,45	1,41										

Tabla 75. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-CHEC (2021).

10.4.4 Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC

Evapotranspiración Potencial 2016												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	9,11	9,42	9,51	10,44	10,48	9,82	9,58	9,45	9,31	9,36	9,45	9,06
i	2,48	2,61	2,65	3,05	3,07	2,78	2,68	2,62	2,56	2,58	2,62	2,46
ETP Sin Corr.	45,9	47,5	47,9	52,6	52,8	49,5	48,3	47,6	46,9	47,1	47,6	45,6
ETP Corr.	46,6	45,5	49,5	53,5	56,0	51,1	51,1	50,4	47,3	48,7	47,2	46,3
I	a											
	32,16	1,01										

Tabla 76. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2016).

Evapotranspiración Potencial 2017												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	8,90	8,76	9,31	9,87	9,90	9,72	9,70	9,42	9,44	9,45	9,33	9,12
i	2,39	2,34	2,56	2,80	2,81	2,74	2,73	2,61	2,62	2,62	2,57	2,48
ETP Sin Corr.	44,8	44,1	46,9	49,7	49,9	49,0	48,9	47,4	47,5	47,6	47,0	45,9
ETP Corr.	45,5	40,8	48,4	50,6	52,8	50,6	51,8	50,3	47,9	49,2	46,6	46,7
I	a											
	31,27	1,00										

Tabla 77. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2017).

Evapotranspiración Potencial 2018												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	8,74	9,19	9,58	9,15	9,55	9,60	9,45	9,36	9,28	9,35	9,46	8,92
i	2,33	2,51	2,68	2,50	2,66	2,68	2,62	2,58	2,55	2,58	2,63	2,40
ETP Sin Corr.	44,0	46,3	48,3	46,1	48,1	48,4	47,6	47,1	46,7	47,1	47,7	44,9
ETP Corr.	44,7	42,8	49,9	46,8	51,0	50,0	50,4	49,9	47,1	48,7	47,3	45,6
I	a											
	30,73	0,99										

Tabla 78. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2018).

Evapotranspiración Potencial 2019												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	9,51	9,89	10,02	10,06	10,05	10,17	9,58	9,70	9,53	8,94	9,24	9,54
i	2,65	2,81	2,86	2,88	2,88	2,93	2,68	2,73	2,66	2,41	2,53	2,66
ETP Sin Corr.	47,9	49,8	50,5	50,7	50,7	51,3	48,3	48,9	48,0	45,0	46,5	48,1
ETP Corr.	48,7	46,1	52,2	51,6	53,7	53,0	51,1	51,8	48,4	46,5	46,1	48,8
I	a											
	32,67	1,02										

Tabla 79. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2019).

Evapotranspiración Potencial 2020												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	9,50	9,97	9,82	9,96	10,42	9,74	9,27	9,54	9,20	9,16	8,95	8,72
i	2,64	2,84	2,78	2,84	3,04	2,74	2,55	2,66	2,52	2,50	2,41	2,32
ETP Sin Corr.	47,9	50,2	49,5	50,2	52,5	49,1	46,7	48,1	46,3	46,1	45,1	43,9
ETP Corr.	48,6	48,2	51,1	51,0	55,7	50,7	49,4	50,9	46,7	47,7	44,7	44,6
I	a											
	31,85	1,01										

Tabla 80. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2020).

Evapotranspiración Potencial 2021												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	8,91	9,30	8,83	9,72	9,91	9,26	9,55	9,20	9,10	9,46	9,05	8,86
i	2,40	2,56	2,37	2,74	2,82	2,54	2,66	2,52	2,48	2,63	2,46	2,38
ETP Sin Corr.	44,8	46,8	44,4	49,0	49,9	46,6	48,1	46,3	45,8	47,7	45,6	44,6
ETP Corr.	45,6	43,3	45,9	49,8	52,9	48,2	51,0	49,1	46,2	49,2	45,2	45,3
I	a											
	30,53	0,99										

Tabla 81. Evapotranspiración potencial para la estación Pirineos-CHEC (2021).

10.4.5 Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas

Evapotranspiración Potencial 2016												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	4,3	4,7	5,4	5,95	3,9	6,4	5,3	3,6	2,47	2,05	1,5	-0,06
i	0,80	0,91	1,12	1,30	0,69	1,45	1,09	0,61	0,34	0,26	0,16	0,00
ETP Sin Corr.	44,6	47,2	51,7	55,0	41,9	57,6	51,0	39,8	31,2	27,7	22,7	0,0
ETP Corr.	45,3	45,3	53,4	55,9	44,4	59,6	54,1	42,2	31,5	28,6	22,5	0,0
I	a											
	8,74	0,64										

Tabla 82. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2016).

Evapotranspiración Potencial 2017												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	-1,7	3,2	4,5	5,3	6,9	2,09	2,58	2,64	2,47	2,05	2,1	1,78
i	0,00	0,51	0,85	1,09	1,63	0,27	0,37	0,38	0,34	0,26	0,27	0,21
ETP Sin Corr.	0,0	42,9	52,7	58,1	68,1	33,3	37,7	38,3	36,8	32,9	33,4	30,2
ETP Corr.	0,0	39,7	54,5	59,1	72,1	34,4	40,0	40,5	37,1	34,0	33,1	30,7
I	a											
	6,18	0,60										

Tabla 83. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2017).

Evapotranspiración Potencial 2018												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	3,96	4,9	4,2	4,5	3,5	5,5	4,5	5	4,5	6,5	7,1	6,4
i	0,70	0,97	0,77	0,85	0,58	1,16	0,85	1,00	0,85	1,49	1,70	1,45
ETP Sin Corr.	36,3	42,1	37,8	39,7	33,2	45,7	39,7	42,7	39,7	51,4	54,7	50,8
ETP Corr.	36,9	39,0	39,1	40,3	35,2	0,0	42,0	45,3	40,0	53,1	54,2	51,7
I	a											
	12,38	0,70										

Tabla 84. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2018).

Evapotranspiración Potencial 2019												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	4,9	5,7	5,3	7,1	7,2	6,1	6,5	6,4	5,1	6,6	5,85	6,4
i	0,97	1,22	1,09	1,70	1,74	1,35	1,49	1,45	1,03	1,52	1,27	1,45
ETP Sin Corr.	37,2	41,8	39,5	49,5	50,0	44,0	46,2	45,7	38,4	46,8	42,6	45,7
ETP Corr.	37,8	38,7	40,9	50,3	53,0	45,5	49,0	48,4	38,7	48,3	42,3	46,4
I	a											
	16,29	0,77										

Tabla 85. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2019).

Evapotranspiración Potencial 2020												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	6,2	5	6,7	9,2	6,1	6,2	5,7	6,5	5,1	6,2	6,5	8,2
i	1,38	1,00	1,56	2,52	1,35	1,38	1,22	1,49	1,03	1,38	1,49	2,11
ETP Sin Corr.	42,8	36,1	45,5	58,5	42,2	42,8	40,0	44,4	36,7	42,8	44,4	53,4
ETP Corr.	43,5	34,6	47,0	59,5	44,7	44,2	42,4	47,1	37,0	44,2	44,1	54,3
I	a											
	17,92	0,79										

Tabla 86. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2020).

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL 2021												
MESES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T (°C)	6,1	4,7	5,9	6,3	7,1	6,15	6,6	6,1	5,6	6,1	7,5	6,9
i	1,35	0,91	1,28	1,42	1,70	1,37	1,52	1,35	1,19	1,35	1,85	1,63
ETP Sin Corr.	43,3	35,4	42,2	44,4	48,7	43,6	46,1	43,3	40,5	43,3	50,9	47,7
ETP Corr.	44,0	32,7	43,6	45,2	51,6	45,1	48,8	45,9	40,9	44,8	50,4	48,4
I	a											
	16,92	0,78										

Tabla 87. Evapotranspiración potencial para la estación Las Brisas (2021).

10.4.6 Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N.

Evapotranspiración Potencial 2016												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	6,9	6,9	6,8	5,28	6,4	5,4	5,2	5,2	4,8	5,1	5,3	5,1
i	1,63	1,63	1,59	1,09	1,45	1,12	1,06	1,06	0,94	1,03	1,09	1,03
ETP Sin Corr.	50,3	50,3	49,8	41,2	47,6	41,9	40,8	40,8	38,4	40,2	41,4	40,2
ETP Corr.	51,1	48,2	51,4	41,9	50,4	43,3	43,2	43,2	38,8	41,5	41,0	40,8
I	a											
	14,73	0,74										

Tabla 88. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2016).

Evapotranspiración Potencial 2017												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	5	5,3	4,9	5,4	5,5	5,4	5,2	5	5,1	5,2	5,1	5,2
i	1,00	1,09	0,97	1,12	1,16	1,12	1,06	1,00	1,03	1,06	1,03	1,06
ETP Sin Corr.	42,3	44,0	41,7	44,6	45,2	44,6	43,5	42,3	42,9	43,5	42,9	43,5
ETP Corr.	42,9	40,8	43,0	45,4	47,9	46,1	46,0	44,8	43,2	44,9	42,5	44,2
I	a											
	12,71	0,71										

Tabla 89. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2017).

Evapotranspiración Potencial 2018												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	4,6	4,9	5,2	4,8	5,1	5,3	4,95	4,98	4,85	5	5,2	5,28
i	0,88	0,97	1,06	0,94	1,03	1,09	0,98	0,99	0,95	1,00	1,06	1,09
ETP Sin Corr.	40,8	42,6	44,4	42,0	43,8	45,0	42,9	43,1	42,3	43,2	44,4	44,9
ETP Corr.	41,4	39,4	45,9	42,7	46,4	46,5	45,4	45,6	42,7	44,6	44,0	45,6
I	a											
	12,06	0,70										

Tabla 90. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2018).

Evapotranspiración Potencial 2019												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	5,45	5,4	5,3	5,2	5,2	5,3	4,6	4,7	4,9	5	5,2	5,6
i	1,14	1,12	1,09	1,06	1,06	1,09	0,88	0,91	0,97	1,00	1,06	1,19
ETP Sin Corr.	45,1	44,8	44,2	43,6	43,6	44,2	40,0	40,6	41,8	42,4	43,6	46,0
ETP Corr.	45,8	41,5	45,7	44,4	46,2	45,7	42,4	43,0	42,2	43,9	43,3	46,7
I	a											
	12,58	0,71										

Tabla 91. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2019).

Evapotranspiración Potencial 2020												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	5,3	5,8	5,6	5,7	5,9	5,2	4,8	5	4,6	4,7	5,2	5,2
i	1,09	1,25	1,19	1,22	1,28	1,06	0,94	1,00	0,88	0,91	1,06	1,06
ETP Sin Corr.	43,7	46,6	45,4	46,0	47,2	43,1	40,7	41,9	39,5	40,1	43,1	43,1
ETP Corr.	44,4	44,7	47,0	46,8	50,0	44,5	43,1	44,4	39,8	41,4	42,7	43,8
I	a											
	12,95	0,71										

Tabla 92. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2020).

Evapotranspiración Potencial 2021												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	5,1	5,4	8,2	5,8	5,3	4,7	4,7	4,7	4,85	5	5,2	5,28
i	1,03	1,12	2,11	1,25	1,09	0,91	0,91	0,91	0,95	1,00	1,06	1,09
ETP Sin Corr.	41,8	43,6	58,9	45,9	43,0	39,4	39,4	39,4	40,3	41,2	42,4	42,9
ETP Corr.	42,5	40,4	60,9	46,7	45,6	40,8	41,8	41,8	40,7	42,6	42,1	43,6
I	a											
	13,45	0,72										

Tabla 93. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2021).

10.4.7 Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N.

Evapotranspiración Potencial 2016												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	6,9	6,60	6,60	6,00	5,40	4,90	4,70	5,10	4,90	4,90	4,80	4,60
i	1,63	1,52	1,52	1,32	1,12	0,97	0,91	1,03	0,97	0,97	0,94	0,88
ETP Sin Corr.	51,6	49,9	49,9	46,6	43,1	40,2	39,0	41,4	40,2	40,2	39,6	38,4
ETP Corr.	52,4	47,8	51,6	47,4	45,7	41,5	41,3	43,8	40,5	41,5	39,3	39,0
I	a											
	13,79	0,73										

Tabla 94. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2016).

Evapotranspiración Potencial 2017												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	4,4	4,30	4,40	5,40	5,50	5,20	4,80	5,00	5,10	5,00	4,70	4,90
i	0,82	0,80	0,82	1,12	1,16	1,06	0,94	1,00	1,03	1,00	0,91	0,97
ETP Sin Corr.	37,2	36,6	37,2	43,1	43,7	42,0	39,6	40,8	41,4	40,8	39,0	40,2
ETP Corr.	37,8	33,8	38,4	43,9	46,3	43,4	41,9	43,2	41,7	42,2	38,7	40,9
I	a											
	11,63	0,69										

Tabla 95. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2017).

Evapotranspiración Potencial 2018												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	4,6	4,20	5,20	4,60	5,00	4,80	4,80	4,70	5,20	4,70	4,90	5,20
i	0,88	0,77	1,06	0,88	1,00	0,94	0,94	0,91	1,06	0,91	0,97	1,06
ETP Sin Corr.	38,4	35,9	42,0	38,4	40,8	39,6	39,6	39,0	42,0	39,0	40,2	42,0
ETP Corr.	39,0	33,3	43,4	39,0	43,2	40,9	41,9	41,3	42,3	40,3	39,9	42,7
I	a											
	11,39	0,69										

Tabla 96. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2018).

Evapotranspiración Potencial 2019												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	5,2	5,70	4,32	5,60	6,00	5,40	4,80	5,00	5,30	4,80	4,90	5,50
i	1,06	1,22	0,80	1,19	1,32	1,12	0,94	1,00	1,09	0,94	0,97	1,16
ETP Sin Corr.	42,0	44,9	36,7	44,3	46,6	43,1	39,6	40,8	42,6	39,6	40,2	43,7
ETP Corr.	42,7	41,5	37,9	45,0	49,3	44,6	41,9	43,2	42,9	40,9	39,9	44,4
I	a											
	12,81	0,71										

Tabla 97. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2019).

Evapotranspiración Potencial 2020												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	5,6	6,20	5,40	5,90	6,20	5,30	5,00	5,10	4,80	5,10	4,83	5,05
i	1,19	1,38	1,12	1,28	1,38	1,09	1,00	1,03	0,94	1,03	0,95	1,02
ETP Sin Corr.	44,3	47,7	43,1	46,0	47,7	42,6	40,8	41,4	39,6	41,4	39,8	41,1
ETP Corr.	45,0	45,7	44,6	46,8	50,5	44,0	43,2	43,8	39,9	42,8	39,5	41,8
I	a											
	13,42	0,72										

Tabla 98. Evapotranspiración potencial para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2020).

10.4.8 Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N.

Evapotranspiración Potencial 2016												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	3,10	4,20	4,50	4,10	4,30	3,70	3,40	4,00	3,70	3,70	3,60	3,50
i	0,48	0,77	0,85	0,74	0,80	0,63	0,56	0,71	0,63	0,63	0,61	0,58
ETP Sin Corr.	37,6	45,6	47,6	44,9	46,2	42,1	39,9	44,2	42,1	42,1	41,3	40,6
ETP Corr.	38,2	43,7	49,2	45,6	49,0	43,5	42,2	46,8	42,4	43,5	41,0	41,3
I	a											
	8,01	0,63										

Tabla 99. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2016).

Evapotranspiración Potencial 2017												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	3,10	2,80	3,30	4,10	4,30	4,00	3,60	3,70	3,90	3,60	3,40	3,50
i	0,48	0,42	0,53	0,74	0,80	0,71	0,61	0,63	0,69	0,61	0,56	0,58
ETP Sin Corr.	39,0	36,7	40,6	46,4	47,8	45,7	42,8	43,6	45,0	42,8	41,3	42,1
ETP Corr.	39,7	33,9	41,9	47,2	50,7	47,3	45,4	46,1	45,4	44,3	41,0	42,8
I	a											
	7,36	0,62										

Tabla 100. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2017).

Evapotranspiración Potencial 2018												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	3,20	2,70	3,80	3,30	3,80	3,50	3,40	3,40	3,90	3,30	3,60	3,50
i	0,51	0,39	0,66	0,53	0,66	0,58	0,56	0,56	0,69	0,53	0,61	0,58
ETP Sin Corr.	41,0	37,0	45,6	41,8	45,6	43,4	42,6	42,6	46,3	41,8	44,1	43,4
ETP Corr.	41,7	34,2	47,1	42,5	48,3	44,8	45,1	45,1	46,7	43,2	43,7	44,1
I	a											
	6,86	0,61										

Tabla 101. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2018).

Evapotranspiración Potencial 2019												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	3,60	4,20	4,20	4,10	4,40	4,00	3,40	3,60	3,80	3,40	3,30	4,00
i	0,61	0,77	0,77	0,74	0,82	0,71	0,56	0,61	0,66	0,56	0,53	0,71
ETP Sin Corr.	41,2	45,4	45,4	44,8	46,8	44,1	39,8	41,2	42,7	39,8	39,0	44,1
ETP Corr.	41,9	42,1	47,0	45,5	49,6	45,5	42,1	43,7	43,0	41,1	38,7	44,8
I	a											
	8,05	0,63										

Tabla 102. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2019).

Evapotranspiración Potencial 2020												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	3,70	4,50	4,00	4,60	4,80	3,90	3,70	3,90	3,50	3,60	3,00	3,63
i	0,63	0,85	0,71	0,88	0,94	0,69	0,63	0,69	0,58	0,61	0,46	0,62
ETP Sin Corr.	41,4	46,9	43,5	47,6	48,9	42,8	41,4	42,8	40,0	40,7	36,2	40,9
ETP Corr.	42,1	45,0	45,0	48,4	51,8	44,3	43,9	45,4	40,3	42,1	35,9	41,6
I	a											
	8,30	0,64										

Tabla 103. Evapotranspiración potencial para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2020).

10.4.9 Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N.

Evapotranspiración Potencial 2016												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	1,90	1,90	2,10	1,90	1,50	0,20	-0,2	-0,1	-0,1	0,90	1,00	0,50
i	0,23	0,23	0,27	0,23	0,16	0,01	0,00	0,00	0,00	0,07	0,09	0,03
ETP Sin Corr.	63,2	63,2	66,6	63,2	56,0	19,8	0,0	0,0	0,0	43,0	45,4	31,8
ETP Corr.	64,3	60,6	68,8	64,3	59,3	20,5	0,0	0,0	0,0	44,4	45,0	32,3
I	a											
	1,32	0,52										

Tabla 104. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2016).

Evapotranspiración Potencial 2017												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	0,30	-0,2	0,90	1,00	1,10	0,70	0,00	-0,1	0,30	0,60	1,00	0,60
i	0,01	0,00	0,07	0,09	0,10	0,05	0,00	0,00	0,01	0,04	0,09	0,04
ETP Sin Corr.	38,9	0,0	67,5	71,1	74,6	59,5	0,0	0,0	38,9	55,1	71,1	55,1
ETP Corr.	39,5	0,0	69,7	72,3	79,0	61,5	0,0	0,0	39,2	56,9	70,5	56,0
I	a											
	0,51	0,50										

Tabla 105. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2017).

Evapotranspiración Potencial 2018												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	0,30	0,90	0,80	0,80	1,00	0,50	0,00	-0,4	0,40	1,30	1,50	0,80
i	0,01	0,07	0,06	0,06	0,09	0,03	0,00	0,00	0,02	0,13	0,16	0,06
ETP Sin Corr.	33,2	57,8	54,5	54,5	61,0	43,0	0,0	0,0	38,4	69,6	74,8	54,5
ETP Corr.	33,7	53,5	56,3	55,4	64,6	44,4	0,0	0,0	38,7	71,9	74,2	55,3
I	a											
	0,71	0,51										

Tabla 106. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2018).

Evapotranspiración Potencial 2019												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	0,90	1,70	2,00	1,90	1,50	0,90	0,10	0,00	0,60	0,60	1,50	1,30
i	0,07	0,20	0,25	0,23	0,16	0,07	0,00	0,00	0,04	0,04	0,16	0,13
ETP Sin Corr.	42,4	59,0	64,1	62,4	55,3	42,4	13,6	0,0	34,4	34,4	55,3	51,3
ETP Corr.	43,1	54,6	66,3	63,5	58,5	43,9	14,4	0,0	34,7	35,6	54,8	52,2
I	a											
	1,36	0,52										

Tabla 107. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2019).

Evapotranspiración Potencial 2020												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	0,90	1,30	1,50	1,40	1,40	0,70	0,20	0,04	0,10	0,60	0,90	0,40
i	0,07	0,13	0,16	0,15	0,15	0,05	0,01	0,00	0,00	0,04	0,07	0,02
ETP Sin Corr.	52,8	63,7	68,5	66,1	66,1	46,5	24,6	10,9	17,3	43,0	52,8	35,0
ETP Corr.	53,7	61,0	70,7	67,2	70,0	48,0	26,1	11,5	17,5	44,4	52,4	35,6
I	a											
	0,86	0,51										

Tabla 108. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2020).

Evapotranspiración Potencial 2021												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T (°C)	-0,2	0,70	0,30	1,00	0,80	0,30	0,10	0,80	0,26	0,40	0,70	1,20
i	0,00	0,05	0,01	0,09	0,06	0,01	0,00	0,06	0,01	0,02	0,05	0,12
ETP Sin Corr.	0,0	37,8	24,4	45,4	40,5	24,4	13,8	40,5	22,7	28,3	37,8	49,9
ETP Corr.	0,0	35,0	25,2	46,2	42,9	25,2	14,7	42,9	22,9	29,2	37,5	50,7
I	a											
0,49	0,50											

Tabla 109. Evapotranspiración potencial para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2021).

En la tabla 110 se compilan los resultados de ETP corregida para cada una de las estaciones evaluadas. Las estaciones que presentan mayores valores de ETP dentro de la cuenca son Río Claro-La Batea y Río Claro-La Guayana, siendo también las de menor altitud y con los registros de temperatura más altos. Por otro lado, la estación que presenta los menores registros mensuales de ETP es Santa Isabel-P.N.N.N., siendo la de mayor altitud y temperaturas más bajas, las demás estaciones se encuentran en un rango de ETP relativamente similar entre ellas.

Evapotranspiración Potencial Multianual corregida (2016-2021) (mm)														
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom	Anual
Las Brisas	56,9	47,8	53,9	39,1	35,6	40,2	46,5	47,1	43,2	39,8	38,7	36,1	43,8	525,1
Río Claro-La Batea	66,5	65,1	71,5	71,2	74,6	72,5	74,5	74,9	69,7	67,7	66,5	68,1	70,2	842,9
Río Claro-La Guayana	63,7	60,8	67,6	67,4	70,1	65,9	68,8	75,8	63,5	62,9	60,4	62,0	65,7	788,9
Q. Molinos-P.N.N.N.	44,7	42,0	49,2	44,8	47,8	44,5	43,6	44,1	41,2	43,2	42,6	44,1	44,3	531,8
Q. Nereidas-P.N.N.N.	45,6	41,9	39,9	46,6	49,3	45,0	44,2	45,2	43,6	43,6	41,4	43,8	44,2	530,2
Río Claro-P.N.N.N.	40,8	39,5	46,1	45,9	49,9	45,1	43,8	45,5	43,6	42,8	40,1	42,9	43,8	525,9
Santa Isabel-P.N.N.N.	48,6	55,0	67,5	68,2	67,8	44,3	11,0	12,0	29,5	51,2	60,3	52,6	47,3	568,0
Q. Nereidas-CHEC	55,0	51,3	57,5	56,8	60,2	56,9	58,5	57,2	56,1	54,0	51,5	52,3	55,6	667,3
Pirineos-CHEC	47,1	44,3	50,0	51,0	54,1	51,1	51,3	50,9	47,7	48,8	46,6	46,7	49,1	589,7

Tabla 110. Evapotranspiración potencial multianual corregida para las estaciones de trabajo.

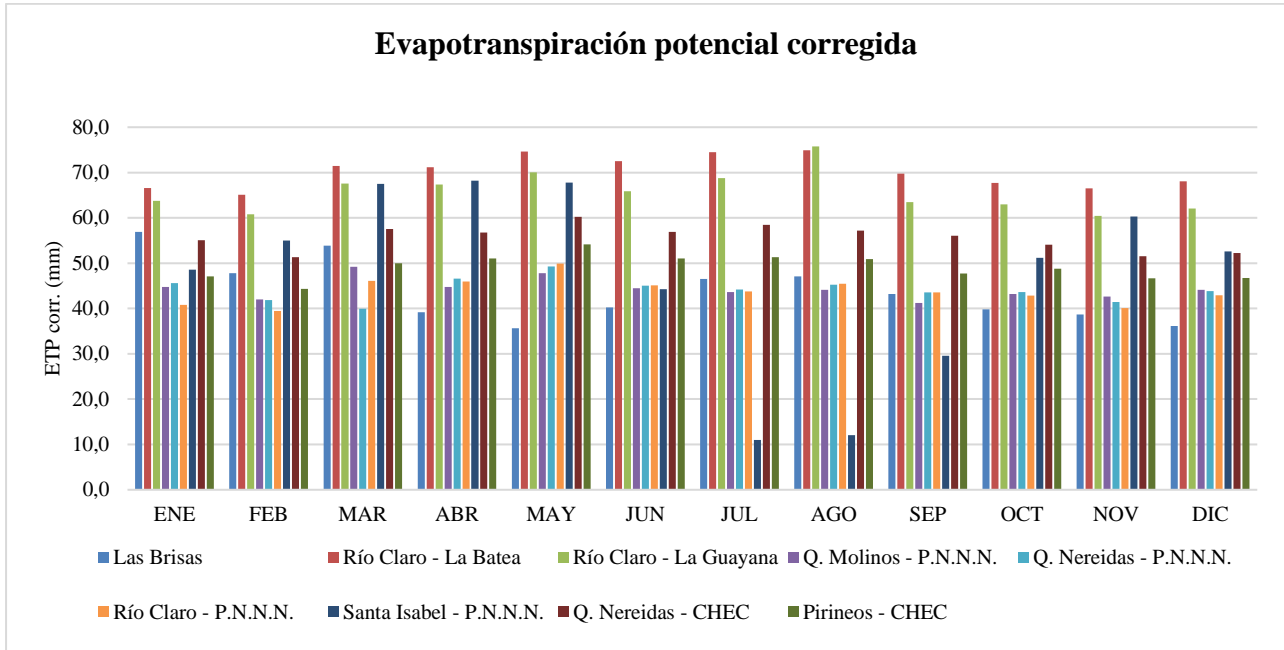


Fig. 72. Histograma de evapotranspiración corregida para cada una de las estaciones evaluadas.

Para Jaramillo (2005), a partir de las condiciones climáticas de Colombia, la evapotranspiración varía con la altitud, los valores de evapotranspiración al nivel del mar están cercano a los 4.6 mm/día, mientras que, a una altura de 3500 m.s.n.m., se tienen valores de 2.3 mm/día, además los valores de evapotranspiración para una misma altura no presentan una gran variación mes a mes.

Román (2021) considera que sus resultados para la ETP en la subcuenca de Río Claro, y en especial, para el área del proyecto geotérmico, son relativamente bajos al compararlos con los resultados de evapotranspiración en diferentes localidades de Colombia publicados por Jaramillo (2005) en la fig. 73.

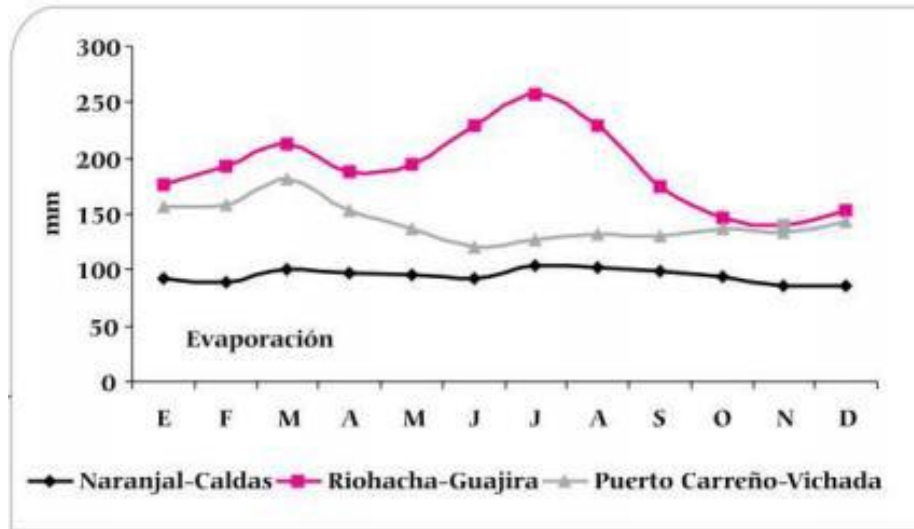


Fig. 73. Transcurso mensual de la evaporación en algunas localidades de Colombia. Tomado de: *Clima Andino y café en Colombia*. Jaramillo, R. A., 2005.

Al igual que los resultados de Román (2021), en este estudio también se obtuvieron resultados que son relativamente menores a las de otras localidades en Colombia. Como fue mencionado anteriormente, el POMCA del Río Chinchiná (2013), establece que la subcuenca de Río Claro presenta un intervalo de alturas entre 1390 y 5262 m.s.n.m. entre los cuales las temperaturas medias presentan una variación entre los 0.76°C y 18.78°C, haciendo que la evapotranspiración sea mayor en las zonas más bajas de la cuenca, en donde se presentan las temperaturas más altas, mientras que en las zonas más altas de la cuenca la evapotranspiración presenta los valores más bajos, correspondiéndose con las temperaturas más bajas, es decir, la evapotranspiración presenta un comportamiento similar al de la temperatura, y por lo tanto, su distribución espacial dentro de la cuenca también es similar.

10.5 Balance hídrico de suelos

Rose (2004) propone una analogía entre el dinero y el agua, argumentando que ambos están sujetos al principio de conservación de la materia. Por lo tanto, se puede utilizar un "presupuesto de agua" para conocer de manera cuantitativa el almacenamiento, las entradas y las salidas de agua dentro de una cuenca. En otras palabras, se puede rastrear el destino de cualquier cantidad de agua conservada a través de este presupuesto, que se conoce como "balance hídrico". En resumen, el balance hídrico establece que la cantidad total de agua que ingresa a un sistema debe ser igual a la cantidad de agua que sale de él (Claro, 1991).

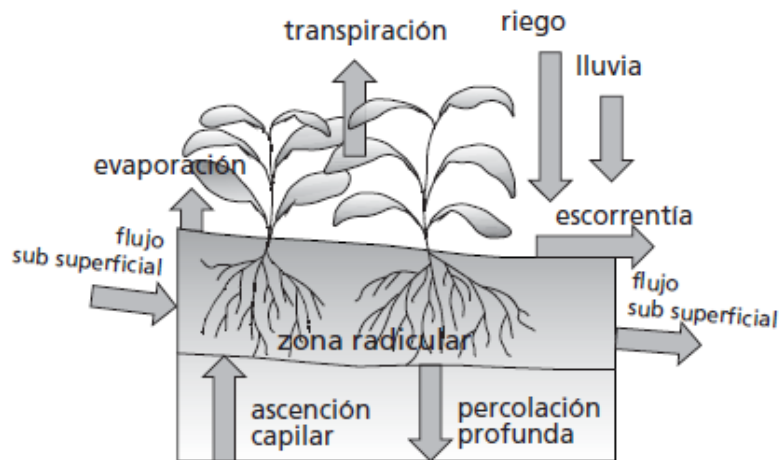


Fig. 74. Balance de agua en el suelo. Tomado de Allen et al. (2006).

La información obtenida a partir de un balance hídrico de suelos es de importancia en diferentes áreas, ya que permite determinar factores como la humedad en un suelo, el déficit y los excedentes, el momento en el cual un suelo alcanza su capacidad de campo o de almacenamiento, la disponibilidad del recurso hídrico a lo largo del año, y su distribución espacial dentro de la cuenca (SENAMHI, 2013).

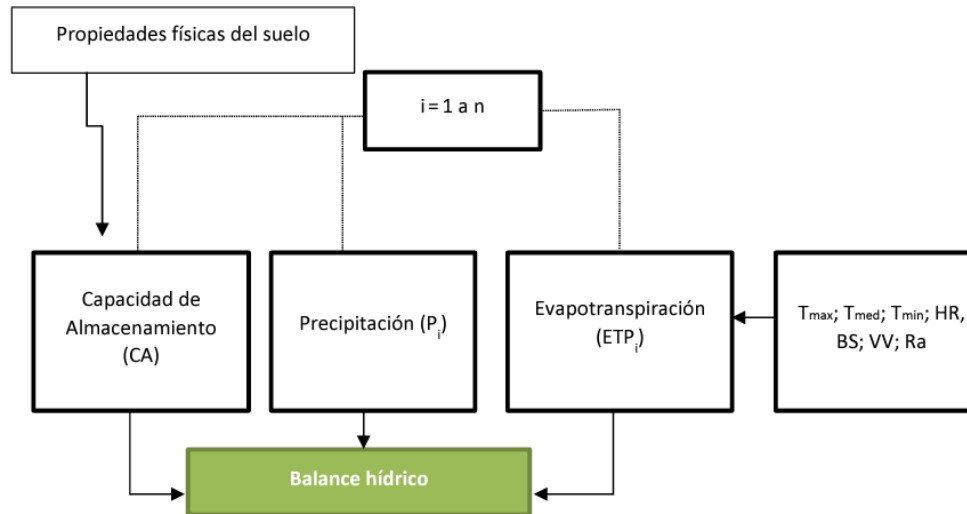


Fig. 75. Esquema general del balance hídrico en el suelo, donde P_i indica la precipitación o entrada del agua y ETP_i , las pérdidas debidas a la evapotranspiración potencial, estimada a través de las principales variables climáticas como los son temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), temperatura media (T_{med}), humedad relativa (HR), brillo solar (BS), velocidad del viento (VV), radiación solar (Ra); entre otros. Tomado de: IGAC (s.f.). BALANCE HÍDRICO Y SUS APLICACIONES.

Claro (2006), presenta la ecuación general del balance hídrico a partir de los datos de precipitación y evapotranspiración potencial:

$$P = ET + E + I + VR$$

Donde:

P: Precipitación

ET: Evapotranspiración

E: Escorrentía

I: Infiltración

VR: Variación de la reserva ($R_f - R_i$)

R_f : Reserva final

R_i : Reserva inicial

En este estudio, se aplicó el método de Thornthwaite para estimar el balance hídrico de suelos. Este método considera la Evapotranspiración Potencial (ETP), la Precipitación media y la capacidad de almacenamiento del suelo. La capacidad de campo se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener un suelo, la cual se puede calcular mediante ensayos de laboratorio, además de otros parámetros físicos del suelo, como humedad, plasticidad, relación de vacíos, porosidad y saturación. Existen valores tabulados de la capacidad de retención de agua del suelo, pero se requiere clasificar el tipo de suelo mediante un análisis granulométrico (Román, 2021), el cual no se realizó en este estudio. Es por esto que, siguiendo la metodología propuesta por Thornthwaite, se asumió una capacidad de almacenamiento del suelo de 100 mm para cada uno de los suelos presentes en las estaciones evaluadas. Es importante tener en cuenta que, las propiedades del suelo pueden variar considerablemente en el espacio, como menciona Rose (2004) por lo que asumir una capacidad de almacenamiento de 100 mm para todos los suelos de la cuenca puede involucrar un error.

La metodología de Thornthwaite también involucra el concepto de Lluvia útil o precipitación útil (PPT útil), que se obtiene sustrayendo la acción de la ETP y retenciones a las precipitaciones totales (SENAMHI, 2013).

El almacén o reserva hace referencia al agua retenida por el suelo presente en un determinado tiempo, está relacionado con el concepto de capacidad de campo, ya que si el almacén alcanza su capacidad máxima de retención de agua se dice que el suelo se encuentra en capacidad de campo. El almacén puede variar en función del tipo de suelo y del cultivo que soporte (Román, 2021). El almacén presenta dos fórmulas dependiendo de si la precipitación útil es positiva o negativa:

(1) Si $PPT - ETP > 0$:

$$Alm_T = Alm_{T-1} + Ppt \text{ útil}$$

(2) Si $PPT - ETP < 0$

$$Alm_T = Alm_{T-1} * e^{(PPT \text{ útil}/CC)}$$

Donde:

Alm_T : Valor del almacén o reserva en el mes a evaluar.

Alm_{T-1} : Valor del almacén o reserva del mes anterior.

PPT útil: Precipitación útil.

e: Euler

CC: Capacidad de almacenamiento o capacidad de campo

El delta del almacén refleja las variaciones mensuales en el almacenamiento. El cálculo de la ETR se realiza bajo dos situaciones. Cuando la PPT útil es positiva, implica que el suelo tiene la suficiente disponibilidad de agua para satisfacer los procesos de evapotranspiración (evaporación y transpiración de las plantas), por lo tanto, la ETR será igual a la ETP. Por otro lado, cuando la PPT útil es negativa, indica que el suelo no contiene la cantidad suficiente de agua para satisfacer los procesos de evapotranspiración, es por eso que la evapotranspiración utiliza toda el agua aportada por la precipitación y además utiliza parte del agua conservada en el almacén, es decir, para su cálculo se hace una suma entre la precipitación y el valor absoluto del delta del almacén.

Una vez calculada la ETR, el balance hídrico permite calcular los déficits o excedentes hídricos que se presenten en el suelo, por un lado, el déficit hídrico corresponde a la diferencia

entre la ETP y la ETR que, cuando la diferencia es nula (0.0) indica la suficiencia del suelo para satisfacer la evapotranspiración, por el contrario, cualquier otro valor indica un déficit o la cantidad de agua que hizo falta en los procesos de evapotranspiración a causa de bajas precipitaciones generalmente en temporadas secas.

Los excedentes hídricos, también conocidos como superávit, se producen cuando el suelo alcanza su capacidad de retención debido a las temporadas de lluvia, lo que resulta en un exceso de agua. Siguiendo la metodología de Thornthwaite, los excedentes se dividen en dos componentes iguales. La escorrentía o circulación, se refiere al agua que fluye superficial y sub-superficialmente a través del suelo, desembocando directamente en los cauces de agua y contribuyendo a la recarga del sistema hídrico superficial de una región. La segunda es la infiltración, se refiere al agua que se adentra en el suelo más allá del nivel de las raíces, alimentando así los acuíferos subterráneos.

10.5.1 Estación Río Claro-La Batea

Según el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de Villamaría (2017), esta estación se encuentra en la vereda La Batea. En sus suelos se producen café, plátano, yuca, mora, granadilla, fresa, flores, maíz y frijol.

Balance hídrico de suelos 2017													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	18,10	19,00	18,30	19,20	19,10	19,00	19,00	19,20	19,10	18,10	18,70	18,60	18,78
PPT (mm)	187,8	93,1	178,5	174,4	361,4	151,2	44,8	70,4	46,4	54,2	139,2	130,6	1632,0
ETP (mm)	65,0	65,1	67,5	73,0	75,3	72,7	74,5	76,0	71,6	66,1	67,6	68,5	842,9
PPT útil (mm)	122,8	28,0	111,0	101,4	286,1	78,5	-29,7	-5,6	-25,2	-11,9	71,6	62,1	789,1
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	74,3	70,3	54,6	48,5	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-25,7	-4,0	-15,7	-6,1	51,5	0,0	
Excedente (mm)	122,8	28,0	111,0	101,4	286,1	78,5	0,0	0,0	0,0	0,0	20,1	62,1	810,0
ETR (mm)	65,0	65,1	67,5	73,0	75,3	72,7	70,5	74,4	62,1	60,3	67,6	68,5	822,0
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	1,6	9,5	5,8	0,0	0,0	20,9
Infiltración (mm)	61,4	14,0	55,5	50,7	143,1	39,3	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	31,1	405,0
Escorrentía (mm)	61,4	14,0	55,5	50,7	143,1	39,3	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	31,1	405,0

Tabla 111. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2017).

Balance hídrico de suelos 2018													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	18,30	18,80	19,20	18,40	18,40	19,20	19,00	18,70	18,80	18,40	18,50	18,60	18,69
PPT (mm)	128,0	307,6	290,0	230,6	230,4	77,4	105,2	79,8	138,6	378,8	218,6	73,4	2258,4
ETP (mm)	66,7	64,0	74,5	67,5	70,3	74,5	74,8	72,5	69,8	68,6	66,5	68,9	838,6
PPT útil (mm)	61,3	243,6	215,5	163,1	160,1	2,9	30,4	7,3	68,8	310,2	152,1	4,5	1419,8
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	61,3	243,6	215,5	163,1	160,1	2,9	30,4	7,3	68,8	310,2	152,1	4,5	1419,8
ETR (mm)	66,7	64,0	74,5	67,5	70,3	74,5	74,8	72,5	69,8	68,6	66,5	68,9	838,6
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Infiltración (mm)	30,7	121,8	107,8	81,6	80,1	1,5	15,2	3,7	34,4	155,1	76,1	2,3	709,9
Escorrentía (mm)	30,7	121,8	107,8	81,6	80,1	1,5	15,2	3,7	34,4	155,1	76,1	2,3	709,9

Tabla 112. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2018).

Balance hídrico de suelos 2019													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	18,90	19,50	19,30	19,10	19,20	19,40	19,20	19,70	19,30	18,40	19,30	18,80	19,18
PPT (mm)	82,0	139,2	230,4	211,2	210,4	26,4	56,9	55,3	73,2	95,9	170,9	124,4	1476,2
ETP (mm)	69,4	67,3	73,6	70,9	74,7	74,4	74,7	78,6	71,8	66,9	70,6	68,6	861,5
PPT útil (mm)	12,6	71,9	156,8	140,3	135,7	-48,0	-17,8	-23,3	1,4	29,0	100,3	55,8	614,7
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	61,9	51,8	41,0	42,4	71,4	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-38,1	-10,1	-10,8	1,4	29,0	28,6	0,0	
Excedente (mm)	12,6	71,9	156,8	140,3	135,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	71,7	55,8	644,8
ETR (mm)	69,4	67,3	73,6	70,9	74,7	64,5	67,0	66,1	71,8	66,9	70,6	68,6	831,4
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,9	7,7	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	30,1
Infiltración (mm)	6,3	36,0	78,4	70,2	67,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35,9	27,9	322,4
Escorrentía (mm)	6,3	36,0	78,4	70,2	67,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35,9	27,9	322,4

Tabla 113. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2019).

Balance hídrico de suelos 2020													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	18,90	19,90	19,60	19,30	19,60	18,90	18,80	19,20	18,60	18,40	18,10	17,90	18,93
PPT (mm)	32,5	42,4	80,1	97,2	99,1	78,3	72,5	91,9	84,6	91,2	66,6	220,8	1057,2
ETP (mm)	70,2	73,3	76,7	73,2	78,6	71,4	72,4	75,5	67,5	67,7	62,9	63,1	852,5
PPT útil (mm)	-37,7	-30,9	3,4	24,0	20,5	6,9	0,1	16,4	17,1	23,5	3,7	157,7	204,7
Almacén (mm)	68,6	50,4	53,8	77,8	98,3	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-31,4	-18,2	3,4	24,0	20,5	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,2	0,1	16,4	17,1	23,5	3,7	157,7	223,7
ETR (mm)	63,9	60,6	76,7	73,2	78,6	71,4	72,4	75,5	67,5	67,7	62,9	63,1	833,5
Déficit (mm)	6,3	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	19,0
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	8,2	8,6	11,8	1,9	78,9	111,8
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	8,2	8,6	11,8	1,9	78,9	111,8

Tabla 114. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2020).

Balance hídrico de suelos 2021													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	18,90	17,80	17,80	18,80	18,80	18,40	19,00	18,50	18,40	18,30	18,10	18,70	18,46
PPT (mm)	50,8	121,8	113,9	84,5	93,6	144,6	264,2	292,8	78,5	281,8	227,8	174,2	1928,5
ETP (mm)	61,8	58,8	65,6	71,6	74,5	69,8	76,1	72,3	68,1	69,1	65,0	70,8	823,5
PPT útil (mm)	-11,0	63,0	48,3	12,9	19,1	74,8	188,1	220,5	10,4	212,7	162,8	103,4	1105,0
Almacén (mm)	89,6	100	100	100	100	100	100,0	100,0	100,0	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-10,4	10,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	52,6	48,3	12,9	19,1	74,8	188,1	220,5	10,4	212,7	162,8	103,4	1105,6
ETR (mm)	61,2	58,8	65,6	71,6	74,5	69,8	76,1	72,3	68,1	69,1	65,0	70,8	822,9
Déficit (mm)	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
Infiltración (mm)	0,0	26,3	24,2	6,5	9,6	37,4	94,1	110,3	5,2	106,4	81,4	51,7	552,8
Escorrentía (mm)	0,0	26,3	24,2	6,5	9,6	37,4	94,1	110,3	5,2	106,4	81,4	51,7	552,8

Tabla 115. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Batea (2021).

En la estación Río Claro-La Batea, el balance hídrico de suelos muestra que solo en uno de los períodos de sequía se experimenta déficit hídrico al año, solo durante el año 2018, la estación no experimenta déficit hídrico, lo que significa que, aunque hubo períodos de baja precipitación, la cantidad de lluvia fue relativamente mayor que la evapotranspiración, por lo que esta pudo satisfacer su demanda de agua. En general, se observa que los déficits hídricos se presentan principalmente en enero y entre junio y septiembre.

El balance hídrico muestra que el suelo se mantiene en su máxima capacidad de campo durante gran parte del año, generando excedentes hídricos constantemente. Estos excedentes representan una recarga efectiva y continua para el reservorio geotérmico y el sistema hídrico superficial de la región durante la mayor parte del año, pero especialmente durante los períodos de lluvia de octubre a diciembre y de marzo a mayo. En general, la estación Río Claro-La Batea experimenta déficit hídrico promedio de 14.1 mm al año, por el contrario, muestra un excedente de agua importante durante todo el año, de 840.8 mm, debido a la alta precipitación y a una diferencia relativamente baja entre la ETP y la ETR.

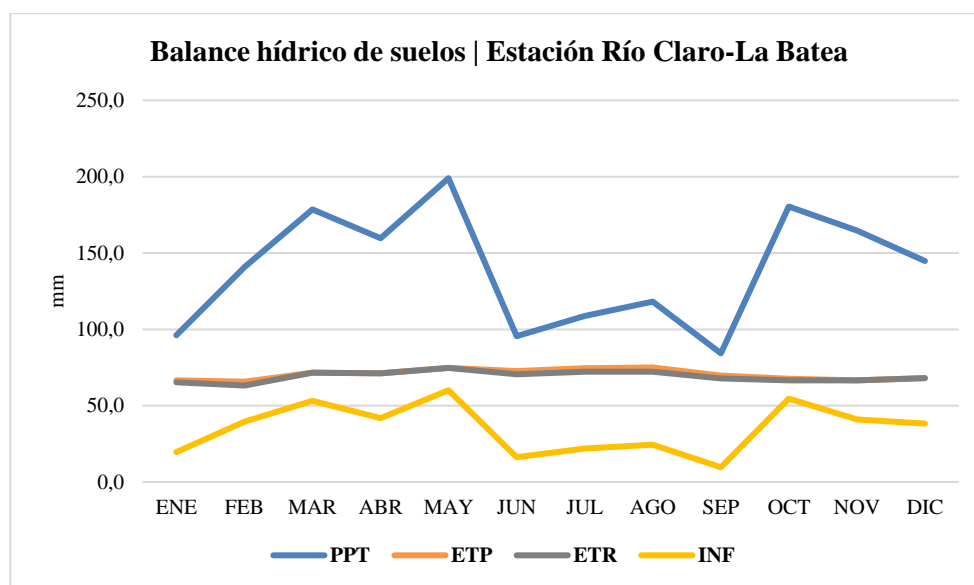


Fig. 76. Balance hídrico multianual para la estación Río Claro-La Batea (2017-2021).

10.5.2 Estación Río Claro-La Guayana

Según el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de Villamaría (2017), esta estación se encuentra en la vereda La Guayana, en donde se producen cultivos frutales y de hortalizas.

Según IGAC (2005), esta estación presenta suelos de cenizas volcánicas, muy profundos, rico en materia orgánica, con textura franco arenosa y buen desarrollo de estructuras, presenta colores negros a pardo muy oscuro. Es un suelo ligeramente ácido y que, por su alto contenido de alófono, es de difícil dispersión.

Balance hídrico de suelos 2016													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	17,24	18,40	18,50	17,70	17,70	17,00	17,10	17,60	17,00	16,70	16,60	16,40	17,33
PPT (mm)	50,8	54,6	111,4	53,8	130,0	44,4	52,2	39,2	125,4	175,6	174,2	202,4	1214,0
ETP (mm)	64,3	68,0	74,0	67,4	70,2	63,8	66,0	69,5	62,2	61,8	58,7	58,9	784,8
PPT útil (mm)	-13,5	-13,4	37,4	-13,6	59,8	-19,4	-13,8	-30,3	63,2	113,8	115,5	143,5	429,2
Almacén (mm)	87,4	76,4	100	87,3	100	82,4	71,7	53,0	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-12,6	-11,0	23,6	-12,7	12,7	-17,6	-10,6	-18,8	47,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	13,8	0,0	47,1	0,0	0,0	0,0	16,2	113,8	115,5	143,5	449,9
ETR (mm)	63,4	65,6	74,0	66,5	70,2	62,0	62,8	58,0	62,2	61,8	58,7	58,9	764,1
Déficit (mm)	0,9	2,4	0,0	0,9	0,0	1,8	3,2	11,5	0,0	0,0	0,0	0,0	20,7
Infiltración (mm)	0,0	0,0	6,9	0,0	23,5	0,0	0,0	0,0	8,1	56,9	57,8	71,8	224,9
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	6,9	0,0	23,5	0,0	0,0	0,0	8,1	56,9	57,8	71,8	224,9

Tabla 116. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2016).

Balance hídrico de suelos 2017													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	16,20	16,20	16,60	17,50	17,70	17,50	17,60	17,60	17,40	16,90	16,90	16,80	17,08
PPT (mm)	164,2	117,8	161,6	146,8	271,2	158,4	55,2	67,4	127,4	121,8	157,2	163,1	1712,1
ETP (mm)	58,5	53,3	62,1	66,9	71,1	68,0	70,4	70,4	65,7	64,0	61,5	62,3	774,2
PPT útil (mm)	105,7	64,5	99,5	79,9	200,1	90,4	-15,2	-3,0	61,7	57,8	95,7	100,8	937,9
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	85,9	83,4	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-14,1	-2,5	16,6	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	105,7	64,5	99,5	79,9	200,1	90,4	0,0	0,0	45,1	58	95,7	100,8	939,5
ETR (mm)	58,5	53,3	62,1	66,9	71,1	68,0	69,3	69,9	65,7	64,0	61,5	62,3	772,6
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6
Infiltración (mm)	52,9	32,3	49,8	40,0	100,1	45,2	0,0	0,0	22,5	28,9	47,9	50,4	469,7
Escorrentía (mm)	52,9	32,3	49,8	40,0	100,1	45,2	0,0	0,0	22,5	28,9	47,9	50,4	469,7

Tabla 117. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2017).

Balance hídrico de suelos 2018													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	16,80	17,30	17,70	17,30	17,70	17,70	17,60	17,40	17,10	17,30	17,90	17,30	17,43
PPT (mm)	94,4	291,4	187,0	203,4	223,0	62,0	104,0	74,2	81,6	135,0	270,0	60,8	1786,8
ETP (mm)	61,1	58,6	68,1	64,4	69,8	68,1	69,1	67,8	62,6	65,4	66,7	64,3	786,0
PPT útil (mm)	33,3	232,8	118,9	139,0	153,2	-6,1	34,9	6,4	19,0	69,6	203,3	-3,5	1000,8
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	94,1	100	100	100,0	100	100	96,6	
Delta almacén (mm)	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	-5,9	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	-3,4	
Excedente (mm)	33,3	232,8	118,9	139,0	153,2	0,0	29,0	6,4	19,0	69,6	203,3	0,0	1004,5
ETR (mm)	61,1	58,6	68,1	64,4	69,8	67,9	69,1	67,8	62,6	65,4	66,7	64,2	785,8
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2
Infiltración (mm)	16,7	116,4	59,5	69,5	76,6	0,0	14,5	3,2	9,5	34,8	101,7	0,0	502,2
Escorrentía (mm)	16,7	116,4	59,5	69,5	76,6	0,0	14,5	3,2	9,5	34,8	101,7	0,0	502,2

Tabla 118. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2018).

Balance hídrico de suelos 2019													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	17,40	17,80	17,70	17,90	18,10	18,00	18,00	18,10	17,90	17,10	17,20	17,60	17,73
PPT (mm)	80,4	73,8	199,2	249,6	321,2	190,4	79,6	110,4	113,4	143,6	246,0	217,4	2025,0
ETP (mm)	63,9	60,7	67,0	67,3	71,6	69,1	70,8	71,6	66,8	63,0	61,1	65,3	798,2
PPT útil (mm)	16,5	13,1	132,2	182,3	249,6	121,3	8,8	38,8	46,6	80,6	184,9	152,1	1226,8
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	13,1	13,1	132,2	182,3	249,6	121,3	8,8	38,8	46,6	80,6	184,9	152,1	1223,4
ETR (mm)	63,9	60,7	67,0	67,3	71,6	69,1	70,8	71,6	66,8	63,0	61,1	65,3	798,2
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Infiltración (mm)	6,5	6,6	66,1	91,2	124,8	60,7	4,4	19,4	23,3	40,3	92,5	76,1	611,7
Escorrentía (mm)	6,5	6,6	66,1	91,2	124,8	60,7	4,4	19,4	23,3	40,3	92,5	76,1	611,7

Tabla 119. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2019).

Balance hídrico de suelos 2020													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	17,90	17,90	17,80	17,60	17,80	17,20	17,50	17,60	17,00	16,80	16,30	16,60	17,33
PPT (mm)	85,4	42,6	95,8	163,4	89,8	117,8	103,6	98,6	87,6	77,2	188,2	195,7	1345,7
ETP (mm)	68,7	64,8	69,1	66,7	70,9	65,1	68,8	69,5	62,2	62,5	56,8	60,1	785,2
PPT útil (mm)	16,7	-22,2	26,7	96,7	18,9	52,7	34,8	29,1	25,4	14,7	131,4	135,6	560,5
Almacén (mm)	100	80,1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	-19,9	19,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	16,7	0,0	6,8	96,7	18,9	52,7	34,8	29,1	25,4	14,7	131,4	135,6	562,8
ETR (mm)	68,7	62,5	69,1	66,7	70,9	65,1	68,8	69,5	62,2	62,5	56,8	60,1	782,9
Déficit (mm)	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3
Infiltración (mm)	8,4	0,0	3,4	48,4	9,5	26,4	17,4	14,6	12,7	7,4	65,7	67,8	281,4
Escorrentía (mm)	8,4	0,0	3,4	48,4	9,5	26,4	17,4	14,6	12,7	7,4	65,7	67,8	281,4

Tabla 120. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2020).

Balance hídrico de suelos 2021													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	17,90	18,60	17,60	18,70	17,60	17,00	17,70	18,57	17,28	16,96	16,90	17,20	17,67
PPT (mm)	45,8	114,1	165,5	139,1	152,1	207,8	166,8	131,8	109,5	77,8	93,6	151,4	1555,3
ETP (mm)	67,5	65,9	66,6	73,1	68,2	62,6	68,9	75,1	62,9	62,3	59,4	62,8	795,3
PPT útil (mm)	-21,7	48,2	98,9	66,0	83,9	145,2	97,9	56,7	46,6	15,5	34,2	88,6	760,0
Almacén (mm)	80,5	100	100	100	100	100	100	100	100,0	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-19,5	19,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	28,7	98,9	66,0	83,9	145,2	97,9	56,7	46,6	15,5	34,2	88,6	762,2
ETR (mm)	65,3	65,9	66,6	73,1	68,2	62,6	68,9	75,1	62,9	62,3	59,4	62,8	793,1
Déficit (mm)	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2
Infiltración (mm)	0,0	14,3	49,5	33,0	42,0	72,6	49,0	28,4	23,3	7,8	17,1	44,3	381,1
Escorrentía (mm)	0,0	14,3	49,5	33,0	42,0	72,6	49,0	28,4	23,3	7,8	17,1	44,3	381,1

Tabla 121. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-La Guayana (2021).

El balance hídrico para la estación Río Claro-La Guayana indica una menor cantidad de precipitación principalmente entre diciembre y enero, y entre julio y agosto, en donde la evapotranspiración, en ocasiones, es superior a la precipitación, haciendo que la estación experimente déficit hídrico en alguno de estos meses mencionados, a excepción del año 2019, en donde se registraron precipitaciones abundantes de 2025 mm a lo largo de este año, por lo que en ningún momento se experimentó déficits hídricos.

Por el contrario, los meses restantes, e incluso algunos de los mese anteriormente mencionados durante años lluviosos, presentan valores positivos de PPT útil, lo que indica que gran parte del año el suelo cuenta con una reserva de humedad disponible, generando excedentes hídricos constantes de 823.7 mm al año que representan una recarga efectiva y continua para el reservorio geotérmico y el sistema hídrico superficial de la región durante todo el año, pero especialmente durante los períodos de lluvia de octubre a diciembre y de marzo a mayo.

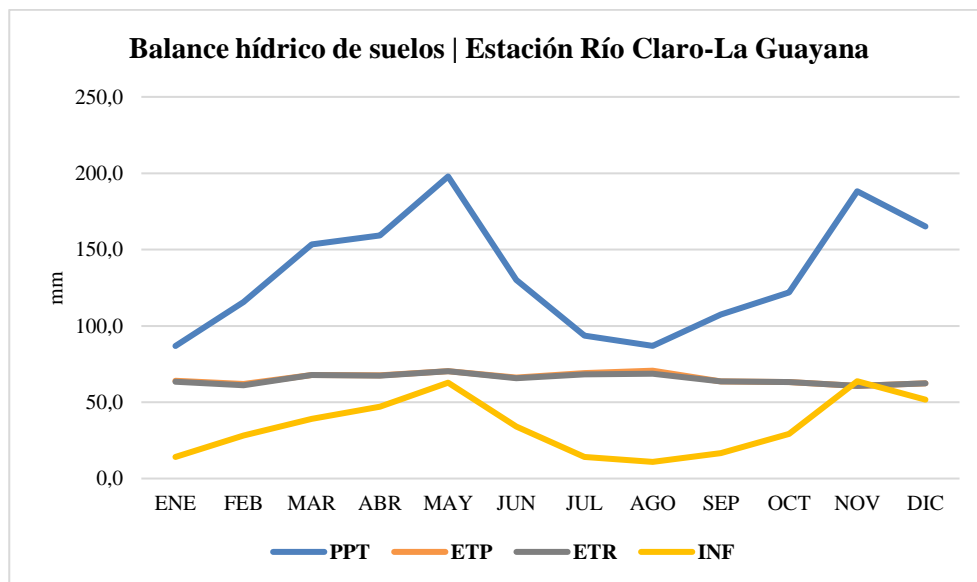


Fig. 77. Balance hídrico multianual para la estación Río Claro-La Guayana (2016-2021).

10.5.3 Estación Q. Nereidas-CHEC

Esta estación esta sobre una la unidad SRg que corresponde a suelos con muchos afloramientos rocosos cubiertos por vegetación arbustiva y arbórea, su textura va de limo arenosa a arenosa con rocas sin estructura (Ingeniería Strycon S.A.S, 2017 en Román, 2021).

Por su parte, en el archivo geoespacial sobre los suelos de Caldas de IGAC (2005), se presenta un suelo a partir de ceniza volcánica, muy profundo y rico en materia orgánica, con texturas franco arenosas desarrollados en laderas quebradas y escarpadas.

Balance hídrico de suelos 2016													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	13,32	13,56	13,59	12,81	12,96	12,67	12,35	12,40	12,08	12,01	13,31	12,68	12,81
PPT (mm)	19,7	47,1	57,0	26,8	115,2	43,0	57,8	23,6	73,4	154,0	160,0	166,4	944,0
ETP (mm)	57,3	55,3	59,8	54,6	57,7	54,7	54,3	54,6	50,3	51,1	50,6	53,9	654,2
PPT útil (mm)	-37,6	-8,2	-2,8	-27,8	57,5	-11,7	3,5	-31,0	23,1	102,9	109,4	112,5	289,8
Almacén (mm)	68,7	63,3	61,5	46,6	100	89,0	92,5	67,8	90,9	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-31,3	-5,4	-1,7	-14,9	53,4	-11,0	3,5	-24,6	23,1	9,1	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	93,8	109,4	112,5	319,8
ETR (mm)	51,0	52,5	58,7	41,7	57,7	54,0	54,3	48,2	50,3	51,1	50,6	53,9	624,2
Déficit (mm)	6,3	2,8	1,1	12,9	0,0	0,7	0,0	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,9	54,7	56,3	159,9
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,9	54,7	56,3	159,9

Tabla 122. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2016).

Balance hídrico de suelos 2017													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	12,69	11,85	12,15	12,37	12,64	12,47	12,61	12,33	12,08	12,60	12,38	12,48	12,39
PPT (mm)	85,6	47,8	29,4	81,2	164,8	139,0	43,4	56,8	61,2	93,6	161,6	99,0	1063,4
ETP (mm)	55,2	46,1	53,1	53,5	57,2	54,9	57,0	55,5	51,5	55,6	52,2	54,0	645,8
PPT útil (mm)	30,4	1,7	-23,7	27,7	107,6	84,1	-13,6	1,3	9,7	38,0	109,4	45,0	417,6
Almacén (mm)	100	100	78,9	100	100	100	87,3	88,6	98,3	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	-21,1	21,1	0,0	0,0	-12,7	1,3	9,7	1,7	0,0	0,0	
Excedente (mm)	30,4	1,7	0,0	6,6	107,6	84,1	0,0	0,0	0,0	36,3	109,4	45,0	421,1
ETR (mm)	55,2	46,1	50,5	53,5	57,2	54,9	56,1	55,5	51,5	55,6	52,2	54,0	642,3
Déficit (mm)	0,0	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5
Infiltración (mm)	15,2	0,8	0,0	3,3	53,8	42,1	0,0	0,0	0,0	18,1	54,7	22,5	210,5
Escorrentía (mm)	15,2	0,8	0,0	3,3	53,8	42,1	0,0	0,0	0,0	18,1	54,7	22,5	210,5

Tabla 123. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2017).

Balance hídrico de suelos 2018													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	12,06	12,37	12,39	12,25	12,41	12,04	12,47	12,33	12,31	12,55	13,61	13,30	12,51
PPT (mm)	50,6	110,8	112,4	189,6	102,0	21,8	59,8	57,4	50,3	82,0	141,2	47,6	1025,5
ETP (mm)	51,3	48,3	54,0	52,4	55,5	52,1	55,8	55,0	52,3	54,9	58,3	58,0	647,9
PPT útil (mm)	-0,7	62,5	58,4	137,2	46,5	-30,3	4,0	2,4	-2,0	27,1	82,9	-10,4	377,6
Almacén (mm)	99,3	100	100	100	100	73,9	77,9	80,3	78,7	100	100	90,1	
Delta almacén (mm)	9,2	0,7	0,0	0,0	0,0	-26,1	4,0	2,4	-1,6	21,3	0,0	-9,9	
Excedente (mm)	0,0	61,8	58,4	137,2	46,5	0,0	0,0	0,0	0,0	5,8	82,9	0,0	392,6
ETR (mm)	41,4	48,3	54,0	52,4	55,5	47,9	55,8	55,0	51,9	54,9	58,3	57,5	632,9
Déficit (mm)	9,9	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,5	15,0
Infiltración (mm)	0,0	30,9	29,2	68,6	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	41,5	0,0	196,3
Escorrentía (mm)	0,0	30,9	29,2	68,6	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	41,5	0,0	196,3

Tabla 124. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2018).

Balance hídrico de suelos 2019													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	13,64	14,66	14,83	14,64	14,53	14,63	14,89	14,53	13,56	12,64	12,90	12,88	14,03
PPT (mm)	37,4	59,4	67,4	53,4	76,0	33,8	11,2	53,6	40,3	98,4	149,8	52,8	733,5
ETP (mm)	51,3	48,3	54,0	52,4	55,5	52,1	55,8	55,0	52,3	54,9	58,3	58,0	647,9
PPT útil (mm)	-13,9	11,1	13,4	1,0	20,5	-18,3	-44,6	-1,4	-12,0	43,5	91,5	-5,2	85,6
Almacén (mm)	78,4	89,5	100	100	100	83,3	53,3	52,6	46,6	90,1	100	94,9	
Delta almacén (mm)	-11,7	11,1	10,5	0,0	0,0	-16,7	-30,0	-0,7	-5,9	43,5	9,9	-5,1	
Excedente (mm)	0,0	0,0	2,9	1,0	20,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0	81,6	0,0	106,1
ETR (mm)	49,1	48,3	54,0	52,4	55,5	50,5	41,2	54,3	46,2	54,9	58,3	57,9	622,6
Déficit (mm)	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	14,6	0,7	6,1	0,0	0,0	0,1	25,3
Infiltración (mm)	0,0	0,0	1,5	0,5	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,8	0,0	53,0
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	1,5	0,5	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	40,8	0,0	53,0

Tabla 125. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2019).

Balance hídrico de suelos 2020													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	14,20	14,23	14,22	14,68	15,07	14,18	13,99	13,77	13,53	13,39	13,31	13,07	13,97
PPT (mm)	27,3	66,2	70,4	86,6	34,0	73,0	59,2	90,6	61,6	107,6	136,4	45,4	858,3
ETP (mm)	57,8	54,7	58,9	60,6	65,4	58,7	59,0	57,7	53,6	54,2	51,6	51,5	683,7
PPT útil (mm)	-30,5	11,5	11,5	26,0	-31,4	14,3	0,2	32,9	8,0	53,4	84,8	-6,1	174,6
Almacén (mm)	70,0	81,5	93,0	100	73,1	87,4	87,6	100	100	100	100	94,1	
Delta almacén (mm)	-24,1	11,5	11,5	7,0	-26,9	14,3	0,2	12,4	0,0	0,0	0,0	-5,9	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	19,0	0,0	0,0	0,0	20,5	8,0	53,4	84,8	0,0	185,6
ETR (mm)	51,4	54,7	58,9	60,6	60,9	58,7	59,0	57,7	53,6	54,2	51,6	51,3	672,7
Déficit (mm)	6,4	0,0	0,0	0,0	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	11,0
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	9,5	0,0	0,0	0,0	10,2	4,0	26,7	42,4	0,0	92,8
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	9,5	0,0	0,0	0,0	10,2	4,0	26,7	42,4	0,0	92,8

Tabla 126. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2020).

Balance hídrico de suelos 2021													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	14,00	14,66	14,37	14,98	15,22	14,89	14,74	14,31	13,71	14,30	12,90	12,51	14,22
PPT (mm)	23,6	60,6	106,0	73,2	86,2	109,4	102,2	39,6	28,2	55,0	124,8	65,8	874,6
ETP (mm)	55,8	54,2	58,8	61,4	65,4	61,9	62,5	60,0	53,7	58,4	48,5	47,6	688,2
PPT útil (mm)	-32,2	6,4	47,2	11,8	20,8	47,5	39,7	-20,4	-25,5	-3,4	76,3	18,2	186,4
Almacén (mm)	68,2	74,6	100	100	100	100	100	81,5	63,2	61,1	100	100	
Delta almacén (mm)	-25,9	6,4	25,4	0,0	0,0	0,0	0,0	-18,5	-18,4	-2,1	38,9	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	21,8	11,8	20,8	47,5	39,7	0,0	0,0	0,0	37,4	18,2	197,2
ETR (mm)	49,5	54,2	58,8	61,4	65,4	61,9	62,5	58,1	46,6	57,1	48,5	47,6	671,5
Déficit (mm)	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	7,1	1,3	0,0	0,0	16,7
Infiltración (mm)	0,0	0,0	10,9	5,9	10,4	23,8	19,9	0,0	0,0	0,0	18,7	9,1	98,6
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	10,9	5,9	10,4	23,8	19,9	0,0	0,0	0,0	18,7	9,1	98,6

Tabla 127. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-CHEC (2021).

En general, durante los meses de octubre y noviembre, se registra una PPT útil positiva que permite que el suelo alcance su capacidad de campo, esto significa que la cantidad de precipitación en este período satisface los requerimientos de la evapotranspiración y llena el almacén hasta su capacidad máxima, incluso se generan excedentes de agua que se distribuyen entre circulación superficial o escorrentía e infiltración. Un patrón similar se presenta en los períodos de febrero a junio, en donde las precipitaciones útiles positivas mantienen el almacenamiento del suelo en su nivel máximo y generan excedentes, aunque con algunas excepciones dependiendo de la cantidad de lluvia.

Por otro lado, a pesar de que se presentan dos períodos de PPT útil negativa, durante los cuales la cantidad de precipitación es insuficiente para satisfacer la demanda de agua requerida por la evapotranspiración, esto no afecta significativamente el almacenamiento del suelo. En general, la estación no registra un déficit significativo, la diferencia entre la ETP y la ETR es de 16.9 mm en promedio, distribuidos a lo largo del año hidrológico.

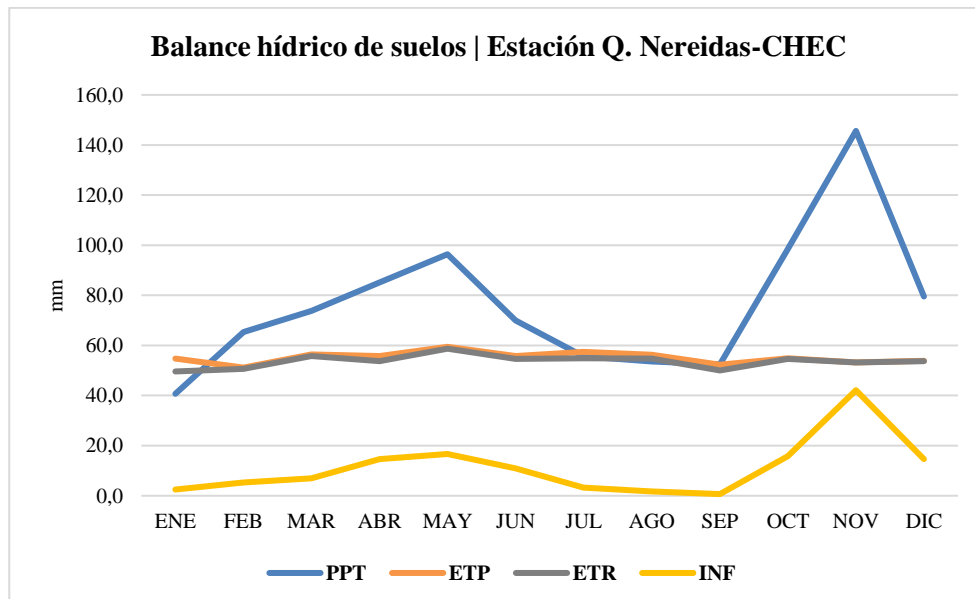


Fig. 78. Balance hídrico multianual para la estación Q. Nereidas-CHEC (2016-2021).

10.5.4 Estación Pirineos-CHEC

La estación Pirineos-CHEC está situada, según IGAC (2005), sobre un suelo producto de cenizas volcánicas y arenas con espesor variable, presenta una textura gruesa a moderadamente gruesa. La clasificación de la cobertura del suelo indica que se trata de un desierto periglacial representado por arenas, en un lugar donde antes solía existir una cobertura glaciaria (Delgado, 2020; Román, 2021).

Balance hídrico de suelos 2016													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	9,11	9,42	9,51	10,44	10,48	9,82	9,58	9,45	9,31	9,36	9,45	9,06	9,58
PPT (mm)	67,3	106,2	189,9	37,0	125,8	61,9	35,3	58,4	68,4	144,8	136,2	74,0	1105,2
ETP (mm)	46,6	45,5	49,5	53,5	56,0	51,1	51,1	50,4	47,3	48,7	47,2	46,3	593,2
PPT útil (mm)	20,7	60,7	140,4	-16,5	69,8	10,8	-15,8	8,0	21,1	96,1	89,0	27,7	512,0
Almacén (mm)	100	100	100	84,8	100	100	85,4	93,4	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	-15,2	15,2	0,0	-14,6	8,0	6,6	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	20,7	60,7	140,4	0,0	54,6	10,8	0,0	0,0	14,5	96,1	89,0	27,7	514,5
ETR (mm)	46,6	45,5	49,5	52,2	56,0	51,1	49,9	50,4	47,3	48,7	47,2	46,3	590,7
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	1,3	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
Infiltración (mm)	10,4	30,4	70,2	0,0	27,3	5,4	0,0	0,0	7,2	48,0	44,5	13,9	257,3
Escorrentía (mm)	10,4	30,4	70,2	0,0	27,3	5,4	0,0	0,0	7,2	48,0	44,5	13,9	257,3

Tabla 128. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2016).

Balance hídrico de suelos 2017													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	8,90	8,76	9,31	9,87	9,90	9,72	9,70	9,42	9,44	9,45	9,33	9,12	9,41
PPT (mm)	45,6	124,4	142,5	103,0	169,6	114,0	26,4	45,8	67,8	147,6	152,0	108,0	1246,7
ETP (mm)	45,5	40,8	48,4	50,6	52,8	50,6	51,8	50,3	47,9	49,2	46,6	46,7	581,2
PPT útil (mm)	0,1	83,6	94,1	52,4	116,8	63,4	-25,4	-4,5	19,9	98,4	105,4	61,3	665,5
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	77,6	74,2	94,1	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-22,4	-3,4	19,9	5,9	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,10	83,6	94,1	52,4	116,8	63,4	0,0	0,0	0,0	92,5	105,4	61,3	669,6
ETR (mm)	45,5	40,8	48,4	50,6	52,8	50,6	48,8	49,2	47,9	49,2	46,6	46,7	577,1
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1
Infiltración (mm)	0,05	41,8	47,1	26,2	58,4	31,7	0,0	0,0	0,0	46,2	52,7	30,7	334,8
Escorrentía (mm)	0,05	41,8	47,1	26,2	58,4	31,7	0,0	0,0	0,0	46,2	52,7	30,7	334,8

Tabla 129. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2017).

Balance hídrico de suelos 2018													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	8,74	9,19	9,58	9,15	9,55	9,60	9,45	9,36	9,28	9,35	9,46	8,92	9,30
PPT (mm)	57,4	100,4	100,4	150,6	157,6	36,0	44,8	38,2	67,8	226,0	131,0	45,0	1155,2
ETP (mm)	44,7	42,8	49,9	46,8	51,0	50,0	50,4	49,9	47,1	48,7	47,3	45,6	574,2
PPT útil (mm)	12,7	57,6	50,5	103,8	106,6	-14,0	-5,6	-11,7	20,7	177,3	83,7	-0,6	581,0
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	86,9	82,2	73,1	93,8	100	100	99,4	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-13,1	-4,7	-9,1	20,7	6,2	0,0	-0,6	
Excedente (mm)	12,7	57,6	50,5	103,8	106,6	0,0	0,0	0,0	0,0	171,1	83,7	0,0	586,0
ETR (mm)	44,7	42,8	49,9	46,8	51,0	49,1	49,5	47,3	47,1	48,7	47,3	45,6	569,8
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,9	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	4,4
Infiltración (mm)	6,4	28,8	25,3	51,9	53,3	0,0	0,0	0,0	0,0	85,6	41,9	0,0	293,0
Escorrentía (mm)	6,4	28,8	25,3	51,9	53,3	0,0	0,0	0,0	0,0	85,6	41,9	0,0	293,0

Tabla 130. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2018).

Balance hídrico de suelos 2019													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	9,51	9,89	10,02	10,06	10,05	10,17	9,58	9,70	9,53	8,94	9,24	9,54	9,69
PPT (mm)	27,4	79,8	108,8	139,0	121,0	54,2	24,4	61,1	60,2	94,8	109,8	60,0	940,5
ETP (mm)	48,7	46,1	52,2	51,6	53,7	53,0	51,1	51,8	48,4	46,5	46,1	48,8	598,0
PPT útil (mm)	-21,3	33,7	56,6	87,4	67,3	1,2	-26,7	9,3	11,8	48,3	63,7	11,2	342,5
Almacén (mm)	80,3	100	100	100	100	100	76,6	85,9	97,7	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-19,7	19,7	0,0	0,0	0,0	0,0	-23,4	9,3	11,8	2,3	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	14,0	56,6	87,4	67,3	1,2	0,0	0,0	0,0	46,0	63,7	11,2	347,4
ETR (mm)	47,1	46,1	52,2	51,6	53,7	53,0	47,8	51,8	48,4	46,5	46,1	48,8	593,1
Déficit (mm)	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9
Infiltración (mm)	0,0	7,0	28,3	43,7	33,7	0,6	0,0	0,0	0,0	23,0	31,9	5,6	173,7
Escorrentía (mm)	0,0	7,0	28,3	43,7	33,7	0,6	0,0	0,0	0,0	23,0	31,9	5,6	173,7

Tabla 131. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2019).

Balance hídrico de suelos 2020													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	9,50	9,97	9,82	9,96	10,42	9,74	9,27	9,54	9,20	9,16	8,95	8,72	9,52
PPT (mm)	43,4	43,6	83,4	72,8	36,8	74,3	32,0	98,8	77,2	123,2	156,8	92,0	934,3
ETP (mm)	48,6	48,2	51,1	51,0	55,7	50,7	49,4	50,9	46,7	47,7	44,7	44,6	589,3
PPT útil (mm)	-5,2	-4,6	32,3	21,8	-18,9	23,6	-17,4	47,9	30,5	75,5	112,1	47,4	345,0
Almacén (mm)	94,9	90,7	100	100	82,8	100	84,0	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-5,1	-4,3	9,3	0,0	-17,2	17,2	-16,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	23,0	21,8	0,0	6,4	0,0	31,9	30,5	75,5	112,1	47,4	348,6
ETR (mm)	48,5	47,9	51,1	51,0	54,0	50,7	48,0	50,9	46,7	47,7	44,7	44,6	585,7
Déficit (mm)	0,1	0,3	0,0	0,0	1,7	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6
Infiltración (mm)	0,0	0,0	11,5	10,9	0,0	3,2	0,0	16,0	15,3	37,8	56,1	23,7	174,3
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	11,5	10,9	0,0	3,2	0,0	16,0	15,3	37,8	56,1	23,7	174,3

Tabla 132. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2020).

Balance hídrico de suelos 2021													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	8,91	9,30	8,83	9,72	9,91	9,26	9,55	9,20	9,10	9,46	9,05	8,86	9,26
PPT (mm)	29,8	182,8	230,2	95,2	143,8	105,2	48,8	102,8	69,0	132,2	131,4	65,2	1336,4
ETP (mm)	45,6	43,3	45,9	49,8	52,9	48,2	51,0	49,1	46,2	49,2	45,2	45,3	571,7
PPT útil (mm)	-15,8	139,5	184,3	45,4	90,9	57,0	-2,2	53,7	22,8	83,0	86,2	19,9	764,7
Almacén (mm)	85,4	100	100	100	100	100	97,8	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-14,6	14,6	0,0	0,0	0,0	0,0	-2,2	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	124,9	184,3	45,4	90,9	57,0	0,0	51,5	22,8	83,0	86,2	19,9	765,9
ETR (mm)	44,4	43,3	45,9	49,8	52,9	48,2	51,0	49,1	46,2	49,2	45,2	45,3	570,5
Déficit (mm)	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2
Infiltración (mm)	0,0	62,4	92,2	22,7	45,5	28,5	0,0	25,8	11,4	41,5	43,1	10,0	383,0
Escorrentía (mm)	0,0	62,4	92,2	22,7	45,5	28,5	0,0	25,8	11,4	41,5	43,1	10,0	383,0

Tabla 133. Balance hídrico de suelos para la estación Pirineos-CHEC (2021).

Para la estación Pirineos-CHEC, el balance hídrico muestra dos períodos con PPT útil negativa que se corresponden con los dos períodos de sequía anuales, el primero se observa en los meses de enero y diciembre, y el segundo entre junio y agosto. En esta estación es posible observar cómo existe una disminución en las precipitaciones, en el intermedio del periodo de lluvias de marzo a mayo, como se ve en los años 2016 y 2020 en donde las precipitaciones disminuyeron, generando déficits hídricos en los meses de abril y mayo respectivamente.

Por otro lado, el resto de los meses presentan valores de PPT útil positiva, destacando dos períodos de lluvia, el primero ocurre entre octubre y noviembre, y el segundo entre marzo y mayo. Durante estos meses, se producen las mayores precipitaciones al año, lo que permite que el suelo alcance su máximo nivel de almacenamiento y genere excedentes de agua.

En general, la estación no registra un déficit significativo de 3.6 mm en promedio por año. Sin embargo, presenta un excedente hídrico de 538.7 mm, lo que supone una recarga efectiva para el reservorio geotérmico y el sistema hídrico superficial de la región.

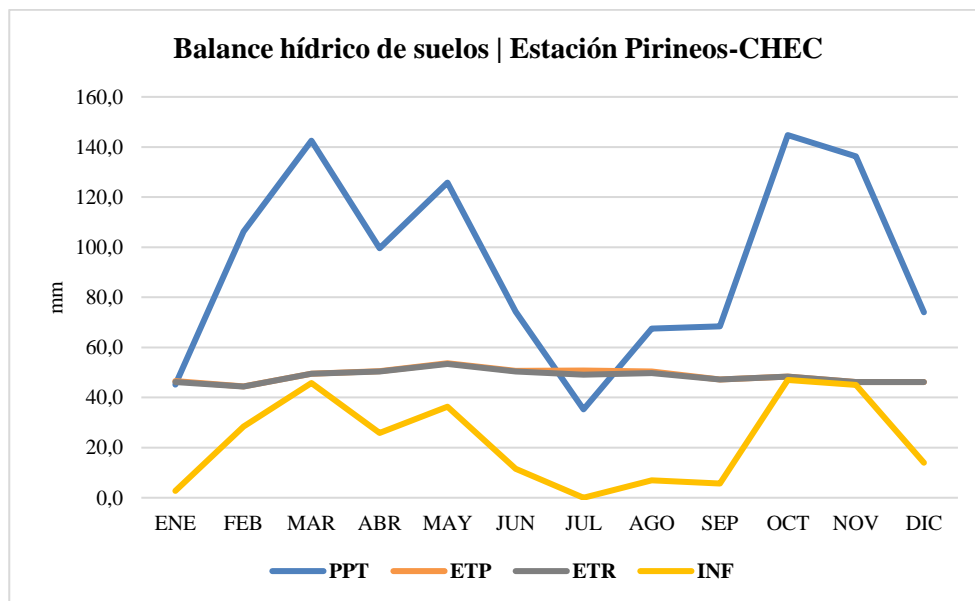


Fig. 79. Balance hídrico multianual para la estación Pirineos-CHEC (2016-2021).

10.5.5 Estación Las Brisas

Según Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de Villamaría (2017), la estación se encuentra cerca de la vereda Romeral, en donde se presentan principalmente cultivos de papa y cebolla larga.

Según IGAC (2005), el suelo que rodea a esta estación corresponde a suelos de arena y ceniza volcánica muy superficiales, con textura gruesa a moderadamente gruesa, cerca de este sector también es posible llegar a nieves perpetuas, por lo que este sector probablemente estuvo cubierto por un glaciar en algún momento del tiempo geológico.

Balance hídrico de suelos 2016													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	4,3	4,7	5,4	5,95	3,9	6,4	5,3	3,6	2,47	2,05	1,5	-0,6	3,75
PPT (mm)	27,1	92,0	72,1	152,3	14,0	88,0	109,8	56,9	96,1	188,2	240,0	104,1	1240,6
ETP (mm)	45,3	45,3	53,4	55,9	44,4	59,6	54,1	42,2	31,5	28,6	22,5	0,0	482,7
PPT útil (mm)	-18,2	46,7	18,7	96,4	-30,4	28,4	55,7	14,7	64,6	159,6	217,5	104,1	757,9
Almacén (mm)	83,3	100	100	100	74	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-16,7	16,7	0,0	0,0	-26,2	26,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	30,0	18,7	96,4	0,0	2,2	55,7	14,7	64,6	159,6	217,5	104,1	763,6
ETR (mm)	43,8	45,3	53,4	55,9	40,2	59,6	54,1	42,2	31,5	28,6	22,5	0,0	476,9
Déficit (mm)	1,6	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,7
Infiltración (mm)	0,0	15,0	9,4	48,2	0,0	1,1	27,9	7,4	32,3	79,8	108,8	52,1	381,8
Escorrentía (mm)	0,0	15,0	9,4	48,2	0,0	1,1	27,9	7,4	32,3	79,8	108,8	52,1	381,8

Tabla 134. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2016).

Balance hídrico de suelos 2017													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	-1,7	3,2	4,5	5,3	6,9	2,09	2,58	2,64	2,47	2,05	2,1	1,78	2,83
PPT (mm)	97,7	48,6	293,0	157,4	272,3	156,9	53,9	58,4	85,1	123,6	161,0	122,6	1630,6
ETP (mm)	0,0	39,7	54,5	59,1	72,1	34,4	40,0	40,5	37,1	34,0	33,1	30,7	475,1
PPT útil (mm)	97,7	8,9	238,5	98,3	200,2	122,5	14,0	17,9	48,0	89,6	127,9	91,9	1155,4
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	97,7	8,9	238,5	98,3	200,2	122,5	14,0	17,9	48,0	89,6	127,9	91,9	1155,4
ETR (mm)	0,0	39,7	54,5	59,1	72,1	34,4	40,0	40,5	37,1	34,0	33,1	30,7	475,1
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Infiltración (mm)	48,9	4,4	119,3	49,1	100,1	61,3	7,0	9,0	24,0	44,8	64,0	46,0	577,7
Escorrentía (mm)	48,9	4,4	119,3	49,1	100,1	61,3	7,0	9,0	24,0	44,8	64,0	46,0	577,7

Tabla 135. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2017).

Balance hídrico de suelos 2018													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	3,96	4,9	4,2	4,5	3,5	5,5	4,5	5	4,50	6,50	7,1	6,4	5,05
PPT (mm)	67,7	108,2	155,5	178,4	262,5	87,4	96,6	68,9	41,0	217,4	110,8	44,7	1439,1
ETP (mm)	36,9	39,0	39,1	40,3	35,2	47,2	42,0	45,3	40,0	53,1	54,2	51,7	524,0
PPT útil (mm)	30,8	69,2	116,4	138,1	227,3	40,2	54,6	23,6	1,0	164,3	56,6	-7,0	915,0
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93,3	
Delta almacén (mm)	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-6,7	
Excedente (mm)	24,1	69,2	116,4	138,1	227,3	40,2	54,6	23,6	1,0	164,3	56,6	0,0	915,3
ETR (mm)	36,9	39,0	39,1	40,3	35,2	47,2	42,0	45,3	40,0	53,1	54,2	51,4	523,8
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2
Infiltración (mm)	12,1	34,6	58,2	69,0	113,6	20,1	27,3	11,8	0,5	82,1	28,3	0,0	457,7
Escorrentía (mm)	12,1	34,6	58,2	69,0	113,6	20,1	27,3	11,8	0,5	82,1	28,3	0,0	457,7

Tabla 136. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2018).

Balance hídrico de suelos 2019													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	4,9	5,7	5,3	7,1	7,2	6,1	6,5	6,4	5,10	6,60	5,85	6,4	6,10
PPT (mm)	61,0	111,7	157,4	156,3	181,1	76,7	57,8	16,7	107,3	162,2	140,9	68,6	1297,7
ETP (mm)	37,8	38,7	40,9	50,3	53,0	45,5	49,0	48,4	38,7	48,3	42,3	46,4	539,3
PPT útil (mm)	23,2	73,0	116,5	106,0	128,1	31,2	8,8	-31,7	68,6	113,9	98,6	22,2	758,5
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	72,8	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-27,2	27,2	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	16,4	73,0	116,5	106,0	128,1	31,2	8,8	0,0	41,4	113,9	98,6	22,2	756,3
ETR (mm)	37,8	38,7	40,9	50,3	53,0	45,5	49,0	43,9	38,7	48,3	42,3	46,4	534,8
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5
Infiltración (mm)	8,2	36,5	58,3	53,0	64,1	15,6	4,4	0,0	20,7	56,9	49,3	11,1	378,1
Escorrentía (mm)	8,2	36,5	58,3	53,0	64,1	15,6	4,4	0,0	20,7	56,9	49,3	11,1	378,1

Tabla 137. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2019).

Balance hídrico de suelos 2020													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	6,2	5	6,7	9,2	6,1	6,2	5,7	6,5	5,10	6,20	6,5	8,2	6,47
PPT (mm)	45,3	53,7	68,1	90,6	103,2	121,6	104,1	126,8	156,2	136,5	139,0	50,2	1195,3
ETP (mm)	43,5	34,6	47,0	59,5	44,7	44,2	42,4	47,1	37,0	44,2	44,1	54,3	542,6
PPT útil (mm)	1,8	19,1	21,1	31,1	58,5	77,4	61,7	79,7	119,2	92,3	94,9	-4,1	652,7
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	96,0	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-4,0	
Excedente (mm)	1,8	16,9	21,1	31,1	58,5	77,4	61,7	79,7	119,2	92,3	94,9	0,0	654,6
ETR (mm)	43,5	34,6	47,0	59,5	44,7	44,2	42,4	47,1	37,0	44,2	44,1	54,2	542,5
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
Infiltración (mm)	0,9	8,5	10,6	15,6	29,3	38,7	30,9	39,9	59,6	46,2	47,5	0,0	327,3
Escorrentía (mm)	0,9	8,5	10,6	15,6	29,3	38,7	30,9	39,9	59,6	46,2	47,5	0,0	327,3

Tabla 138. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2020).

Balance hídrico de suelos 2021													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	6,1	4,7	5,9	6,3	7,1	6,15	6,6	6,1	5,60	6,10	7,5	6,9	6,25
PPT (mm)	38,1	189,8	247,5	110,4	209,3	202,5	90,6	223,6	114,7	140,8	150,0	60,8	1778,1
ETP (mm)	44,0	32,7	43,6	45,2	51,6	45,1	48,8	45,9	40,9	44,8	50,4	48,4	541,4
PPT útil (mm)	-5,9	157,1	203,9	65,2	157,7	157,4	41,8	177,7	73,8	96,0	99,6	12,4	1236,7
Almacén (mm)	90,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-5,5	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	147,6	203,9	65,2	157,7	157,4	41,8	177,7	73,8	96,0	99,6	12,4	1233,1
ETR (mm)	43,6	32,7	43,6	45,2	51,6	45,1	48,8	45,9	40,9	44,8	50,4	48,4	541,0
Déficit (mm)	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
Infiltración (mm)	0,0	73,8	102,0	32,6	78,9	78,7	20,9	88,9	36,9	48,0	49,8	6,2	616,5
Escorrentía (mm)	0,0	73,8	102,0	32,6	78,9	78,7	20,9	88,9	36,9	48,0	49,8	6,2	616,5

Tabla 139. Balance hídrico de suelos para la estación Las Brisas (2021).

Para la estación Las Brisas, el balance hídrico revela pocos momentos al año en los que se presentan valores negativos de PPT útil, principalmente durante los meses de diciembre y enero. Este primer periodo de sequía registra la cantidad más baja de precipitación del año, con un total de 56.1 mm en promedio para el mes de enero, y un valor de PPT útil negativa el cual tiene un efecto casi insignificante sobre el almacenamiento de agua del suelo. En contraste, el segundo período de sequía experimenta una disminución normal y típica en la cantidad de precipitación, pero generalmente no alcanza valores negativos de PPT útil, esto significa que, aunque la precipitación disminuye principalmente en los meses de julio y agosto, sigue siendo suficiente para satisfacer los procesos de evapotranspiración y, además, producir excedentes, a excepción del año 2019 en donde si se presentó déficit hídrico para el mes de agosto.

Por otro lado, el resto de los meses presentan valores positivos de PPT útil, destacando dos períodos de lluvia, el primero ocurre entre octubre y noviembre, y el segundo entre marzo y mayo. Durante estos meses, se producen las mayores precipitaciones al año en el sector, lo que permite que el suelo alcance su máximo nivel de almacenamiento y genere grandes excedentes de agua.

En general, a diferencia de las anteriores, la estación Las Brisas muestra un déficit hídrico anual promedio de 1.8 mm, la diferencia entre la ETP y la ETR es baja, esto implica que, para este sector, la disponibilidad de agua es abundante durante la mayor parte del año, y puede satisfacer adecuadamente con los procesos de evapotranspiración. Además, se presenta un excedente hídrico significativo de 913.1 mm, lo que supone una recarga efectiva para el reservorio geotérmico y el sistema hídrico superficial de la región.

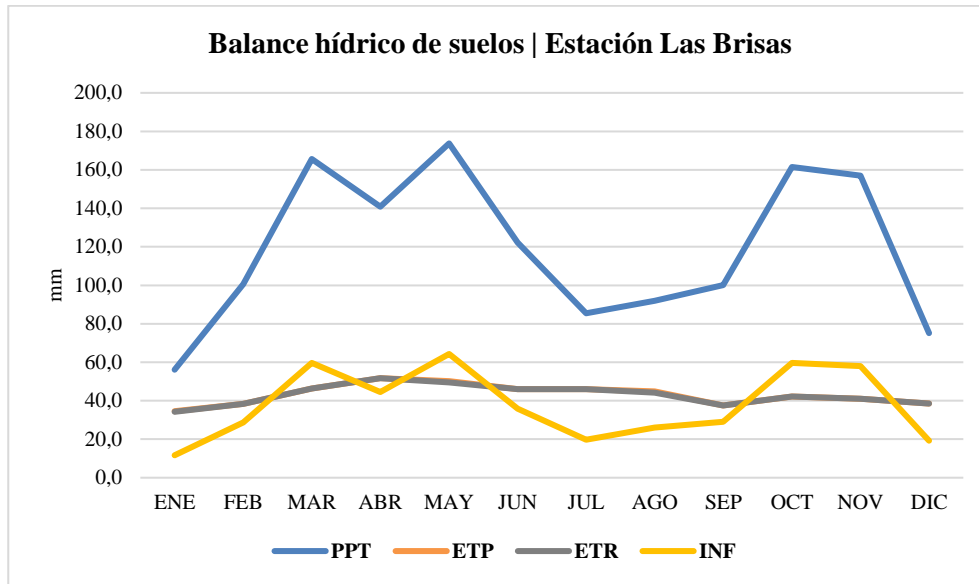


Fig. 80. Balance hídrico multianual para la estación Las Brisas (2016-2021).

10.5.6 Estación Q. Molinos-P.N.N.N.

Según IGAC (2005), en esta estación está la influencia de la nieve perpetua, los suelos cercanos a esta estación son de arena y ceniza volcánica, de textura gruesa a moderadamente gruesa de poco espesor.

Por su parte, la clasificación de la cobertura del suelo indica que se trata de un desierto periglacial que no cuenta con nieves perpetuas ni superficie glacial, que en tiempos pasados estuvo cubierto por una superficie glacial (Delgado, 2020; Román, 2021).

Balance hídrico de suelos 2016													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	5,38	5,62	6,00	5,38	5,57	5,22	4,90	4,98	4,85	5,00	5,20	5,28	5,70
PPT (mm)	20,8	63,2	20,4	74,0	60,0	41,8	52,4	11,4	59,8	118,6	157,8	75,0	755,2
ETP (mm)	44,7	42,0	49,2	44,8	47,8	44,5	43,6	44,1	41,2	43,2	42,6	44,1	534,8
PPT útil (mm)	-23,9	21,2	-28,8	29,2	12,2	-2,7	8,8	-32,7	18,6	75,4	115,2	30,9	220,4
Almacén (mm)	78,7	99,9	74,9	100	100	97,3	100	72,1	90,7	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-21,3	21,2	-25,0	25,1	0,0	-2,7	2,7	-27,9	18,6	9,3	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	4,1	12,2	0,0	6,1	0,0	0,0	66,1	115,2	30,9	234,7
ETR (mm)	42,1	42,0	45,4	44,8	47,8	44,5	43,6	39,3	41,2	43,2	42,6	44,1	520,5
Déficit (mm)	2,6	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	11,3
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	2,1	6,1	0,0	3,1	0,0	0,0	33,1	57,6	15,4	117,3
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	2,1	6,1	0,0	3,1	0,0	0,0	33,1	57,6	15,4	117,3

Tabla 140. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2016).

Balance hídrico de suelos 2017													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	5,00	5,30	4,90	5,40	5,50	5,40	5,20	5,00	5,10	5,20	5,10	5,20	5,19
PPT (mm)	74,4	75,5	73,5	114,2	152,2	98,4	26,6	40,4	60,0	96,6	145,2	88,4	1045,4
ETP (mm)	42,9	40,8	43,0	45,4	47,9	46,1	46,0	44,8	43,2	44,9	42,5	44,2	531,7
PPT útil (mm)	31,5	34,7	30,5	68,8	104,3	52,3	-19,4	-4,4	16,8	51,7	102,7	44,2	513,7
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	82,4	78,8	95,6	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-17,6	-3,5	16,8	4,4	0,0	0,0	
Excedente (mm)	31,5	34,7	30,5	68,8	104,3	52,3	0,0	0,0	0,0	47,3	102,7	44,2	516,3
ETR (mm)	42,9	40,8	43,0	45,4	47,9	46,1	44,2	43,9	43,2	44,9	42,5	44,2	529,1
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6
Infiltración (mm)	15,8	17,4	15,3	34,4	52,2	26,2	0,0	0,0	0,0	23,7	51,4	22,1	258,2
Escorrentía (mm)	15,8	17,4	15,3	34,4	52,2	26,2	0,0	0,0	0,0	23,7	51,4	22,1	258,2

Tabla 141. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2017).

Balance hídrico de suelos 2018													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	4,60	4,90	5,20	4,80	5,10	5,30	4,95	4,98	4,85	5,00	5,20	5,28	5,01
PPT (mm)	54,0	97,4	119,2	108,8	67,8	33,6	30,6	16,6	39,2	100,6	59,6	22,5	749,9
ETP (mm)	41,4	39,4	45,9	42,7	46,4	46,5	45,4	45,6	42,7	44,6	44,0	45,6	530,2
PPT útil (mm)	12,6	58,0	73,3	66,1	21,4	-12,9	-14,8	-29,0	-3,5	56,0	15,6	-23,1	219,7
Almacén (mm)	92	100	100	100	100	87,9	75,8	56,7	54,8	100	100	79	
Delta almacén (mm)	12,6	8,0	0,0	0,0	0,0	-12,1	-12,1	-19,1	-2,0	45,2	0,0	-20,6	
Excedente (mm)	0,0	50,0	73,3	66,1	21,4	0,0	0,0	0,0	0,0	10,8	15,6	0,0	237,1
ETR (mm)	41,4	39,4	45,9	42,7	46,4	45,7	42,7	35,7	41,2	44,6	44,0	43,1	512,8
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	2,7	9,9	1,5	0,0	0,0	2,5	17,4
Infiltración (mm)	0,0	25,0	36,7	33,1	10,7	0,0	0,0	0,0	0,0	5,4	7,8	0,0	118,6
Escorrentía (mm)	0,0	25,0	36,7	33,1	10,7	0,0	0,0	0,0	0,0	5,4	7,8	0,0	118,6

Tabla 142. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2018).

Balance hídrico de suelos 2019													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	5,45	5,40	5,30	5,20	5,20	5,30	4,60	4,70	4,90	5,00	5,20	5,60	5,15
PPT (mm)	24,7	66,0	146,2	145,8	139,4	40,2	17,2	24,1	38,2	65,3	73,6	33,3	814,0
ETP (mm)	45,8	41,5	45,7	44,4	46,2	45,7	42,4	43,0	42,2	43,9	43,3	46,7	530,8
PPT útil (mm)	-21,1	24,5	100,5	101,4	93,2	-5,5	-25,2	-18,9	-4,0	21,4	30,3	-13,4	283,2
Almacén (mm)	70,8	95,3	100	100	100	94,6	73,6	60,9	58,5	79,9	100	87,5	
Delta almacén (mm)	-17	24,5	4,7	0,0	0,0	-5,4	-21,1	-12,7	-2,4	21,4	20,1	-12,5	
Excedente (mm)	0,0	0,0	95,8	101,4	93,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,2	0,0	300,6
ETR (mm)	41,3	41,5	45,7	44,4	46,2	45,6	38,3	36,8	40,6	43,9	43,3	45,8	513,4
Déficit (mm)	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	4,1	6,2	1,6	0,0	0,0	0,9	17,4
Infiltración (mm)	0,0	0,0	47,9	50,7	46,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	150,3
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	47,9	50,7	46,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	150,3

Tabla 143. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2019).

Balance hídrico de suelos 2020													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	5,30	5,80	5,60	5,70	5,90	5,20	4,80	5,00	4,60	4,70	5,20	5,20	5,25
PPT (mm)	18,6	30,0	40,8	45,9	32,0	49,4	35,9	10,2	11,4	8,8	67,6	47,1	397,7
ETP (mm)	44,4	44,7	47,0	46,8	50,0	44,5	43,1	44,4	39,8	41,4	42,7	43,8	532,60
PPT útil (mm)	-25,8	-14,7	-6,2	-0,9	-18,0	4,9	-7,2	-34,2	-28,4	-32,6	24,9	3,3	-134,9
Almacén (mm)	67,6	58,3	55	54	45	50,3	46,8	33,2	25,0	18,1	43,0	46,3	
Delta almacén (mm)	-19,9	-9,2	-3,5	-0,5	-9,0	4,9	-3,5	-13,6	-8,2	-7,0	24,9	3,3	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ETR (mm)	38,5	39,2	44,3	46,4	41,0	44,5	39,4	23,8	19,6	15,8	42,7	43,8	438,9
Déficit (mm)	5,9	5,5	2,7	0,4	9,0	0,0	3,7	20,6	20,2	25,6	0,0	0,0	93,7
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 144. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2020).

Balance hídrico de suelos 2021													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	5,30	5,80	5,60	5,70	5,90	5,20	4,80	5,00	4,60	4,70	5,20	5,20	5,25
PPT (mm)	38,5	60,8	107,3	51,2	80,7	76,6	44,4	15,7	34,1	75,8	62,0	48,3	695,4
ETP (mm)	42,5	40,4	60,9	46,7	45,6	40,8	41,8	41,8	40,7	42,6	42,1	43,6	529,50
PPT útil (mm)	-4,0	20,4	46,4	4,5	35,1	35,8	2,6	-26,1	-6,6	33,2	19,9	4,7	165,9
Almacén (mm)	44,4	64,8	100	100	100	100	100	77,0	72,1	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-1,8	20,4	35,2	0,0	0,0	0,0	0,0	-23,0	-4,9	27,9	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	11,2	4,5	35,1	35,8	2,6	0,0	0,0	5,3	19,9	4,7	119,2
ETR (mm)	40,3	40,4	60,9	46,7	45,6	40,8	41,8	38,7	39,0	42,6	42,1	43,6	522,5
Déficit (mm)	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	1,7	0,0	0,0	0,0	7,0
Infiltración (mm)	0,0	0,0	5,6	2,3	17,6	17,9	1,3	0,0	0,0	2,7	10,0	2,4	59,6
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	5,6	2,3	17,6	17,9	1,3	0,0	0,0	2,7	10,0	2,4	59,6

Tabla 145. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2021).

Para la estación Q. Molinos-P.N.N.N., el balance hídrico muestra dos períodos que ambos períodos de sequía anuales presentan valores negativos de PPT útil. Durante el primer período de sequía, entre diciembre y enero, y, que en ocasiones puede verse extendido por más tiempo, como sucede en el año 2020, el almacenamiento de agua del suelo se ve afectado provocando déficit hídrico. En el segundo período de sequía, se registran valores negativos de PPT útil principalmente en los meses de julio, agosto y en ocasiones en los meses de junio y septiembre. Estos meses corresponden a los valores más bajos en cantidad de precipitación, alcanzando valores mínimos promedio de 19.7 mm durante el mes de agosto. Durante este período, la precipitación no es suficiente para satisfacer los procesos de evapotranspiración, lo que resulta en una pérdida de humedad en el suelo debido al gasto del agua presente en el almacén, produciendo un déficit hídrico acumulado de 24.9 mm a lo largo del año hidrológico, siendo esta la estación que registra el déficit más alto de todas las estaciones evaluadas.

Por otro lado, los demás meses presentan valores positivos de PPT útil divididos en dos períodos de lluvia. En el primero, se destacan los meses de octubre y noviembre, siendo este último el mes con el registro de precipitación más alto al año, alcanzando los 94.3 mm en promedio. En el segundo se destacan los meses de marzo a mayo. Durante estos meses, se producen las mayores

precipitaciones al año, lo que permite que el suelo alcance su máximo nivel de almacenamiento y genere excedentes de agua.

Por otro lado, la estación muestra un excedente hídrico promedio de 234.6 mm, distribuido en los dos períodos de lluvia, suponiendo una recarga efectiva para el reservorio geotérmico y el sistema hídrico superficial de la región entre los meses de octubre a diciembre y entre febrero y junio.

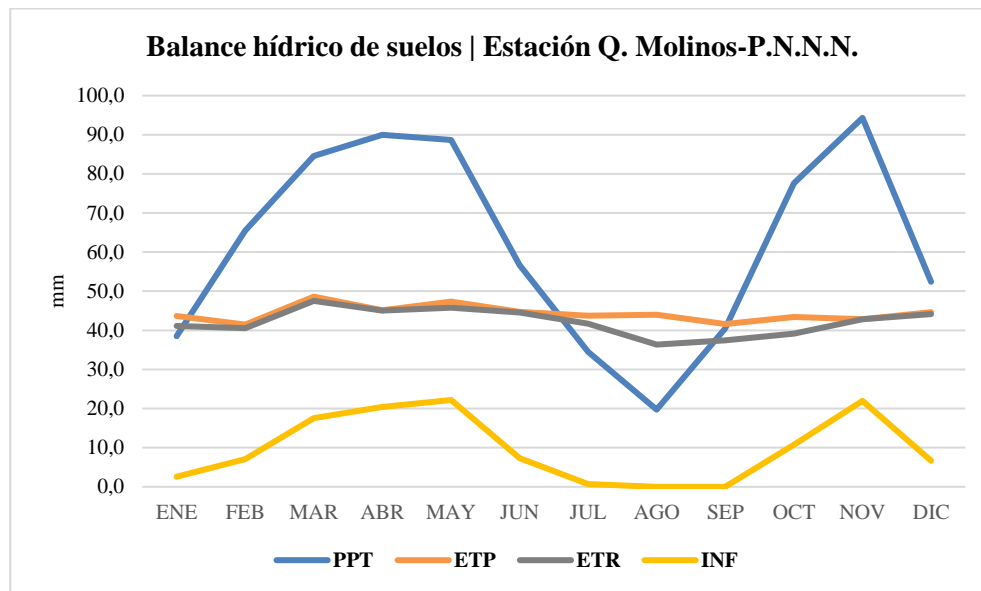


Fig. 81. Balance hídrico multianual para la estación Q. Molinos-P.N.N.N. (2016-2021).

10.5.7 Estación Q. Nereidas-P.N.N.N.

Para esta estación, IGAC (2005) describe los suelos que corresponden al área de influencia de esta estación como suelos de ceniza volcánica y arena muy superficiales de textura gruesa a moderadamente gruesa.

Balance hídrico de suelos 2016													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	6,90	6,60	6,60	6,00	5,40	4,90	4,70	5,10	4,90	4,90	4,80	4,60	5,45
PPT (mm)	19,0	46,8	32,2	95,6	29,0	32,6	163,8	30,6	59,4	83,2	117,8	209,6	919,6
ETP (mm)	52,4	47,8	51,6	47,4	45,7	41,5	41,3	43,8	10,5	41,5	39,3	39,0	501,8
PPT útil (mm)	-33,4	-1,0	-19,4	48,2	-16,7	-8,9	122,5	-13,2	48,9	41,7	78,5	170,6	417,8
Almacén (mm)	71,6	70,9	58	100	85	77	100	88	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-28,4	-0,7	-12,5	41,6	-15,4	-7,2	22,6	-12,4	12,4	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	6,6	0,0	0,0	99,9	0,0	36,5	42	78,5	170,6	433,8
ETR (mm)	47,4	47,5	44,7	47,4	44,4	39,8	41,3	43,0	10,5	41,5	39,3	39,0	485,8
Déficit (mm)	5,0	0,3	6,9	0,0	1,3	1,7	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	16,0
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	50,0	0,0	18,3	20,9	39,3	85,3	216,9
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	50,0	0,0	18,3	20,9	39,3	85,3	216,9

Tabla 146. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2016).

Balance hídrico de suelos 2017													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	4,40	4,30	4,40	5,40	5,50	5,20	4,80	5,00	5,10	5,00	4,70	4,90	4,89
PPT (mm)	42,4	41,8	153,8	88,6	146,2	86,8	38,8	165,2	64,4	73,8	117,6	84,8	1104,2
ETP (mm)	37,8	33,8	38,4	43,9	46,3	43,4	41,9	43,2	41,7	42,2	38,7	40,9	492,2
PPT útil (mm)	4,6	8,0	115,4	44,7	99,9	43,4	-3,1	122,0	22,7	31,6	78,9	43,9	612,0
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-3,1	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	4,6	8,0	115,4	44,7	99,9	43,4	0,0	118,9	22,7	32	78,9	43,9	612,0
ETR (mm)	37,8	33,8	38,4	43,9	46,3	43,4	41,9	43,2	41,7	42,2	38,7	40,9	492,2
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Infiltración (mm)	2,3	4,0	57,7	22,4	50,0	21,7	0,0	59,5	11,4	15,8	39,5	22,0	306,0
Escorrentía (mm)	2,3	4,0	57,7	22,4	50,0	21,7	0,0	59,5	11,4	15,8	39,5	22,0	306,0

Tabla 147. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2017).

Balance hídrico de suelos 2018													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	4,60	4,20	5,20	4,60	5,00	4,80	4,80	4,70	5,20	4,70	4,90	5,20	4,83
PPT (mm)	38,0	78,2	84,6	90,8	122,4	95,6	30,4	32,2	30,2	14,4	54,9	18,6	690,3
ETP (mm)	39,0	33,3	43,4	39,0	43,2	40,9	41,9	41,3	42,3	40,3	39,9	42,7	487,2
PPT útil (mm)	-1,0	44,9	41,2	51,8	79,2	54,7	-11,5	-9,1	-12,1	-25,9	15,0	-24,1	203,1
Almacén (mm)	99,0	100,0	100	100	100	100	89,1	81,4	72	55,7	70,7	55,5	
Delta almacén (mm)	-1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-10,9	-7,8	-9,3	-16,5	15,0	-15,1	
Excedente (mm)	0,0	43,9	41,2	51,8	79,2	30,1	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	246,2
ETR (mm)	39,0	33,3	43,4	39,0	43,2	40,9	41,3	40,0	39,5	30,9	39,9	33,7	464,0
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	1,3	2,8	9,4	0,0	9,0	23,2
Infiltración (mm)	0,0	22,0	20,6	25,9	39,6	15,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	123,1
Escorrentía (mm)	0,0	22,0	20,6	25,9	39,6	15,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	123,1

Tabla 148. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2018).

Balance hídrico de suelos 2019													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	5,20	5,70	4,32	5,60	6,00	5,40	4,80	5,00	5,30	4,80	4,90	5,50	5,21
PPT (mm)	20,7	48,2	86,7	80,7	79,2	42,6	39,0	25,1	54,0	85,0	81,0	42,6	684,8
ETP (mm)	42,7	41,5	37,9	45,0	49,3	44,6	41,9	43,2	42,9	40,9	39,9	44,4	514,2
PPT útil (mm)	-22,0	6,7	48,8	35,7	29,9	-2,0	-2,9	-18,1	11,1	44,1	41,1	-1,8	170,6
Almacén (mm)	44,6	51,3	100	100	100	98,0	95,2	79,5	90,6	100	100	98,2	
Delta almacén (mm)	-11,0	6,7	48,7	0,0	0,0	-2,0	-2,8	-15,8	11,1	9,4	0,0	-1,8	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,1	35,7	29,9	0,0	0,0	0,0	0,0	35	41,1	0,0	141,4
ETR (mm)	31,7	41,5	37,9	45,0	49,3	44,6	41,8	40,9	42,9	40,9	39,9	44,4	500,7
Déficit (mm)	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	13,5
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	17,9	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,3	20,6	0,0	70,7
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	17,9	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17,3	20,6	0,0	70,7

Tabla 149. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2019).

Balance hídrico de suelos 2020													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	5,60	6,20	5,40	5,90	6,20	5,30	5,00	5,10	4,80	5,10	4,83	5,05	5,37
PPT (mm)	34,2	36,2	43,2	62,4	73,8	117,8	86,2	114,6	78,2	76,6	62,6	73,7	859,5
ETP (mm)	45,0	45,7	44,6	46,8	50,5	44,0	43,2	43,8	39,9	42,8	39,5	41,8	527,6
PPT útil (mm)	-10,8	-9,5	-1,4	15,6	23,3	73,8	43,0	70,8	38,3	33,8	23,1	31,9	331,9
Almacén (mm)	88,2	80,2	79,1	94,7	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-10,1	-8,0	-1,1	15,6	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	73,8	43,0	70,8	38,3	34	23,1	31,9	332,7
ETR (mm)	44,3	44,2	44,3	46,8	50,5	44,0	43,2	43,8	39,9	42,8	39,5	41,8	525,1
Déficit (mm)	0,7	1,5	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	36,9	21,5	35,4	19,2	16,9	11,6	16,0	166,3
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	36,9	21,5	35,4	19,2	16,9	11,6	16,0	166,3

Tabla 150. Balance hídrico de suelos para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2020).

En la estación Q. Nereidas-P.N.N.N., el balance hídrico revela que en ambos períodos de sequía anuales se presentan valores negativos de PPT útil. Durante este primer periodo de sequía, entre diciembre y enero, se registra la cantidad más baja de precipitación del año, con un total de 30.9 mm en promedio para el mes de enero. El segundo período de sequía muestra una disminución normal y típica en la cantidad de precipitación entre junio y agosto, alcanzando valores negativos de PPT útil que afectan el almacenamiento de agua en el suelo. Los efectos acumulativos del gasto de la humedad del suelo se evidencian en estos periodos, pero posteriormente, con el periodo de lluvias subsiguiente, el suelo vuelve a alcanzar su capacidad de campo.

Los meses restantes presentan valores positivos de PPT útil. Principalmente en noviembre se registra el primer período de lluvias, y el segundo entre marzo y mayo, siendo mayo el mes con la precipitación más alta del año, de 90.1 mm en promedio. Durante estos meses el suelo alcance su máximo nivel de almacenamiento y genera grandes excedentes de agua.

En general, la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. registra un déficit hídrico ya que la diferencia entre la ETP y la ETR es de 11.1 mm en promedio anualmente. Sin embargo, en los meses con mayor cantidad de lluvias al año, el suelo puede alcanzar su capacidad de campo presentando una disponibilidad de agua abundante. Además, se presenta un excedente de agua de 353.2 mm,

suponiendo una recarga efectiva para el reservorio geotérmico y el sistema hídrico superficial de la región en los meses de octubre a diciembre y de marzo a septiembre.

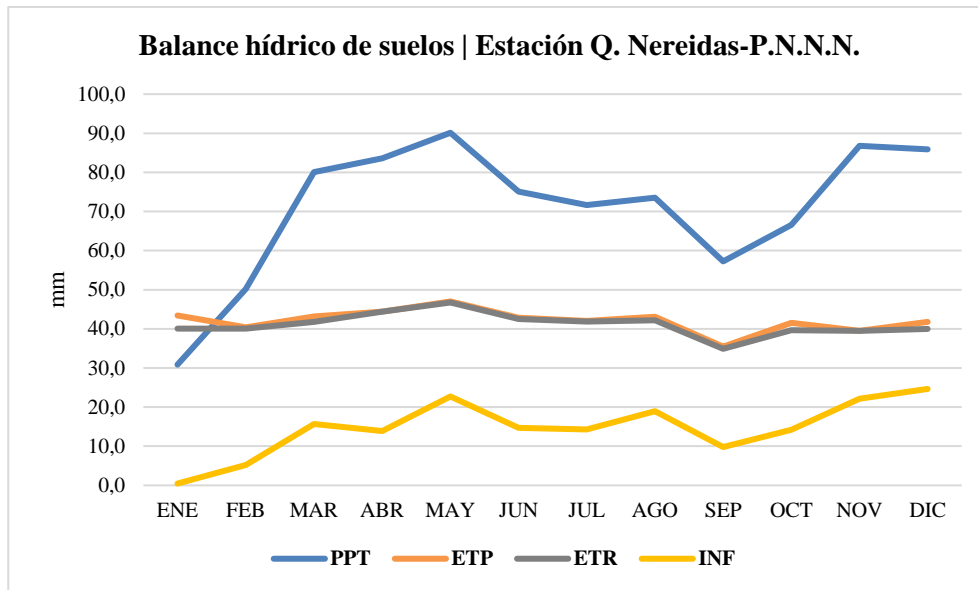


Fig. 82. Balance hídrico multianual para la estación Q. Nereidas-P.N.N.N. (2016-2020)

10.5.8 Estación Río Claro-P.N.N.N.

Esta estación, según IGAC (2005), se encuentra cerca de las nieves perpetuas del Volcán Nevado de Santa Isabel, los suelos de su alrededor son de arena y ceniza de poco espesor y de textura gruesa.

Balance hídrico de suelos 2016													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	3,10	4,20	4,50	4,10	4,30	3,70	3,40	4,00	3,70	3,70	3,60	3,50	3,82
PPT (mm)	16,6	73,1	70,2	192,6	170,6	151,2	233,0	64,2	152,0	118,4	156,8	64,0	1462,7
ETP (mm)	38,2	43,7	49,2	45,6	49,0	43,5	42,2	46,8	42,4	43,5	41,0	41,3	526,4
PPT útil (mm)	-21,6	29,4	21,0	147,0	121,6	107,7	190,8	17,4	109,6	74,9	115,8	22,7	936,3
Almacén (mm)	80,6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-19,4	19,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	10,0	21,0	147,0	121,6	107,7	190,8	17,4	109,6	74,9	115,8	22,7	938,5
ETR (mm)	36,0	43,7	49,2	45,6	49,0	43,5	42,2	46,8	42,4	43,5	41,0	41,3	524,2
Déficit (mm)	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2
Infiltración (mm)	0,0	5,0	10,5	73,5	60,8	53,9	95,4	8,7	54,8	37,5	57,9	11,4	469,2
Escorrentía (mm)	0,0	5,0	10,5	73,5	60,8	53,9	95,4	8,7	54,8	37,5	57,9	11,4	469,2

Tabla 151. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2016).

Balance hídrico de suelos 2017													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	3,10	2,80	3,30	4,10	4,00	4,00	3,60	3,70	3,90	3,60	3,40	3,50	3,58
PPT (mm)	57,6	193,4	177,0	145,8	170,4	168,8	153,8	125,0	108,6	102,6	114,2	69,2	1586,4
ETP (mm)	39,7	33,9	41,9	47,2	50,7	47,3	45,4	46,1	45,4	44,3	41,0	42,8	525,7
PPT útil (mm)	17,9	159,5	135,1	98,6	119,7	121,5	108,4	78,9	63,2	58,3	73,2	26,4	1060,7
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	17,9	159,5	135,1	98,6	119,7	121,5	108,4	78,9	63,2	58,3	73,2	26,4	1060,7
ETR (mm)	39,7	33,9	41,9	47,2	50,7	47,3	45,4	46,1	45,4	44,3	41,0	42,8	525,7
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Infiltración (mm)	9,0	79,8	67,6	49,3	59,9	60,8	54,2	39,5	31,6	29,2	36,6	13,2	530,4
Escorrentía (mm)	9,0	79,8	67,6	49,3	59,9	60,8	54,2	39,5	31,6	29,2	36,6	13,2	530,4

Tabla 152. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2017).

Balance hídrico de suelos 2018													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	3,20	2,70	3,80	3,30	3,80	3,50	3,40	3,40	3,90	3,30	3,60	3,50	3,45
PPT (mm)	50,0	72,8	117,2	150,4	197,4	217,6	210,6	116,2	77,2	136,8	108,4	26,4	1481,0
ETP (mm)	41,7	34,2	47,1	42,5	48,3	44,8	45,1	45,1	46,7	43,2	43,7	44,1	526,5
PPT útil (mm)	8,3	38,6	70,1	107,9	149,1	172,8	165,5	71,1	30,5	93,6	64,7	-17,7	954,5
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	83,8	
Delta almacén (mm)	16,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-16,2	
Excedente (mm)	8,3	38,6	70,1	107,9	149,1	172,8	165,5	71,1	30,5	93,6	64,7	0,0	972,2
ETR (mm)	41,7	34,2	47,1	42,5	48,3	44,8	45,1	45,1	46,7	43,2	43,7	42,6	525,0
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	1,5
Infiltración (mm)	4,2	19,3	35,1	54,0	74,6	86,4	82,8	35,6	15,3	46,8	32,4	0,0	486,1
Escorrentía (mm)	4,2	19,3	35,1	54,0	74,6	86,4	82,8	35,6	15,3	46,8	32,4	0,0	486,1

Tabla 153. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2018).

Balance hídrico de suelos 2019													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	3,60	4,20	4,20	4,10	4,40	4,00	3,40	3,60	3,80	3,40	3,30	4,00	3,83
PPT (mm)	41,2	101,8	234,6	161,0	149,2	146,6	152,4	30,0	109,6	162,6	111,8	64,4	1465,2
ETP (mm)	41,9	42,1	47,0	45,5	49,6	45,5	42,1	43,7	43,0	41,1	38,7	44,8	525,0
PPT útil (mm)	-0,7	59,7	187,6	115,5	99,6	101,1	110,3	-13,7	66,6	121,5	73,1	19,6	940,2
Almacén (mm)	83,2	100	100	100	100	100	100	87,2	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-0,6	16,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-12,8	12,8	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	42,9	187,6	115,5	99,6	101,1	110,3	0,0	53,8	121,5	73,1	19,6	925,0
ETR (mm)	41,8	42,1	47,0	45,5	49,6	45,5	42,1	42,8	43,0	41,1	38,7	44,8	524,0
Déficit (mm)	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Infiltración (mm)	0,0	21,4	93,8	57,8	49,8	50,6	55,2	0,0	26,9	60,8	36,6	9,8	462,5
Escorrentía (mm)	0,0	21,4	93,8	57,8	49,8	50,6	55,2	0,0	26,9	60,8	36,6	9,8	462,5

Tabla 154. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2019).

Balance hídrico de suelos 2020													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	3,70	4,50	4,00	4,60	4,80	3,90	3,70	3,90	3,50	3,60	3,00	3,63	3,90
PPT (mm)	41,6	46,0	45,0	75,4	111,2	168,2	176,0	147,8	153,8	103,0	52,2	61,7	1181,9
ETP (mm)	42,1	45,0	45,0	48,4	51,8	44,3	43,9	45,4	40,3	42,1	35,9	41,6	525,8
PPT útil (mm)	-0,5	1,0	0,0	27,0	59,4	123,9	132,1	102,4	113,5	60,9	16,3	20,1	656,1
Almacén (mm)	99,5	100	100	100	100	100	100,0	100,0	100,0	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-0,5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,5	0,0	27,0	59,4	123,9	132,1	102,4	113,5	60,9	16,3	20,1	656,1
ETR (mm)	42,1	45,0	45,0	48,4	51,8	44,3	43,9	45,4	40,3	42,1	35,9	41,6	525,8
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Infiltración (mm)	0,0	0,3	0,0	13,5	29,7	62,0	66,1	51,2	56,8	30,5	8,2	10,1	328,1
Escorrentía (mm)	0,0	0,3	0,0	13,5	29,7	62,0	66,1	51,2	56,8	30,5	8,2	10,1	328,1

Tabla 155. Balance hídrico de suelos para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2020).

El balance hídrico para la estación Río Claro-P.N.N.N. muestra que en ambos períodos de menor precipitación al año se presentan valores negativos de PPT útil. El primer período corresponde a los meses de diciembre y enero con las precipitaciones más bajas en el año con cantidades promedio de 57.1 mm y 41.4 mm respectivamente, mientras el segundo se presenta en el mes de agosto. En dichos meses la evapotranspiración es superior a la precipitación, haciendo que la estación experimente déficit hídrico.

Por el contrario, los demás meses presentan valores positivos de PPT útil, indicando que en gran parte del año hay disponibilidad de humedad en el suelo, el cual se mantiene en su máxima capacidad de campo, generando excedentes hídricos constantes de 910.5 mm al año que representan una recarga efectiva y continua para el reservorio geotérmico y el sistema hídrico superficial de la región durante todo el año, pero especialmente durante los períodos de lluvia de septiembre a noviembre y de marzo a junio.

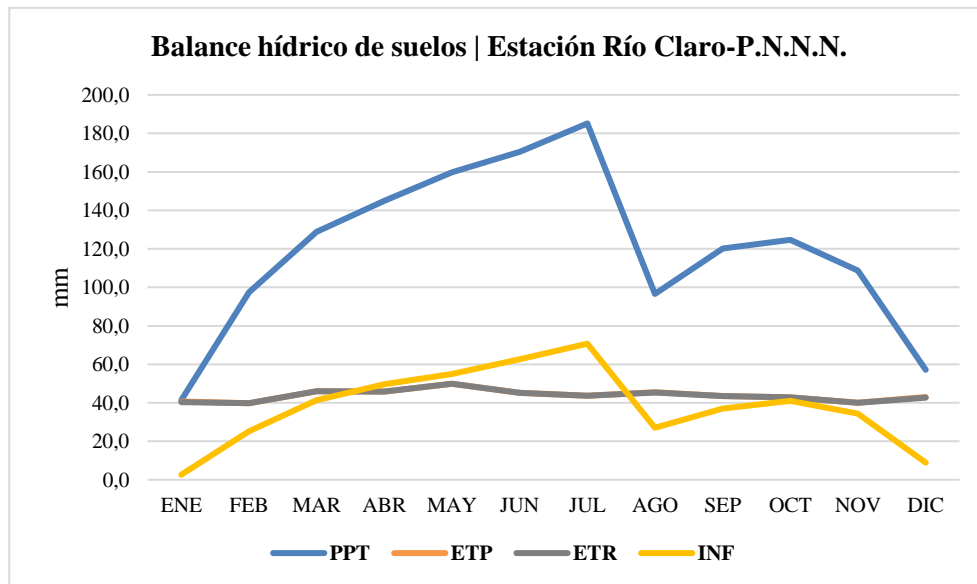


Fig. 83. Balance hídrico multianual para la estación Río Claro-P.N.N.N. (2016-2020).

10.5.9 Estación Santa Isabel-P.N.N.N.

Esta estación está sobre suelos de arena y ceniza volcánica de textura gruesa a moderadamente gruesa de poco espesor, con influencia de la cobertura glaciár del Volcán Nevado de Santa Isabel según IGAC (2005).

Balance hídrico de suelos 2016													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	1,90	1,90	2,10	1,90	1,50	0,20	-0,20	-0,10	-0,10	0,90	1,00	0,50	0,96
PPT (mm)	16,6	45,2	56,0	103,2	144,6	82,0	85,5	76,4	117,0	107,0	92,8	41,0	967,3
ETP (mm)	64,3	60,6	68,8	64,3	59,3	20,5	0,0	0,0	0,0	44,4	45,0	32,3	459,5
PPT útil (mm)	-47,7	-15,4	-12,8	38,9	85,3	61,5	85,5	76,4	117,0	62,6	47,8	8,7	507,8
Almacén (mm)	62,1	53,2	46,8	85,7	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-37,9	-8,9	-6,4	38,9	14,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	71,0	61,5	85,5	76,4	117,0	62,6	47,8	8,7	530,5
ETR (mm)	54,5	54,1	62,4	64,3	59,3	20,5	0,0	0,0	0,0	44,4	45,0	32,3	436,8
Déficit (mm)	9,8	6,5	6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,7
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	35,5	30,8	42,8	38,2	58,5	31,3	23,9	4,4	265,3
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	35,5	30,8	42,8	38,2	58,5	31,3	23,9	4,4	265,3

Tabla 156. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2016).

Balance hídrico de suelos 2017													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	0,30	-0,20	0,90	1,00	1,10	0,70	0,00	-0,10	0,30	0,60	1,00	0,60	0,52
PPT (mm)	63,6	21,6	72,3	185,8	94,0	73,0	71,5	269,2	151,6	188,4	129,8	93,2	1414,0
ETP (mm)	39,5	0,0	69,7	72,3	79,0	61,5	0,0	0,0	39,2	56,9	70,5	56,0	544,6
PPT útil (mm)	24,1	21,6	2,6	113,5	15,0	11,5	71,5	269,2	112,4	131,5	59,3	37,2	869,4
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	24,1	21,6	2,6	113,5	15,0	11,5	71,5	269,2	112,4	131,5	59,3	37,2	869,4
ETR (mm)	39,5	0,0	69,7	72,3	79,0	61,5	0,0	0,0	39,2	56,9	70,5	56,0	544,6
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Infiltración (mm)	12,1	10,8	1,3	56,8	7,5	5,8	35,8	134,6	56,2	65,8	29,7	18,6	434,7
Escorrentía (mm)	12,1	10,8	1,3	56,8	7,5	5,8	35,8	134,6	56,2	65,8	29,7	18,6	434,7

Tabla 157. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2017).

Balance hídrico de suelos 2018													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	0,30	0,90	0,80	0,80	1,00	0,50	0,00	-0,40	0,40	1,30	1,50	0,80	0,66
PPT (mm)	65,2	84,8	88,6	99,5	83,8	65,1	78,5	193,1	396,0	264,2	102,7	34,2	1555,7
ETP (mm)	33,7	53,5	56,3	55,4	64,6	44,4	0,0	0,0	38,7	71,9	74,2	55,3	548,0
PPT útil (mm)	31,5	31,3	32,3	44,1	19,2	20,7	78,5	193,1	357,3	192,3	28,5	-21,1	1007,7
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	81	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-19,0	
Excedente (mm)	31,5	31,3	32,3	44,1	19,2	20,7	78,5	193,1	357,3	192,3	28,5	0,0	1028,8
ETR (mm)	33,7	53,5	56,3	55,4	64,6	44,4	0,0	0,0	38,7	71,9	74,2	53,2	545,9
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	2,1
Infiltración (mm)	15,8	15,7	16,2	22,1	9,6	10,3	39,3	96,6	178,7	96,2	14,3	0,0	514,4
Escorrentía (mm)	15,8	15,7	16,2	22,1	9,6	10,3	39,3	96,6	178,7	96,2	14,3	0,0	514,4

Tabla 158. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2018).

Balance hídrico de suelos 2019													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	0,90	1,70	2,00	1,90	1,50	0,90	0,10	0,00	0,60	0,60	1,50	1,30	1,08
PPT (mm)	37,8	50,5	72,3	129,5	53,4	40,2	54,8	29,5	56,8	86,9	76,8	42,4	730,9
ETP (mm)	43,1	54,6	66,3	63,5	58,5	43,9	14,4	0,0	34,7	35,6	54,8	52,2	521,6
PPT útil (mm)	-5,3	-4,1	6,0	66,0	-5,1	-3,7	40,4	29,5	22,1	51,3	22,0	-9,8	209,3
Almacén (mm)	76,8	73,7	79,7	100	95,0	91,6	100	100	100	100	100	90,7	
Delta almacén (mm)	-4,2	-3,1	6,0	20,3	-5,0	-3,5	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0	-9,3	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	45,7	0,0	0,0	32,0	29,5	22,1	51,3	22,0	0,0	202,6
ETR (mm)	42,0	53,6	66,3	63,5	58,4	43,7	14,4	0,0	34,7	35,6	54,8	51,7	518,6
Déficit (mm)	1,1	1,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	3,0
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	22,9	0,0	0,0	16,0	14,8	11,1	25,7	11,0	0,0	101,3
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	22,9	0,0	0,0	16,0	14,8	11,1	25,7	11,0	0,0	101,3

Tabla 159. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2019).

Balance hídrico de suelos 2020													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	0,90	1,30	1,50	1,40	1,40	0,70	0,20	0,04	0,10	0,60	0,90	0,40	0,79
PPT (mm)	30,3	31,9	43,6	53,5	56,3	91,5	74,7	91,7	78,5	76,9	69,0	57,7	755,6
ETP (mm)	53,7	61,0	70,7	67,2	70,0	48,0	26,1	11,5	17,5	44,4	52,4	35,6	558,1
PPT útil (mm)	-23,4	-29,1	-27,1	-13,7	-13,7	43,5	48,6	80,2	61,0	32,5	16,6	22,1	197,5
Almacén (mm)	71,7	53,6	40,9	35,7	31,1	74,6	100	100	100	100	100	100	
Delta almacén (mm)	-18,9	-18,1	-12,7	-5,2	-4,6	43,5	25,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Excedente (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,2	80,2	61,0	32,5	16,6	22,1	235,6
ETR (mm)	49,2	50,0	56,3	58,7	60,9	48,0	26,1	11,5	17,5	44,4	52,4	35,6	510,7
Déficit (mm)	4,5	11,0	14,4	8,5	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47,4
Infiltración (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,6	40,1	30,5	16,3	8,3	11,1	117,8
Escorrentía (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,6	40,1	30,5	16,3	8,3	11,1	117,8

Tabla 160. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2020).

Balance hídrico de suelos 2021													
Factor	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Hidr.
T (°C)	-0,20	0,70	0,30	1,00	0,80	0,30	0,10	0,80	0,26	0,40	0,70	1,20	0,53
PPT (mm)	18,2	139,2	175,3	72,5	109,5	80,1	37,2	78,3	11,3	20,2	85,6	28,8	856,2
ETP (mm)	0,0	35,0	25,2	46,2	42,9	25,2	14,7	42,9	22,9	29,2	37,5	50,7	372,4
PPT útil (mm)	18,2	104,2	150,1	26,3	66,6	54,9	22,5	35,4	-11,6	-9,0	48,1	-21,9	483,8
Almacén (mm)	100	100	100	100	100	100	100	100	89,0	81,4	100	80,3	
Delta almacén (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-11,0	-7,7	18,6	-19,7	
Excedente (mm)	18,2	104,2	150,1	26,3	66,6	54,9	22,5	35,4	0,0	0,0	29,5	0,0	507,7
ETR (mm)	0,0	35,0	25,2	46,2	42,9	25,2	14,7	42,9	22,3	27,9	37,5	48,5	368,2
Déficit (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	1,3	0,0	2,2	4,2
Infiltración (mm)	9,1	52,1	75,1	13,2	33,3	27,5	11,3	17,7	0,0	0,0	14,7	0,0	253,8
Escorrentía (mm)	9,1	52,1	75,1	13,2	33,3	27,5	11,3	17,7	0,0	0,0	14,7	0,0	253,8

Tabla 161. Balance hídrico de suelos para la estación Santa Isabel-P.N.N.N. (2021).

Para la estación Santa Isabel-P.N.N.N., el balance hídrico revela que en ambos períodos de sequía anuales presenta valores negativos de PPT útil. Durante este primer periodo de sequía, que abarca diciembre y enero, se registran las cantidades más bajas de precipitación del año, con 49.6 mm y 38.6 mm, en promedio, respectivamente. Estos valores se corresponden con una PPT útil negativa, afectando no solo el almacenamiento de humedad en el suelo durante dichos meses, y

llegando a extenderse hasta los meses de marzo en 2016 y mayo en 2020. En contraste, el segundo período de sequía muestra una disminución normal en la cantidad de precipitación principalmente en junio y julio, pero no alcanza valores negativos de PPT útil, a excepción del año 2019 en donde junio presenta valores de PPT útil negativa.

Los meses restantes presentan valores positivos de PPT útil. Entre agosto y octubre se registran los valores de precipitación más altos del año, siendo septiembre el mes más lluvioso con 135 mm en promedio. Entre marzo y mayo se presenta un segundo período de lluvias con valores menores que el primer período. Durante estos meses el suelo alcanza su máximo nivel de almacenamiento y genera grandes excedentes de agua.

En general, la estación Santa Isabel-P.N.N.N. muestra un déficit hídrico anual promedio de 13.2 mm. En los demás meses del año, el suelo puede alcanzar su capacidad máxima de almacenamiento presentando una disponibilidad de agua abundante. Además, se presenta un excedente hídrico de 562.4 mm, lo que supone una recarga efectiva para el reservorio geotérmico y el sistema hídrico superficial de la región.

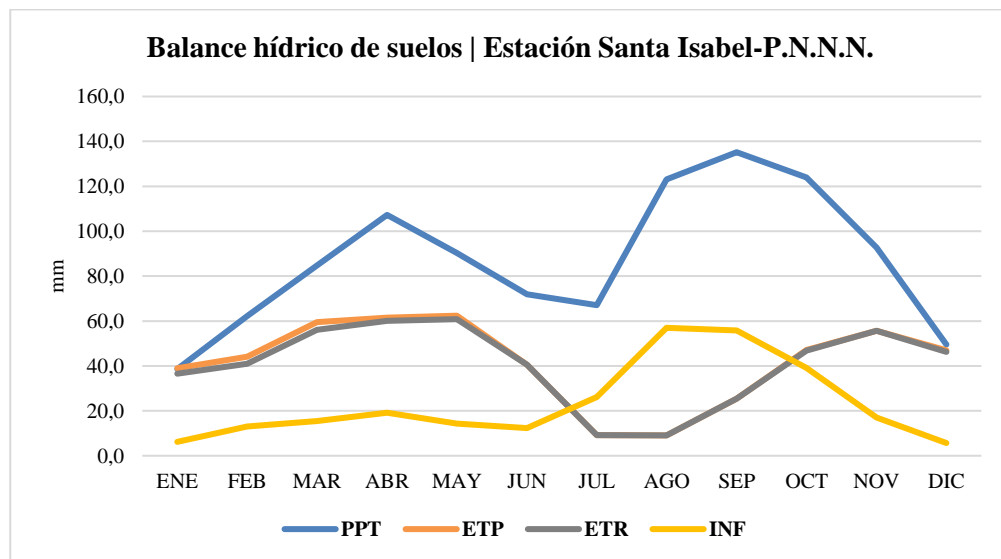


Fig. 84. Balance hídrico multianual para la estación Q. Santa Isabel-P.N.N.N. (2016-2021).

10.5.10 Resumen del balance hídrico

En resumen, en el balance hídrico de la subcuenca de Río Claro durante los años 2016-2021 (Tabla 162 y 163), muestra que el año hidrológico generalmente comienza entre octubre y noviembre y finaliza en septiembre, a excepción de las estaciones de Río Claro-P.N.N.N. y Santa Isabel-P.N.N.N., que presentan diferencias de uno o dos meses en el comienzo del año hidrológico debido a variaciones locales de los parámetros calculados en la cuenca. En la mayor parte del año y en la mayoría de las estaciones de la cuenca, se registra una disponibilidad de agua abundante. Los períodos de déficit hídrico se presentan principalmente en enero y entre julio, agosto y septiembre, en donde se genera un déficit hídrico de 90.9 mm al año.

Por otro lado, en la cuenca se generó un excedente hídrico promedio de al menos 605.27 mm. De esa cantidad, según la metodología de Thornthwaite, un promedio de 302.63 mm ingresa a la circulación superficial a subsuperficial o escorrentía hasta llegar a los principales drenajes funcionando como un mecanismo de recargando del sistema hídrico de la región. La misma cantidad, dependiendo de las propiedades del suelo, se infiltra y funciona como recarga del sistema hídrico subterráneo, incluyendo acuíferos o el mismo sistema geotérmico en estudio.

Como menciona Román (2021), “Es imperativo recordar que estos datos nacen del cálculo del balance hídrico suponiendo una capacidad de almacenamiento en el suelo de 100 mm según el método utilizado, por lo que se propone hacer estudios detallados de suelo en la subcuenca para conocer sus características físicas y agrológicas para conocer la permeabilidad de los suelos y que den a este tipo de estudios, mayor alcance para determinar la dinámica de precipitación que ocurre dentro de la subcuenca”.

Estación	ETP 6 años (mm)	ETR 6 años (mm)	Excedente 6 años (mm)	Déficit 6 años (mm)	Infiltración 6 años (mm)	Escorrentía 6 años (mm)
Q. Nereidas-CHEC	3967,7	3866,3	1622,29	101,4	811,15	811,15
Pirineos-CHEC	3507,6	3486,9	3232,01	20,6	1616,01	1616,01
Las Brisas	3105,1	3094,1	5478,34	11,0	2739,17	2739,17
Q. Molinos-P.N.N.N.	3189,6	3037,1	1407,89	149,5	703,95	703,95
Q. Nereidas-P.N.N.N.	2523,0	2467,6	1766,16	55,4	883,08	883,08
Río Claro-La Batea	4219,0	4148,5	4203,88	70,5	2101,94	2101,94
Río Claro-La Guayana	4723,7	4696,7	4942,18	27,0	2471,09	2471,09
Río Claro-P.N.N.N.	2629,4	2624,7	4552,47	4,7	2276,23	2276,23
Santa Isabel-P.N.N.N.	3004,2	2924,8	3374,60	79,4	1687,30	1687,30
Total	30869,3	30346,8	30579,82	519,5	15289,91	15289,91

Tabla 162. Resumen del balance hídrico de suelos de la subcuenca Río Claro (2016-2021).

Estación	ETP prom (mm)	ETR prom (mm)	Excedente prom (mm)	Déficit prom (mm)	Infiltración prom (mm)	Escorrentía prom (mm)
Q. Nereidas-CHEC	661,3	644,4	270,4	16,9	135,2	135,2
Pirineos-CHEC	584,6	581,2	538,7	3,4	269,3	269,3
Las Brisas	517,5	515,7	913,1	1,8	456,5	456,5
Q. Molinos-P.N.N.N.	531,6	506,2	234,6	24,9	117,3	117,3
Q. Nereidas-P.N.N.N.	504,6	493,5	353,2	11,1	176,6	176,6
Río Claro-La Batea	843,8	829,7	840,8	14,1	420,4	420,4
Río Claro-La Guayana	787,3	782,8	823,7	4,5	411,8	411,8
Río Claro-P.N.N.N.	525,9	524,9	910,5	0,9	455,2	455,2
Santa Isabel-P.N.N.N.	500,7	487,5	562,4	13,2	281,2	281,2
Total	5457,3	5365,8	5447,39	90,9	2723,69	2723,69
Promedio	606,4	596,2	605,27	10,1	302,63	302,63

Tabla 163. Resumen promedio del balance hídrico de suelos de la subcuenca Río Claro.

10.5.11 Zona de recarga y cálculo de caudal de recarga del sistema geotérmico

El sistema geotérmico se recarga principalmente en las zonas altas, por encima de la altura de La Quinta, posiblemente cerca del volcán, donde las aguas meteóricas circulan en profundidad hasta alcanzar el reservorio, según lo destacado por Hincapié (2014).

LaGeo (2016) señala que la parte alta del complejo volcánico Nevado del Ruiz, a una elevación superior a los 4500 m.s.n.m., presenta características que favorecen la permeabilidad,

como la presencia de cráteres, la chimenea volcánica del Nevado del Ruiz y las fallas asociadas a la cadena volcánica (Falla Palestina), lo que facilita el sistema de recarga del sistema geotérmico, esto de acuerdo a los resultados obtenidos mediante la línea de regresión entre el oxígeno 18 y la altura a la que se encuentran las fuentes termales

Por otro lado, Dewhurst Group (2013, 2016) menciona que el área del proyecto se encuentra en una región de basamento/acuífero con baja capacidad para circular o retener agua, debido a la falta de porosidad y permeabilidad primaria de las rocas. Por su parte, Taborda Ortiz (2019), reporta que las muestras analizadas de núcleo del pozo Nereidas-1 pertenecen a una matriz de baja permeabilidad, específicamente rocas metamórficas, con valores de permeabilidad en el rango de 0.5 a 2 mD, lo cual se asocia a formaciones de baja permeabilidad.

A pesar de estas características, Dewhurst Group (2013, 2016), menciona que es posible que existan condiciones de permeabilidad secundaria debido a la dinámica tectónica en la zona lo que podría influir en el flujo de agua en el sistema geotérmico. Dewhurst Group también destaca que “la recarga del sistema termal del Nevado del Ruiz se produce en los tramos superiores de la zona donde escasea la vegetación, cae agua de lluvia sobre los picos nevados y se infiltra directamente a través de las fallas, fisuras o grietas, mientras que en áreas de altas pendientes la infiltración es menor y favorece la escorrentía superficial”.

En relación con las aguas infiltradas que equivalen a un promedio de 292.28 mm por cada estación, determinadas a través del balance hídrico, representan un valor general de recarga que abarca tanto el sistema geotérmico como los posibles acuíferos presentes a lo largo de toda la subcuenca. No obstante, se plantea la necesidad de estimar un caudal de recarga específico para el reservorio. Es por esto que se considera una altura de 3800 m.s.n.m., basándose en lo mencionado en párrafos anteriores y en el estudio realizado por Román (2021) quien señala que es la altura

correspondiente a la zona de recarga más activa caracterizada por suelos arenosos en zona de páramo, promoviendo una mayor infiltración, mientras que altitudes más bajas corresponden a suelos más compactos, lo que probablemente resulta en una tasa de infiltración menor.

El área que abarca la zona de recarga del sistema geotérmico dentro de la subcuenca de Río Claro, tomada desde los 3800 m.s.n.m. hasta el límite superior de la cuenca que corresponde al Nevado del Ruiz, abarca unos 87.72 km². En esta área tienen influencia las estaciones Pirineos-CHEC, Las Brisas, Q. Molinos-P.N.N.N., Q. Nereidas-P.N.N.N., Río Claro-P.N.N.N., y Santa Isabel-P.N.N.N. (fig. 85). Para determinar el área de influencia de cada estación dentro de la zona de recarga, se utiliza la técnica de los polígonos de Thiessen. Así, se lleva a cabo un promedio ponderado que tiene en cuenta el valor de infiltración para cada una de las estaciones y el área del polígono correspondiente a cada estación. De esta manera, se obtiene un promedio de infiltración anual para la zona de recarga (tabla 164).

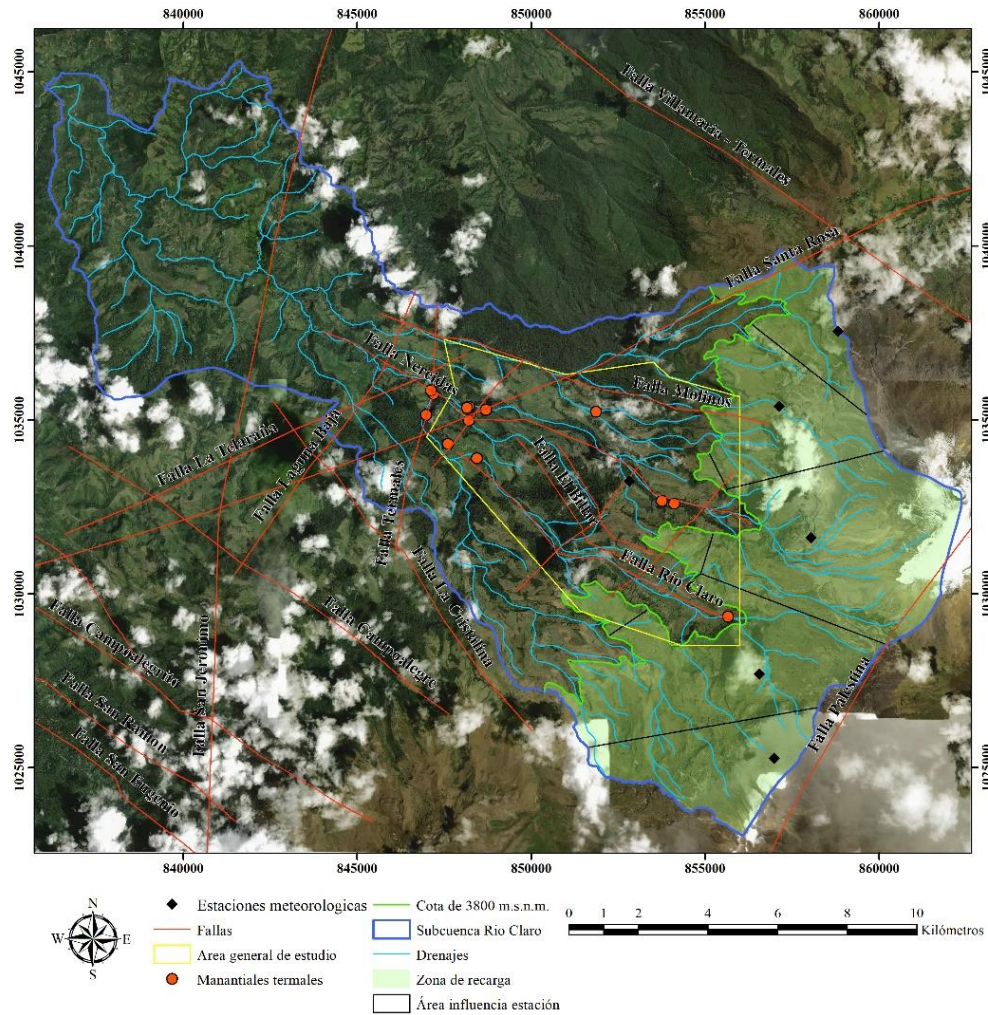


Fig. 85. Zona de recarga y polígonos de influencia. Imagen satelital tomada de SAS Planet.

Infiltración promedio anual			
Estación	Infiltración anual (mm)	Área (km ²)	Inf*Área
Q. Molinos - P.N.N.N.	117,3	14,0	1644,3
Santa Isabel - P.N.N.N.	281,2	12,1	3412,5
Las Brisas	456,5	7,2	3301,0
Río Claro - P.N.N.N.	455,2	23,7	10773,7
Pirineos - CHEC	269,3	3,6	978,5
Q. Nereidas - P.N.N.N.	176,6	27,0	4774,9
Total		87,72	24884,8
Infiltración promedio (mm)			283,67

Tabla 164. Infiltración promedio anual en la zona de recarga del sistema geotérmico.

El promedio ponderado de infiltración para la zona de recarga es de 283.67 mm por cada estación, lo que representa un caudal de entrada estimado de al menos 789.1 L/s en un área de 87.72 km², que se sugiere que van directamente a recargar el sistema geotérmico. En comparación, el dato previamente reportado por Román (2021) sobre el caudal de recarga es de 359.10 L/s. Esto sugiere que el caudal no es constante a lo largo del tiempo y su variación se encuentra estrechamente relacionado con la cantidad de precipitación anual. En otras palabras, en un año con menor cantidad de lluvia, la infiltración de agua será menor y, por lo tanto, el caudal de recarga también disminuirá, mientras que, en años con mayor precipitación, la infiltración será mayor y el caudal de recarga aumentará.

Es importante destacar que el valor calculado es solo una estimación mínima, y se enfoca únicamente en la infiltración del agua de lluvia, sin considerar otras posibles fuentes de recarga para el sistema geotérmico, como los cuerpos de agua superficiales mencionados por Dewhurst Group (2013, 2016). Para obtener un valor más preciso, se recomienda realizar estudios de suelos, que permitan evaluar sus propiedades y las dinámicas de infiltración. Además, como menciona Román (2021), construir un modelo hidrogeológico se vuelve necesario para comprender con mayor detalle la dinámica del flujo de agua y los caminos que esta pueda tomar desde su infiltración hasta llegar al reservorio.

11. Manantiales de aguas termales

Forero (1958) realizó el primer inventario de fuentes termales en Colombia, en donde realiza una compilación y caracterización de las fuentes termales conocidas y estudiadas hasta esa fecha. Entre las fuentes mencionadas en su estudio se encuentran el Hotel Termales y Villamaría, Santa Rosa de Cabal, y El Rancho en Ibagué. (Alfaro et al., 2002).

CHEC et al. (1983) para su informe geoquímico se realizó un muestreo entre los volcanes del Ruiz y Tolima, en donde se recolectaron un total de 162 muestras de aguas, incluyendo termales, no termales y aguas superficiales, además de 28 muestras de gas. Algunos parámetros fueron determinados en campo, mientras que otros se analizaron en laboratorio

A partir de este estudio se concluyó que, en la zona occidental del Volcán Nevado del Ruiz se presentan varios tipos de aguas con características geoquímicas distintas. Estos tipos incluyen aguas bicarbonato-alcalino-terreas con baja salinidad, que indican el inicio de la interacción del agua meteórica con rocas silicatadas. Los gases ricos en anhídrido carbónico contribuyen al aumento de la salinidad de estas aguas manteniendo su composición al emerger en zonas permeables asociadas a fallas. La lixiviación de rocas hidrotermalizadas causa la evolución de las aguas a sulfato-alcalino-terreas y sulfato-ácidas cerca del volcán. Las aguas bicarbonato-alcalinas provienen de lixiviación de rocas ácidas.

Por otro lado, las aguas cloruradas-alcalinas, se originan en acuíferos más profundos, al occidente del Volcán Nevado del Ruiz, emergen a través de rocas metamórficas del Complejo Cajamarca en contacto con lavas andesíticas del Ruiz, en el sector conocido como Botero Londoño, alcanzando temperaturas superficiales de hasta 93°C y, a partir de geotermómetros se indican temperaturas entre 230-240°C en reservorio. La presencia de un caudal significativo de agua en

estos manantiales de la zona de Botero Londoño, del orden de cientos de litros por segundo, sugiere la existencia de un acuífero de grandes dimensiones que alimenta estos manantiales. Además, se ha detectado la fuga de gas caliente del reservorio en el sector de Nereidas a partir de anomalías térmicas y de CO₂.

Alfaro et al. (2002) realizan un nuevo inventario de fuentes termales en el Parque Nacional Natural Los Nevados, en donde se organizaron estas fuentes en grupos según sus características geoquímicas y su posible asociación con una de las fuentes volcánicas del área. En ese contexto, agruparon las fuentes termales en el área occidental del Nevado del Ruiz en el que denominaron grupo 4 (fig. 86), compuesto por 10 manantiales, de los cuales 5 son cloruradas neutras y de alta temperatura, lo que sugiere un contacto directo del fluido geotérmico con la superficie. En este grupo se incluyen los manantiales de Botero Londoño, Las Nereidas, El Recodo y Chorro Negro.

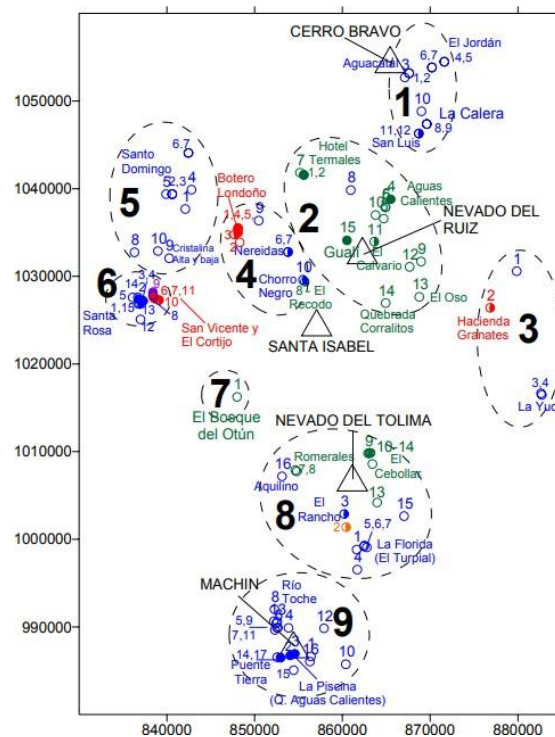


Fig. 86. Localización de manantiales termales por grupos en el Complejo Volcánico Cerro Bravo - Cerro Machín. Tomado de: Alfaro et al. (2002).

La caracterización de estas aguas hecha por Alfaro et al. (2002) muestran un pH cercano a la neutralidad (5.5 a 7.5) y temperaturas entre 12 y 93°C, incluso alcanzando temperaturas de ebullición. Los manantiales con temperaturas más elevadas presentan mayor conductividad, llegando a los 3800 uS/cm. La concentración significativa en cloruros, litio y boro, junto a una presencia relativamente baja de sulfatos sugiere una contribución importante de aguas geotérmicas del reservorio a estos manantiales. A partir del diagrama de clasificación según la composición de aniones dominantes, los manantiales de Botero Londoño y El Billar, se originan predominantemente a partir del reservorio geotérmico y son aguas maduras. En contraste, los demás manantiales pertenecen a la zona de aguas periféricas o vapor calentadas y como confirmación, el diagrama Cl-Li-B indica que las aguas cloruradas comparten un mismo origen en sistemas volcánico-magmático, mientras que los demás manantiales como Nereidas o El Recodo, reflejan un origen diferente. El diagrama triangular Na-K-Mg, por su parte determina que las aguas con menor concentración de Mg son las menos diluidas, y corresponden a las fuentes de Botero Londoño, El Billar y La Piscina, las cuales muestran un mayor aporte del reservorio geotérmico y línea de tendencia en el diagrama sugiere una temperatura aproximada de 255°C en el reservorio según el geotermómetro Na/K.

Aricapa (2020) realizó un análisis compilatorio de los datos geoquímicos realizados en estudios anteriores sobre los manantiales termales en la ladera occidental del Nevado del Ruiz. En su análisis, divide los manantiales en tres grupos y realiza una caracterización geoquímica de las mismas:

El sector El Recodo, situado al suroccidente del volcán, el manantial homónimo emerge a través de depósitos de avalancha de Río Claro sobre lavas andesíticas del Ruiz y está asociado a la falla Río Claro. Registra una temperatura de 53°C, pH de 6.4 y conductividad de 1239 uS/cm.

Las muestras de este sector se clasificaron como aguas calentadas por vapor y aguas periféricas. La mezcla de vapores y gases volcánicos con aguas poco profundas circulando a través de los depósitos de avalancha se reflejan en características isotópicas. Los valores de isótopos radiactivos indican un recorrido de más de 30 años en el subsuelo.

En el sector Nereidas, conformado por dos manantiales, “N1” y “N2”, emergen de depósitos de avalancha y lavas pre-Ruiz, a un costado de la quebrada Nereidas. Presenta temperaturas de 48.5°C y 46°C respectivamente, con pH ligeramente ácidos y conductividad de moderada uS/cm. Ambos manantiales son clasificados como aguas periféricas, bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas. Se identifica un flujo de ascenso común entre ambas. El diagrama de Na-K-Mg sugiere influencia de procesos poco profundos e inmadurez de estas aguas.

El sector Botero Londoño contiene varios manantiales con características similares, emergen de esquistos del Complejo Cajamarca, asociados al trazo de las fallas Río Claro, Nereidas, El Billar, y sus cruces con fallas como Laguna Baja, Santa Rosa y Termalés. Presenta diversas temperaturas, desde los 30.6° hasta 91.92°C. Son clasificados como aguas maduras y tienen comportamiento de aguas cloruradas y/ sulfatadas sódicas. El diagrama Na-K-Mg muestra una tendencia hacia el equilibrio, alcanzando un grado de madurez parcial y una temperatura en reservorio de 240°-260°C. Los análisis UT determinan un recorrido relativamente largo de estas aguas en el subsuelo, de 20 a 25 años. El origen de estas aguas se asocia a aguas meteóricas que han circulado durante un largo periodo de tiempo hasta alcanzar un alto grado de madurez. Estas aguas al ser maduras reflejan mejor las condiciones propias del reservorio geotérmico.

No.	Fuente termal	T °C	pH	Conductividad d μS/cm	Clasificación Piper Lengelier
1	Botero Londoño	91.92	7.59	3175	Clorurada y/o sulfatada sodica
2	Hacienda El Plan	46	6.11	3230	Clorurada y/o sulfatada sodica
3	La Piscina	58.67	6.62	2468	Clorurada y/o sulfatada sodica
4	La Quinta	91.75	7.65	2300-3610	Clorurada y/o sulfatada sodica
5	Hacienda Termales	30.6	6.73	139.29	Clorurada y/o sulfatada sodica
6	Botero Londoño Q. Nereidas	84	6.7		Clorurada y/o sulfatada sodica
7	Laguna Alta I	51	6.71		Clorurada y/o sulfatada sodica
8	Laguna Alta II	62.5	6.58		Clorurada y/o sulfatada sodica
9	Laguna Alta III	67.5	6.19		Clorurada y/o sulfatada sodica
10	El Recodo (Chorro Negro)	53.7	6.4	1239	Sulfato-sódica
11	Nereidas I	48.5	6.05	810	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
12	Nereidas II	46	5.94	1196	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica

Tabla 165. Manantiales termales en el Valle de Nereidas. Tomado de Román (2021).

Aricapa (2020) concluye presentando un modelo idealizado de circulación y evolución del fluido termal desde su recarga en las zonas de mayor altitud, hasta su descarga en el sector de Botero Londoño (fig. 87). Además, hace la aclaración de que se presenta un efecto de las precipitaciones sobre la concentración de algunos componentes del agua, también se dan procesos de mezcla de fluidos, re-equilibrio químico y pérdidas de vapor; reacciones de intercambio iónico con minerales arcillosos y por procesos de enriquecimiento de algunos cationes,

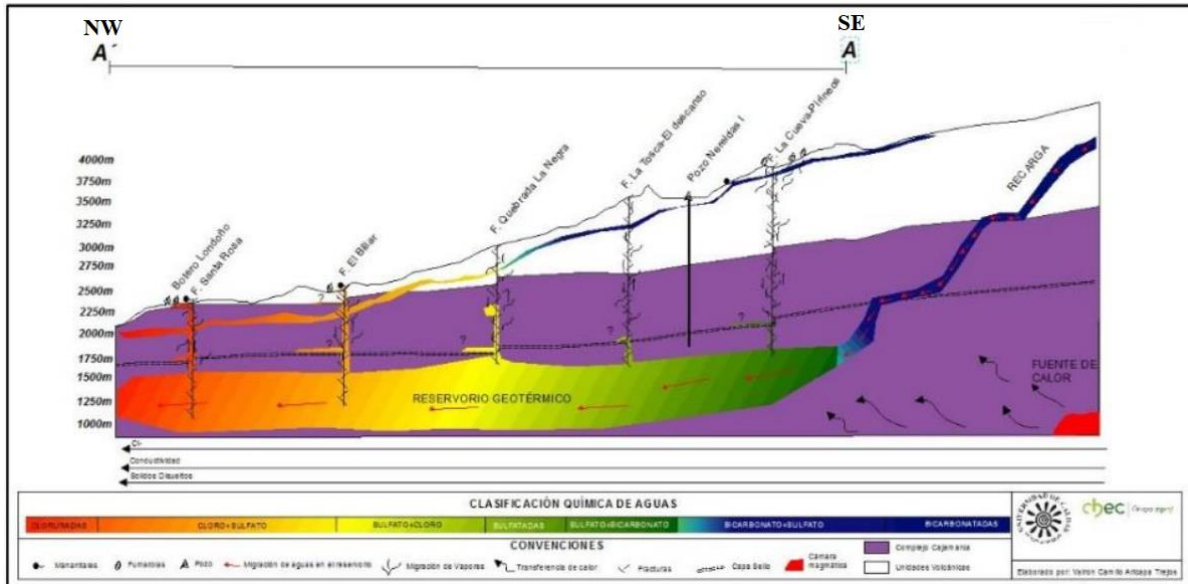


Fig. 87. Modelo idealizado de circulación y evolución del fluido termal. Tomado y modificado de: Aricapa (2020).

11.1 Cálculo de caudales de descarga de aguas termales

El área de Botero Londoño comprende, a día de hoy, de nueve manantiales: Manantial Botero Londoño, manantial hacienda El Plan, manantial La Piscina, manantial La Quinta, manantial hacienda El Termal-Cascada, manantial hacienda El Termal-Q. Nereidas, manantial Laguna Alta 1, manantial Laguna Alta 2 y manantial Laguna Alta 3. Los manantiales en la zona de Laguna Alta no entran dentro del área de estudio del proyecto geotérmico de CHEC.

Para realizar el cálculo de caudales fue hecho un muestreo de datos fisicoquímicos de los manantiales de aguas termales in situ, el primer dato medido en cada uno de los manantiales fue la temperatura, la cual fue tomada con un termómetro digital directamente en el nacimiento, posterior a esto se tomó una muestra del agua termal de cada uno de los manantiales para ser almacenada por unos minutos mientras su temperatura disminuía lo suficiente como para poder sacar los demás parámetros con la sonda Hanna (Conductividad y TDS).

Posteriormente se realizó la toma de los mismos parámetros fisicoquímicos para los respectivos ríos y quebradas que interactuaban con el manantial, estas mediciones para los cuerpos de agua fría se realizaron en dos puntos, antes y después de la interacción con dichos termales (fig. 88).

Adicional a esto, con el apoyo del equipo de hidrología de CHEC S.A. E.S.P. se realizó un punto de aforo para los cuerpos de agua fría (Q. Nereidas, Q. El Billar y Q. La Poa) para conocer su caudal, el cual se calculó por el método de área-velocidad en el mismo punto en donde fueron tomados los parámetros fisicoquímicos antes de la interacción con los termales.

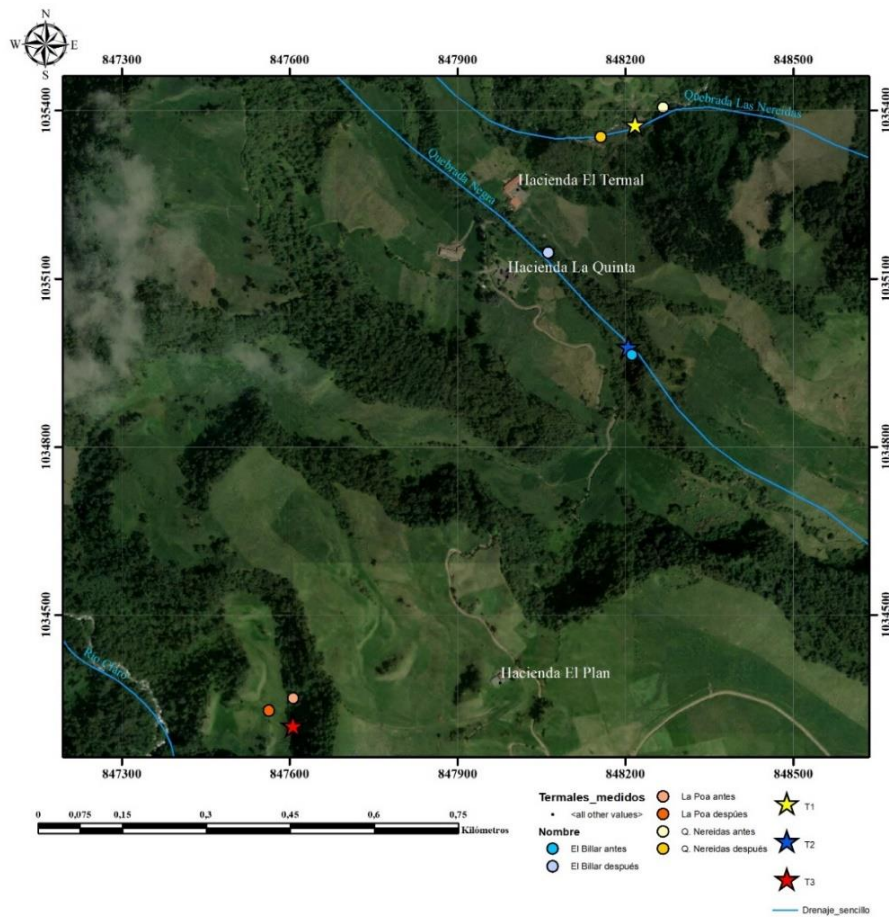


Fig. 88. Zona de recarga y polígonos de influencia. Imagen satelital tomada de SAS Planet.

Una vez obtenidos los datos, y con el fin de estimar el caudal de salida de agua termal para los tres manantiales visitados en la zona de Botero Londoño, se realizó el siguiente procedimiento:

(1) A partir de la fórmula de equilibrio de masas se realizó el siguiente despeje:

$$Q_t \cdot T_t = Q_f \cdot T_f + Q_c \cdot T_c$$

$$T_t = \frac{(Q_f \cdot T_f) + (Q_c \cdot T_c)}{Q_t}$$

Pero

$$Q_t = Q_c + Q_f$$

Por lo tanto

$$T_t = \frac{(Q_f \cdot T_f) + (Q_c \cdot T_c)}{(Q_c + Q_f)}$$

Donde:

Tt: Temperatura total medida (Parámetro tomado en el cuerpo de agua fría después de la interacción con el termal).

Qf: Caudal del cuerpo de agua frío.

Tf: Temperatura medida en el cuerpo de agua frío (antes de la interacción con el termal).

Qc: Caudal del cuerpo de agua caliente.

Tc: Temperatura del cuerpo de agua caliente.

Qt: Caudal total (Caudal caliente + Caudal frío).

La fórmula se aplica utilizando el software Excel reemplazando las variables de la fórmula por los valores correspondientes medidos en campo quedando como incógnita Q_c

- (2) Estimar el valor de Q_c aleatoriamente en el software Excel, para reemplazarlo en la fórmula y así obtener un valor de T_t ; esto se realiza hasta que el valor de T_t obtenido en la fórmula coincida con el valor real medido en campo. Cuando se alcanza la coincidencia entre ambos valores es indicativo de que el valor de Q_c ingresado en la fórmula es el necesario para que la temperatura medida en campo sea así.
- (3) Una vez se obtenga el valor de Q_c se procede a interpretarlo.

11.1.1 Manantiales Hacienda El Termal-Q. Nereidas (T1)



Fig. 89. Manantiales de aguas termales sobre la quebrada Nereidas.

Consta de tres zonas distribuidas a lo largo de la margen derecha de la Q. Nereidas aguas arriba, se presentan emanaciones de agua termal en forma de géiseres que alcanzan temperaturas cercanas a los 90°C con presencia de vapores y con pH básico-alcalino de 8.54, algunas de las emanaciones presentan la formación de geiseritas de algunos centímetros en extensión y altura

(fig. 89), la columna de agua puede alcanzar de 2 a 3 metros de altura, estos emergen a través de esquistos del Complejo Cajamarca y depósitos aluviales de la quebrada (fig. 90).

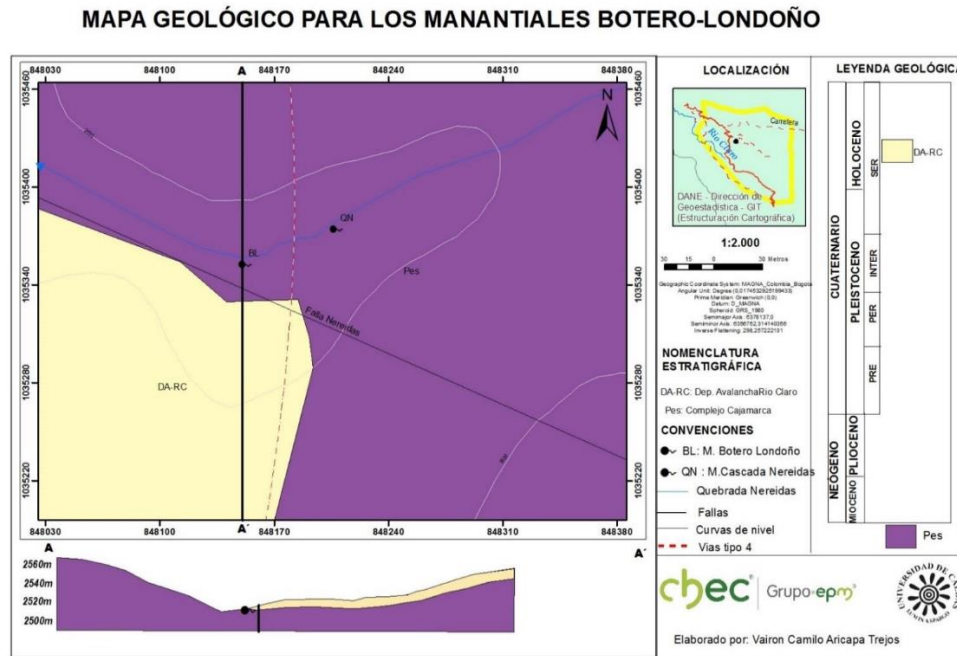


Fig. 90. Mapa geológico de los manantiales Botero Londoño. Tomado de Aricapa (2020).

Para el ingreso a este manantial se debe tomar el desvío que conduce a las haciendas El Termal y La Quinta, una vez se llega al lugar conocido como La Asomadera se comienza a descender hasta llegar a la Q. Nereidas, este manantial se encuentra en la margen derecha de la quebrada aguas arriba, por lo que se debe cruzar la quebrada por el puente que conduce a las haciendas ya mencionadas, en la fig. 88. este manantial es representado con la estrella de color amarillo, los puntos circulares de tonalidades amarillas representan el punto de aforo y la toma de datos fisicoquímicos para la quebrada. Los datos recolectados se muestran en la tabla 166.

Medición	Qc (m ³ /S)	T (°C)	Cond (μS/cm)	TDS ppm	pH
Q. Nereidas antes	1.804	13.1	836	418	8.3
T1	?	92.2	6251	3126	8.54
Q. Nereidas después		22.9	2415	1208	8.46

Tabla 166. Datos fisicoquímicos medidos en la quebrada Nereidas y en el manantial T1.

Siguiendo el procedimiento mencionado anteriormente, se procede a calcular el valor de caudal Q_c para este manantial:

(1) Se reemplazan los valores correspondientes en la fórmula quedando como incógnita Q_c :

$$T_t = \frac{\left(1.804 \frac{m^3}{s} \cdot 13.1^\circ C\right) + (Q_c \cdot 92.2^\circ C)}{\left(Q_c + 1.804 \frac{m^3}{s}\right)} = 22.9^\circ C$$

(2) Al estimar el valor de Q_c en el software Excel en función de la temperatura, se obtuvo un valor de Q_c de $0.255 \text{ m}^3/\text{s}$

(3) En conclusión, se determinó que el caudal promedio aportado por este manantial de agua termal a la Q. Nereidas es de $0.255 \text{ m}^3/\text{s}$ entre octubre y noviembre, en contraste, durante el valor calculado por Román (2021) fue de $0.1138 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el mes de marzo, mes transitorio entre periodo seco y periodo lluvioso.

11.1.2 Manantiales Hacienda La Quinta (T2)



Fig. 91. Manantiales de aguas termales sobre la quebrada El Billar.

Las emanaciones que conforman este manantial se encuentran distribuidas a lo largo del margen izquierdo del cauce de la Q. El Billar aguas arriba, la temperatura medida para estos

manantiales fue de 88.1° C con presencia de vapores, con un pH de básico-alcálico de 7.84. Estos manantiales brotan de esquistos del Complejo Cajamarca, y pueden estar asociados a la Falla Santa Rosa y a la Falla El Billar, la cual controla el cauce de la quebrada (fig. 92).

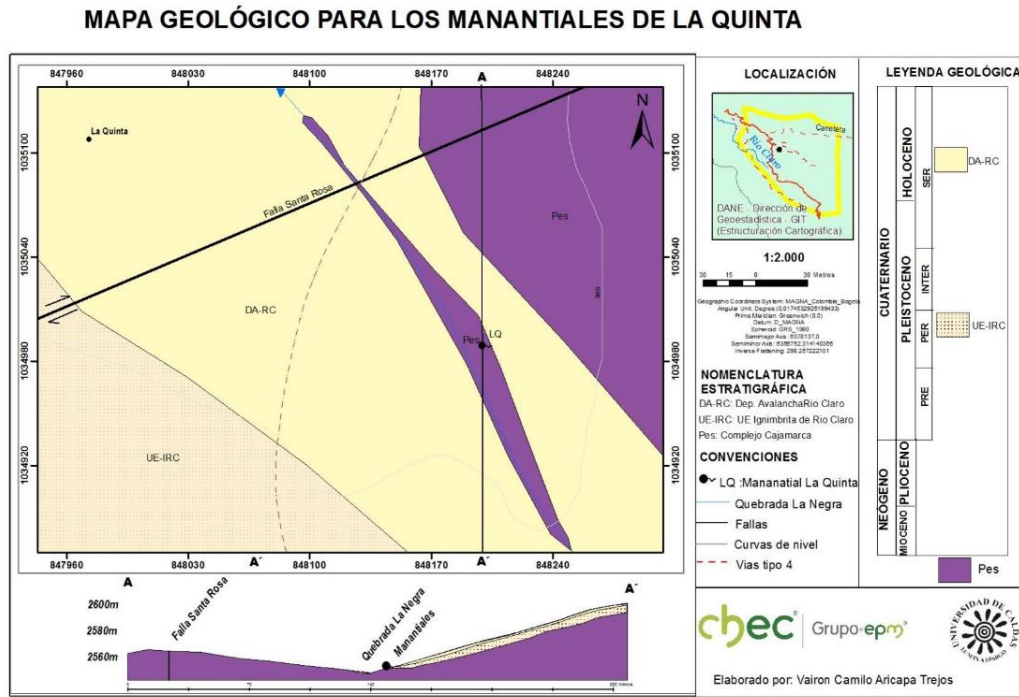


Fig. 92. Mapa geológico de los manantiales de la quebrada El Billar. Tomado de Aricapa (2020).

El acceso a este manantial debe tomarse después de llegar a la Hacienda La Quinta, en donde se toman los potreros que se encuentran detrás de la hacienda, hasta llegar al sendero que conduce a la quebrada, las emanaciones se encuentran en la margen derecha de la quebrada aguas arriba en donde es posible ver tuberías y unas pequeñas represas sobre algunos de los nacimientos para captar parte de esta agua, la cual es dirigida hacia la hacienda la Quinta para aprovechamientos geotérmicos como balneología y calefacción. En la fig. 88 este manantial es representado con la estrella de color azul, los puntos circulares de tonalidades azules representan el punto de aforo y la toma de datos fisicoquímicos para la quebrada. Los datos fisicoquímicos recolectados se muestran en la tabla 167.

Medición	Q (m ³ /s)	T (°C)	Cond (μS/cm)	TDS ppm	pH
Q. El Billar antes	0.583	12.8	448	224	8.57
T2	?	88.1	5780	2890	6.7
Q. El Billar después		18.2	1916	958	7.84

Tabla 167. Datos fisicoquímicos medidos en la quebrada El Billar y en el manantial T2

Para conocer el caudal de salida de agua termal en este manantial se realiza el mismo procedimiento en el software Excel utilizado para calcular del manantial anterior.

- (1) Reemplazar los valores correspondientes en la fórmula quedando como incógnita Q_c .

$$T_t = \frac{\left(0.583 \frac{m^3}{s} \cdot 12.8^\circ C\right) + (Q_c \cdot 88.1^\circ C)}{\left(Q_c \cdot 0.583 \frac{m^3}{s}\right)} = 18.2^\circ C$$

- (2) Se estima el valor de Q_c en el software Excel en función de la temperatura, el valor de Q_c obtenido fue de $0.045038627 \text{ m}^3/\text{s}$.

- (3) En conclusión, el caudal promedio obtenido para el manantial que interactúa con la Q. El Billar es de $0.045038627 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua termal durante el período de octubre a noviembre. En comparación con el dato previamente reportado por Román (2021) para este manantial, el cual fue de $0.0253 \text{ m}^3/\text{s}$.

11.1.3 Manantial La Poa-La Piscina (T3)



Fig. 93. Manantial de agua termal conocido como “La Piscina”.

Del manantial La Piscina emanan aguas básicas-alcalinas, con un pH de 6.81, la temperatura medida fue de 57.6° C. El manantial emana 15-20 metros antes de la Q. La Poa, brota en la base o pie una pared de roca volcánica perteneciente a la unidad CL-PRE (Conjunto de lavas Pre-Ruiz) según Aricapa (2020) y puede estar asociado a la Falla de Río Claro (fig. 94).

MAPA GEOLÓGICO PARA EL MANANTIAL LA PISCINA

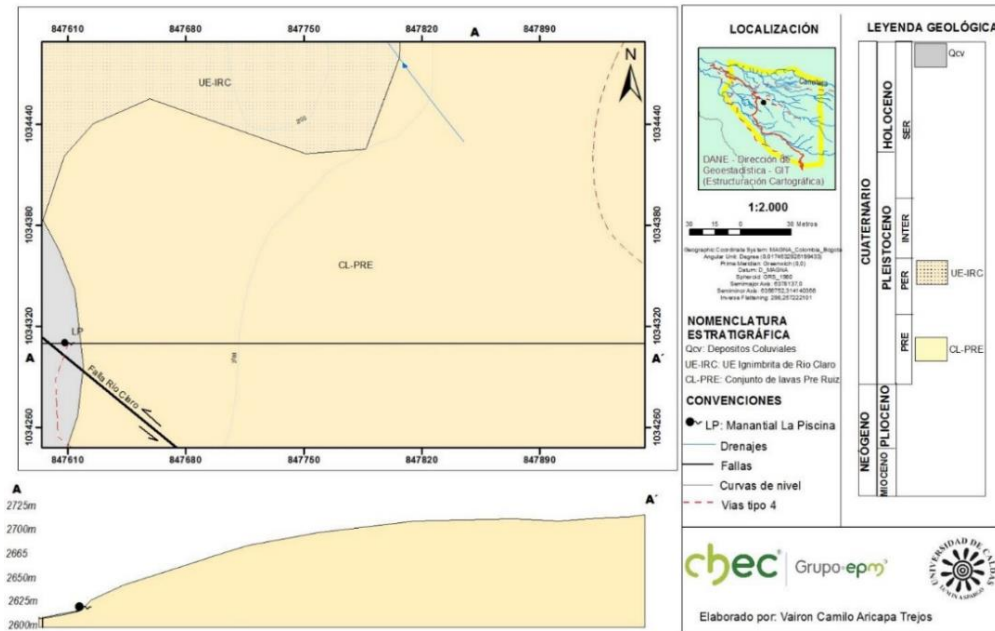


Fig. 94. Mapa geológico del manantial La Piscina. Tomado de Aricapa (2020).

Para acceder a este manantial se pueden seguir dos caminos, para el primero es necesario pasar por las haciendas El Termal y La Quinta, una vez se llega a La Quinta, se rodean los potreros que quedan detrás de la finca siguiendo el camino de herradura que conduce hasta la hacienda El Plan, al frente de la cual queda un pequeño bosque, una vez sea visible la hacienda se procede a rodear el bosque hasta encontrar una puerta de acero con un letrero indicando el nombre del manantial, se accede por dicha puerta y se baja la montaña hasta llegar al nacimiento del manantial, y a 15-20 metros de distancia se encuentra la Q. La Poa. En la fig. 88 este manantial es representado con la estrella de color rojo, los puntos circulares de tonalidades rojizas representan el punto de aforo y la toma de datos fisicoquímicos para la quebrada. Los datos recolectados se muestran en la tabla 168.

Medición	Q (m ³ /S)	T (°C)	Cond (µS/cm)	TDS ppm	pH
Q. La Poa antes	0.195	12	805	403	7.64
T3 (La Piscina)	?	57.6	5036	2518	6.81
Q. La Poa después		20.8	2308	1154	7.29

Tabla 168. Datos fisicoquímicos medidos en la quebrada La Poa y en el manantial T3

Nuevamente se aplicó el mismo método utilizado para obtener el Q_c .

(1) Reemplazar los valores correspondientes en la fórmula quedando como incógnita Q_c :

$$T_t = \frac{\left(0.195 \frac{m^3}{s} \cdot 12^\circ C\right) + (Q_c \cdot 57.6^\circ C)}{\left(Q_c \cdot 0.195 \frac{m^3}{s}\right)} = 20.8^\circ C$$

(2) Se estima el valor de Q_c en el software Excel en función de la temperatura. El valor de Q_c obtenido fue de 0.046630435 m³/s

(3) En conclusión, el caudal calculado para este manantial es de 0.046630435 m³/s en la época de octubre a noviembre. Este manantial no fue visitado por Román (2021), por lo que no es posible hacer una comparación directa del caudal.

11.2 Zona de descarga en el sector de Botero Londoño

A partir de los resultados en la estimación de caudales obtenidos por Román (2021), se realizó un complemento con los obtenidos en este trabajo, con el fin de conocer las dinámicas en el sistema de descarga del reservorio geotérmico evaluado en diferentes períodos de tiempo.

	Román, 2021	2022
	Transición	T. Lluvia
Termales	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
T1 (BL)	0.114	0.255
T2 (LQ)	0.025	0.0406
T3 (LP)	-	0.0466
T4 (RC-N)	0.104	-
Total	0.243	0.342
Total (L/s)	242.7	342.2
Diferencia	99.5	

Tabla 169. Valores de caudales obtenidos para cada manantial entre 2021 y 2022.

En la tabla 169 se observan los resultados obtenidos en el cálculo de caudales para ambos estudios, en este caso solo se pudo repetir la medición en los manantiales T1 y T2, el manantial T3 solo fue tomado en este trabajo, mientras el manantial T4 no pudo ser medido por causas externas en este estudio por lo que solo se cuenta con el dato obtenido en 2021.

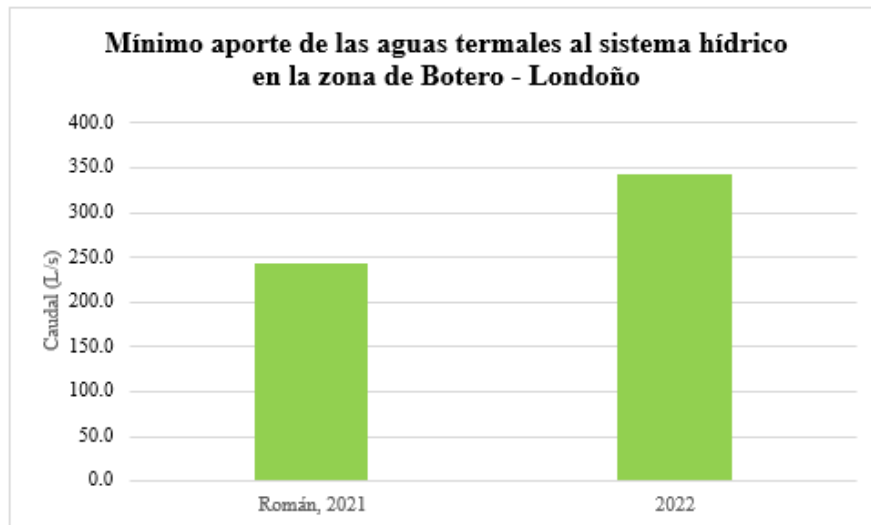


Fig. 95. Mínimo aporte de las aguas termales al sistema hídrico en la zona de Botero Londoño.

Haciendo una comparación entre los datos de cada manantial y más aún, al hacer la sumatoria de los caudales de aguas termales para cada año, es evidente que el valor obtenido para 2022 (342.2 L/s) es más alto que el valor medidos en 2021 (242.7 L/s), marcando una diferencia de 99.5 L/s, es decir, para el año de 2022, el reservorio descargó 99.5 L/s más que en el año 2021, esto puede tener su explicación en el valor de caudal de recarga del reservorio medido en el inciso 10.5.11 que fue de 789,1 L/s para el año 2022, mientras que este valor para el año 2021 fue de 359.10 L/s.

Esto implica que, entre mayor es el valor de caudal de recarga del reservorio, mayor es el valor de caudal de salida y viceversa, es decir, un valor en el caudal de recarga alto se relaciona con un mayor volumen de agua entrando al reservorio, este mayor volumen de agua entrante

comienza a desplazar un mayor volumen de agua que ya se encontraba dentro del reservorio, el cual se desplaza hacia la zona de Botero Londoño que es reconocida como la zona de descarga del sistema geotérmico, por lo que las emanaciones de aguas termales presentes en esta zona tienden a aumentar su caudal en temporadas de lluvia donde la recarga del reservorio aumenta, por el contrario, en temporadas secas o de menor precipitación, el valor de recarga es menor, y el caudal de aguas termales disminuye.

Por otro lado, de los valores de la tabla 169, solo se puede hacer una comparación directa entre los manantiales T1 y T2, en donde si fue posible repetir la medición en ambos estudios, partiendo de esto se realizó la relación para estos dos termales:

Para T1:

$$\frac{0.255 \frac{m^3}{s}}{0.114 \frac{m^3}{s}} \approx 2.24$$

Esto implica que el caudal de T1 para 2022 creció 2.24 veces más que el valor de 2021.

Para T2:

$$\frac{0.045 \frac{m^3}{s}}{0.025 \frac{m^3}{s}} \approx 1.78$$

Esto implica que el caudal de T2 para 2022 creció 1.78 veces más que el valor de 2021.

Con estas relaciones se realiza un promedio entre ambas obteniendo un valor de relación promedio de 2.01, a partir de este valor se pretende estimar un valor de caudal para los termales T3 y T4.

- (1) Para el caso de T3, el dato de caudal faltante es el de 2021, haciendo el análisis, los valores de caudal de 2021 son relativamente menores que los de 2022, por lo que el caudal obtenido para el año 2022 será dividido entre el valor de relación promedio:

$$Q = \frac{0.047 \frac{m^3}{s}}{2.01} = 0.023 \frac{m^3}{s}$$

(2) En el caso de T4, se realizó la relación inversa al caso de T3, esto debido a que el caudal faltante es el de 2022 y estos valores son relativamente mayores que los de 2021, por lo que el valor de caudal obtenido para el año 2021 será multiplicado por el valor de la relación promedio:

$$Q = 0.104 \frac{m^3}{s} \cdot 2.01 = 0.208 \frac{m^3}{s}$$

De esta manera se logró obtener teóricamente los caudales faltantes para realizar una comparación más ajustada a la realidad, los nuevos datos obtenidos se adicionaron a los datos de la tabla 169 y se realizó la suma para obtener un nuevo valor mínimo de caudal de agua termal para la zona de descarga de Botero Londoño que ingresa al sistema hídrico del área. Los nuevos datos se registran en la siguiente tabla:

	Román, 2021	2022
	Transición	T. Lluvia
Termal	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)
T1 (BL)	0.114	0.255
T2 (LQ)	0.025	0.045
T3 (LP)	0.023	0.047
T4 (RC-N)	0.104	0.208
Total	0.266	0.555
Total (L/s)	265.9	554.9
Diferencia (L/s)	289.0	

Tabla 170. Valores completos de caudales obtenidos para cada manantial entre 2021 y 2022.

Haciendo nuevamente la comparación adicionando los nuevos datos se evidencia que al agregar los nuevos valores de caudal para T3 y T4, el valor de la sumatoria aumenta para cada año, el nuevo valor obtenido para 2021 es de 265.9 L/s mientras que el valor medido para 2022 es de

554.9 L/s. La diferencia entre ambos años es de 289.0 L/s, es decir, para el año de 2022, el reservorio descargó 289.0 L/s más agua termal que en el año 2021.

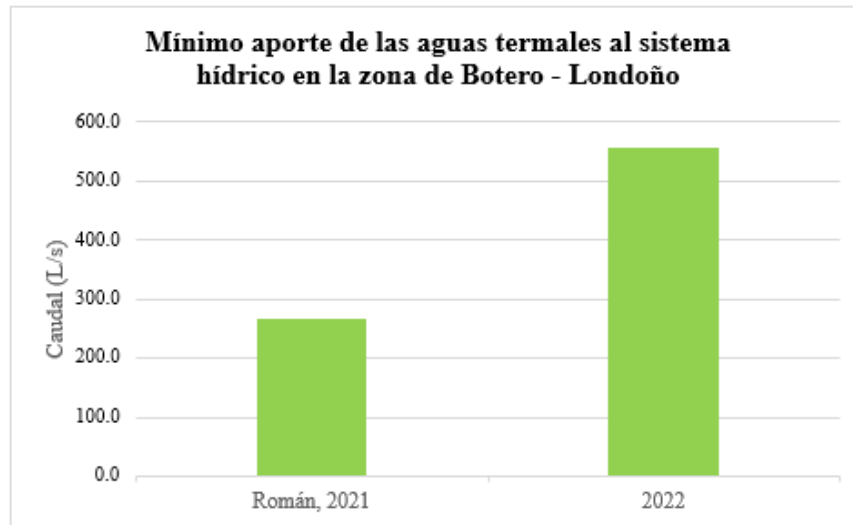


Fig. 96. Mínimo aporte de las aguas termales al sistema hídrico en la zona de Botero Londoño.

Se evidencia que las dinámicas climáticas en la subcuenca de Río Claro tienen un efecto directo en las dinámicas del sistema geotérmico, ya que la temporada del año en la que se realice la toma de datos influye en el valor del caudal, por lo que, siendo más preciso, los valores de caudal de descarga para el año 2021 solo corresponden al mes de marzo que, corresponde a un mes transitorio entre la temporada de baja precipitación y la temporada de altas precipitaciones, mientras que los valores de caudal para el año 2022 solo corresponden al mes de noviembre, mes central de la segunda y más fuerte temporada de lluvias del año. Además, es importante mencionar que, como se demostró en el inciso 10.2.5.2.1, las precipitaciones no solo varían estacionalmente, sino también anualmente, en donde se pueden encontrar años con precipitaciones mayores que otros debido a factores climáticos como el fenómeno de El Niño y La Niña en ciclos cuasibienales, los cuales también podrían tener efecto en las dinámicas del sistema geotérmico.

Es importante destacar que los valores de caudales de descarga del reservorio obtenidos son valores mínimos, esto debido a que, como fue mencionado antes, la zona de Botero Londoño comprende un total de nueve manantiales termales y en este trabajo se pudo estimar el valor de caudal solo a partir de cuatro de estos para el año 2021 y 2022, por lo que se puede inferir que el valor real de descarga de en la zona de Botero Londoño es mucho mayor.

12. Recopilación de la información y aportes para la construcción de un modelo geotérmico conceptual

El sistema geotérmico en el occidente del volcán Nevado del Ruiz, explorado por la CHEC S.A– Grupo EPM, bajo el nombre de Proyecto geotérmico Valle de Nereidas, a lo largo de la historia ha tenido varios estudios que tratan los diferentes componentes de un sistema geotérmico. A través de una revisión histórica de estos estudios previos, y la integración de los resultados obtenidos en el actual estudio, se realizó una caracterización básica e hipotética de las diferentes partes que conforman un modelo geotérmico.

La fuente de calor podría corresponder a un sistema magmático activo debajo del Volcán Nevado del Ruiz que, hasta día de hoy genera el calor para el sistema geotérmico. Las manifestaciones hidrotermales como los manantiales de aguas termales, suelos calientes y fumarolas, son indicios que señalan la existencia de una anomalía térmica en el costado occidental del volcán. El pozo Nereidas-1 registró un gradiente geotérmico de aproximadamente 150°C/km relacionando el calor proporcionado por las cámaras magmáticas del volcán a las rocas que la rodean, las cuales, a su vez, proporcionan calor a las aguas de infiltración. La geoquímica de gases en las manifestaciones termales ha proporcionado datos como la presencia de He de origen magmático, H₂S ligado a desgasificación magmática, y H₂ que indica una alta temperatura (LaGeo, 2016).

Para el reservorio, la presencia de aguas cloruradas, en el sector de Botero Londoño, fluyendo a cientos de L/s indican la presencia de un acuífero salino profundo de importantes dimensiones que alimenta los manantiales. Los geotermómetros aplicados a estas aguas sugieren una temperatura en el reservorio en torno a 250°C. Por otro lado, en el sector de La Azufrera, los geotermómetros sugieren temperaturas de hasta 300°C, señalando una zona del reservorio más

caliente en el reservorio ubicada más cerca del volcán. La perforación del Pozo Nereidas-1, a una profundidad real de 1357 metros no registro circulación de fluidos, indicando que el reservorio puede encontrarse mucho más profundo en este sector, haciendo énfasis que el objetivo original del pozo era superar los 2000 metros de profundidad. El pozo, desde los 777 metros comenzó a perforar las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, lo que indica que el reservorio se constituye por rocas metamórficas que, a pesar de su porosidad y permeabilidad primaria nulas, la fracturación tectónica al oeste del volcán posibilita la circulación de fluidos. CHEC et al. (1983) determinan, a partir de isotopos radiactivos H3 (Tritio) que el agua circula a través del reservorio por lo menos 25 años, tiempo en el cual lixivía las rocas de la zona y evoluciona geoquímicamente.

La capa sello la podrían constituir tanto las rocas de la unidad volcánica como las del Complejo Cajamarca, por lo menos en su parte superior. La geología del pozo Nereidas-1 revela niveles de alteración moderada a fuerte principalmente en la cobertura volcánicas con la formación de minerales arcillosos. Almaguer (2013) en su estudio magnetotelúrico determinó un cuerpo de resistividad moderada (50 Ohm-m) que se encuentra confinando cuerpos de conductividad elevada, interpretados como la capa sello y el reservorio, respectivamente.

La zona de recarga del sistema geotérmico se presenta principalmente en un área de 87.72 km² que se encuentra en las zonas elevadas de la subcuenca de Río Claro, por encima de los 3800 m.s.n.m., asociado a suelos de arena y ceniza volcánica de granulometría gruesa a moderadamente gruesa, de poco espesor, que se encuentra sobre el macizo rocoso fracturado tectónicamente y que presenta estructuras como cráteres, chimeneas y fallas que favorecen la infiltración de las aguas meteóricas y, por ende, la recarga del sistema geotérmico (LaGeo, 2016). A esto se le suma el hecho de encontrarse en la subcuenca de Río Claro, clasificada como una cuenca con precipitaciones medias anuales abundantes, de 1274.4 mm al año, de los cuales, para 2021 se

infiltraron 130.3 mm o 359.1 L/s (Román, 2021), mientras que para 2022, la infiltración fue de 283.67 mm o 789.1 L/s, los cuales se asume que actúan directamente como recarga del sistema geotérmico. Se considera que tanto las fallas, como los cuerpos de agua, e infiltración en diferentes sectores fuera de la denominada zona de recarga por encima de los 3800 m.s.n.m. también influyen, en cierta forma, en la recarga del sistema geotérmico, pero su efecto cuantitativo es desconocido hasta ahora, por lo que los caudales de recarga mencionados se consideran como caudales mínimos, ya que solo representan recarga por infiltración en el área de recarga establecida.

No se tiene suficiente certeza sobre el movimiento de los fluidos al infiltrarse, pero se estima que el patrón de circulación está controlado principalmente por las fallas con orientación NW-SE. las fallas con orientación NE-SW y NNE-SSW a N-S, pueden tener cierta influencia sobre la migración de los fluidos geotérmicos, su principal influencia se da cuando se intersectan con las fallas NW-SE generando aberturas que permiten la fuga del fluido y la formación de manantiales termales.

La zona de descarga se considera ubicada en el sector de Botero Londoño, teniendo en cuenta el patrón de circulación a partir de las fallas NW-SE, el fluido geotérmico migra a través de estas fallas desde su infiltración en cercanías del volcán desde el SE en dirección al NW, en donde se ubican las fuentes termales de Botero Londoño, El Billar, las haciendas El Plan y El Termal, etc. Los análisis geoquímicos llevados a cabo en estas aguas las clasifican como aguas cloruradas, equivalentes a las aguas maduras de un sistema geotérmico (CHEC et al., 1983). La surgencia de estas aguas en el sector de Botero Londoño está controlada por estructuras tectónicas, como la intersección de las fallas Nereidas y Santa Rosa, que genera una sintaxis tectónica dilatacional, o el proceso de válvula de falla descrito por Hincapié (2013). Los caudales de estas aguas son del orden de cientos de L/s, para el 2021, Román calculó un caudal de 242.7 L/s, este

valor fue ajustado en este estudio al adicionarle el caudal del manantial La Piscina, dando un nuevo caudal de salida de al menos 265.9 L/s para el 2021. Para el 2022 se calculó un caudal de salida de al menos 554.9 L/s, demostrando que estos se ven afectados por los factores climáticos de la subcuenca de Río Claro.

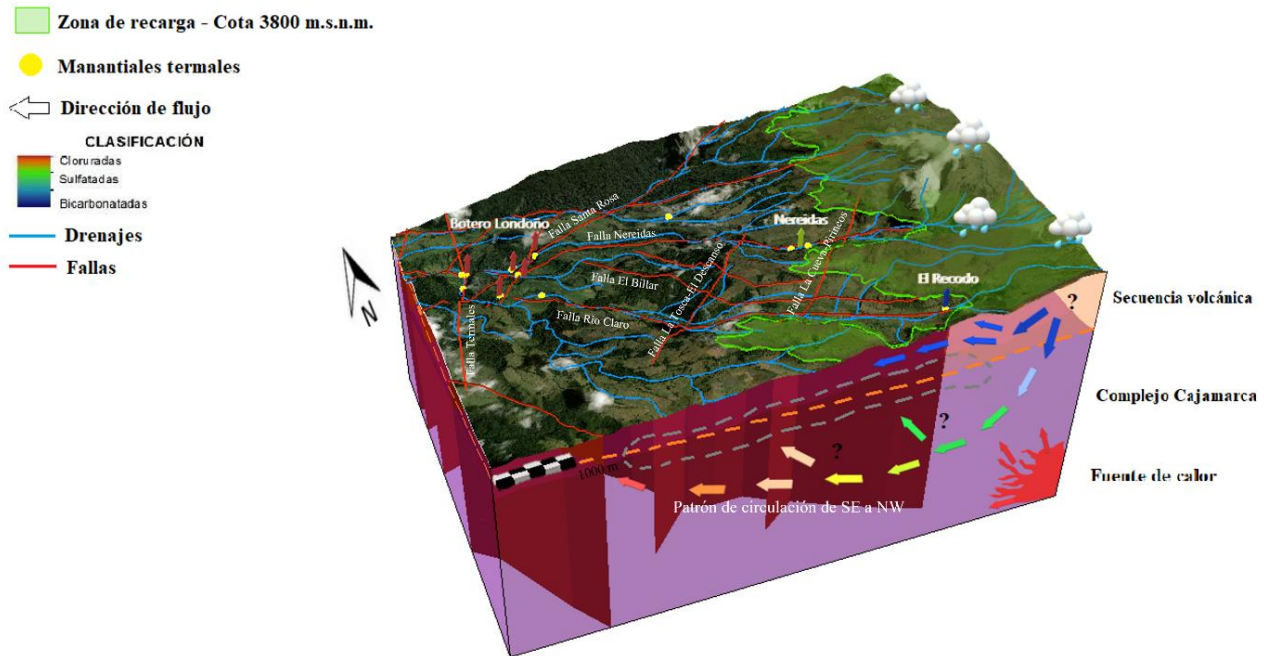


Fig. 97. Esquema representativo hipotético del sistema geotérmico en el valle de Nereidas. Modificado de: Román (2021).

13. Conclusiones

- La precipitación media multianual obtenida a partir de los tres métodos (Aritmético, polígonos de Thiessen e Isoyetas) 1185.4 mm, 1250.6 mm y 1274.4 mm respectivamente, permite clasificar a la subcuenca de Río Claro como una cuenca con precipitaciones abundantes según OMM (2008).
- Según las gráficas de precipitación media anual para el rango entre 2016 y 2021, se muestran años con mayores precipitaciones que otros, lo que se podría asociar al efecto de las oscilaciones cuasibienales, representadas en los fenómenos de El Niño y La Niña.
- La precipitación se distribuye en la subcuenca de Río Claro siguiendo una tendencia NW-SE, en donde hacia el SE, en las zonas de mayor altitud se presentan las precipitaciones más bajas, principalmente en las estaciones Q. Molinos-P.N.N.N., Q. Nereidas-P.N.N.N. y Santa Isabel-P.N.N.N., mientras al NW, en las zonas de menor altitud, se presentan las precipitaciones más altas en estaciones como Papayal, Río Claro-La Batea y Río Claro-La Guayana.
- La temperatura media de la subcuenca de Río Claro varía desde los 18.78°C hasta los 0.76°C abarcando cuatro pisos térmicos según la clasificación del IGAC (2014) los cuales son: térmicos templados, fríos, de páramo bajo y de páramo alto.
- Hay tres estaciones situadas por encima de los 4000 m.s.n.m. que durante todo el año registran temperaturas bajo cero, son Santa Isabel-P.N.N.N., Río Claro-P.N.N.N. y Las Brisas, registrando valores de hasta -3.82°C. Por otro lado, las estaciones que se encuentran en la parte baja de la cuenca y que registran las mayores temperaturas son Río Claro-La Batea y Río Claro-La Guayana con valores cercanos a 27°C. Esto indica que la temperatura sigue un comportamiento de SE a NW, en donde las temperaturas más bajas se concentran en el sector

SE de la subcuenca, y va incrementando en dirección NW, influenciado principalmente por la altitud.

- En general, la subcuenca de Río Claro presenta un comportamiento bimodal en la mayoría de sus factores climáticos, relacionado con el paso de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) dos veces al año sobre la región, generando dos periodos de lluvia y dos periodos de sequía, que afectan directamente el caudal de los drenajes, la cantidad de agua que se retiene y la se infiltra a través del suelo, por consiguiente, se ve afectada la recarga de acuíferos y del sistema geotérmico.
- La evapotranspiración está fundamentalmente controlada por la temperatura, y en consecuencia, también lo está por la altitud. En las áreas de menor altitud de la cuenca, donde las temperaturas son más elevadas, también se observan los valores más altos de evapotranspiración, registrados en las estaciones de Río Claro-La Batea y Río Claro-La Guayana. En contraste, la estación Santa Isabel-P.N.N.N., ubicada a 4812 m.s.n.m., registra las temperaturas más bajas y, por ende, los valores de evapotranspiración más bajos.
- A partir del balance hídrico se determinó que, en general, la mayor parte del año, la subcuenca de Río Claro registra una disponibilidad de agua abundante, donde solo se registró un déficit hídrico de 90.9 mm al año en promedio. Por el contrario, en la cuenca se generaron excedentes de al menos 605.27 mm de agua que, según la metodología de Thornthwaite, la mitad de este valor ingresa a la circulación superficial o escorrentía, como recarga de los drenajes, mientras que la otra mitad se infiltra y funciona como recarga de acuíferos y del reservorio geotérmico.
- La parte de la infiltración que funciona efectivamente como recarga del sistema geotérmico se da principalmente a una altura superior a los 3800 m.s.n.m. en donde se encuentran características estructurales que permiten la infiltración del agua meteórica.

- El cálculo de un caudal de recarga, a través del balance hídrico propuesto, determinó que, en un área de 87.72 km², se infiltraron para 2021 130.3 mm de agua, o 359.1 L/s (Román, 2021), mientras que para 2022, la infiltración fue de 283.67 mm o 789.1 L/s, los cuales se asume que actúan directamente como recarga del sistema geotérmico.
- El caudal estimado de las aguas termales que son descargadas en Botero Londoño es por lo menos de 554,9 L/s para la última temporada de lluvia del 2022, es decir, entre octubre y noviembre. Mientras que para el 2021, el valor ajustado del cálculo elaborado por Román 2021 fue de 265.9 L/s.
- La variabilidad en el caudal de recarga y descarga está relacionada con los factores climáticos de la subcuenca de Río Claro, en especial con la cantidad de precipitación anual ya que años de mayor precipitación resultan en una mayor infiltración y, por consiguiente, un caudal de recarga, lo que implica un mayor empuje del fluido entrante sobre el fluido que ya se encontraba en el reservorio, resultando en un mayor caudal de descarga.
- La estimación de caudales de aguas termales realizada en este estudio es una forma indirecta que se tiene para conocer al menos cuanto es el volumen del recurso que se tiene en el reservorio geotérmico.

14. Recomendaciones

- Se recomienda continuar construyendo un modelo hidrológico para la subcuenca de Río Claro con fin de tener un mejor detalle de las dinámicas de la cuenca en períodos de tiempo más amplios, y así, tener más certeza de cómo estos factores influyen en los procesos diferentes procesos del sistema geotérmico, principalmente en la recarga y la descarga
- Se recomienda hacer un estudio de los suelos que se encuentran en el área de estudios con el objetivo de determinar sus propiedades, es especial, la determinación de su capacidad de almacenamiento, lo cual permitiría determinar con mejor calidad los procesos de infiltración, y por consiguiente se tendría un valor mucho más cercano a la realidad de la recarga del reservorio geotérmico.
- Se recomienda hacer un mantenimiento adecuado de las estaciones propiedad de CHEC, que permitan hacer un seguimiento constante de las condiciones climáticas del área de estudio, además de tener información de la mejor calidad en donde se puedan reducir los errores o datos anómalos en las series de datos.
- Se recomienda construir un modelo hidrogeológico que permita determinar con mayor certeza los patrones de circulación de las aguas meteóricas, desde el momento de su infiltración, hasta el momento de su descarga en las diferentes zonas de manifestaciones termales.

15. Referencias

Alfaro, C., Aguirre, A., & Jaramillo, L. F. (2002). Inventario de fuentes termales en el Parque Nacional Natural de los Nevados. Ministerio de Minas y Energía, INGEOMINAS, Bogotá, 101.

Alfaro, C., Alvarado, I., Quintero, W., Hamza, W., Vargas, C., & Briceño, L. (2009). Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia. In XII Congreso Colombiano de Geología (pp. 1-24).

Almaguer Rodríguez, J. D. L. (2013). Estudio magnetotelúrico con fines de interés geotérmico en el sector norte del Nevado de Ruiz, Colombia. Centro de Geociencias. Programa de Posgrado de Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. Juriquilla, QRO.

Angot, A. (1897). Régime des pluies de Léurope occidentale. An. Bur. Central Mét, 1, 155-192.

Arango-Palacio, E., Robayo Jara, C. F., & Chica Martínez, P. A. (2017). Caracterización geomorfológica y morfometría del Volcán Cerro Bravo, Tolima-Colombia.

Aricapa, V.C. (2020). Estudio de recursos naturales en el área de Villamaría y Santa Rosa de Cabal. Tesis grado Geología. Universidad de Caldas.

Blanco-Quintero, I. F., García-Casco, A., Toro, L. M., Moreno, M., Ruiz, E. C., Vinasco, C. J., ... & Morata, D. (2014). Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *International Geology Review*, 56(15), 1852-1872.

Béjar, M. V. (2004). Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Borrero, C. A., Parra, Y. A., & Ospina, J. C. (2006). Origen del Depósito Freatomágmató de la Cabaña, Cuenca Baja del Río Chinchiná, Caldas-Colombia. *Boletín de Geología*, 28(1), 49-59.

Botero Arango, G. (1963). Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales de la Facultad Nacional de Minas*, (57), 1-102.

Botero-Gómez, L. A., Osorio, P., Murcia, H., Borrero, C., & Grajales, J. A. (2018). Campo Volcánico Monogénico Villamaría-Termale, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte I): Características morfológicas y relaciones temporales. *Boletín de Geología*, 40(3), 85-102.

Bourdon, E., Eissen, J. P., Gutscher, M. A., Monzier, M., Hall, M. L., & Cotten, J. (2003). Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, 205(3-4), 123-138.

Carrascal, C. D. R., Maya, M. D. P. A., Elena, M., Lagoueyte, G., & Jaramillo, P. A. Z. Páramos, Fábricas Naturales De Agua Bajo Condiciones Climáticas Cambiantes. Páramos, Fábricas Naturales De Agua Bajo Condiciones Climáticas Cambiantes..... 23, 23.

Case, J. E., Duras, S. L. G., Alfonso, L. R., & Moore, W. R. (1971). Tectonic investigations in western Colombia and eastern Panama. *Geological Society of America Bulletin*, 82(10), 2685-2712.

Chamorro, D. E. E., Carvajal, A. L., & Zuluaga, B. H. A. (2015). Estudio del impacto de los fluidos volcánicos en el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná. *Gestión y Ambiente*, 18(2), 81-93.

Ceballos Gutiérrez, D., & Gómez Florido, J. E. (2022). Análisis técnico y de percepción del riesgo por lahares producidos por la erupción del Volcán Nevado del Ruiz desde el punto de

unión de Río Claro con el Río Chinchiná hasta el sector de Cenicafé, Municipio de Chinchiná–Caldas.

Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), Ente Nazionale per L'energia Elettrica (ENEL). (1968). Proyecto de Investigación Geotérmica en la Región del Macizo Volcánico del Ruiz. Translation. 41 p. Manizales.

Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), Ente Nazionale per L'energia Elettrica (ENEL). (1981). Investigación Geotérmica en la Región del macizo Volcánico del Ruiz.

Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL), Consultoría Técnica Colombiana LTDA. (CONTECOL) & Geotérmica Italiana. (1981). Investigación Geotérmica. Macizo volcánico del Ruiz. Fase I. Bogotá.

Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL), Consultoría Técnica Colombiana LTDA. (CONTECOL) & Geotérmica Italiana. (1983). Investigación Geotérmica. Macizo volcánico del Ruiz. Fase II, Etapa A. Vol. I, II, III y IV. Bogotá.

CICERO, A. R., ORTEGA, A. M., TORRES, M. F., GARCÍA, P. C., & MASSOLA, C. Análisis Agroclimático De Las Precipitaciones De Chacras De Coria, Parte II.

Claro, R. F. (1991). Balance hídrico. HIMAT, Bogotá.

Claro, R. F. (2006). Índice de disponibilidad Hídrica (IDH). HIMAT, Bogotá, Colombia.

Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD). (2017). Actualización del Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de Villamaría, Caldas.

Delgado López, M. E. (2020). Clasificación de cobertura del suelo con metodología Land Cover en el Parque Nacional Natural Los Nevados.

Dewhurst Group. (2013). Estudios de actualización y complementación de potencial geotérmico en la zona de Nereidas del Complejo Volcánico del Ruiz [Informe técnico]. Fase I.

Dewhurst Group. (2016). Estudios de actualización y complementación de potencial geotérmico en la zona de Nereidas del Complejo Volcánico del Ruiz [Informe técnico]. Fase II.

Freymueller, J. T., Kellogg, J. N., & Vega, V. (1993). Plate Motions in the north Andean region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B12), 21853–21863.

G. Allen, Richard, S. Pereira, Luis, Raes, Dirk, Smith, Martin. FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo Estudio riego y drenaje. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147846>

García- Beltrán, N. (2021). Análisis de discontinuidades estructurales en el área del Valle de Nereidas, Villamaría, Caldas. Universidad de Caldas.

GEOCOM. (s.f.). Geothermal Systems and Technologies Course Introduction Nature of GE Resources. [Material del curso].

Geoconsul., EPN Internacional., Perforadora Latina. (1992). Evaluación geotérmica del macizo volcánico del Ruiz, Colombia. Informe final. 78 p. Morelia, México.

González Iregui, H. (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). *Boletín Geológico*, 23(1), 3–174. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol23.1.1980.396>

González, H. (1993). Mapa geológico de Caldas, escala 1: 250.000. Memoria Explicativa. INGEOMINAS. Bogotá, 62p.

Grosse, E. (1926). Estudio geológico del Terciario carbonífero de Antioquia, en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia, entre el río Arma y Sacaoyal.

Guirado, S. G., & Bermúdez, F. L. (2011). Tendencia de las precipitaciones y temperaturas en una pequeña cuenca fluvial del sureste peninsular semiárido. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles.

Herd, D. G. (1974). Glacial and volcanic geology of the Ruiz-Tolima volcanic complex. Cordillera Central, Colombia [Ph. D. dissert.: Seattle. Washington, University of Washington.

Hincapié-Jaramillo, G. (2013). Análisis estructural en la zona del proyecto geotérmico de EPM-CHEC.

Hincapié-Jaramillo, G. (2014). Análisis estructural en la zona del proyecto geotérmico de EPM-CHEC, Segunda fase.

IDEAM, U. (2018). Variabilidad climática y cambio climático en Colombia. Bogotá: IDEAM. Available online at: <http://www.andi.com.co/Uploads/variabilidad.pdf>.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2014). Clasificación climática de Caldas – Lang.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). Instructivo Zonificación Climática.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (s.f.). Balance hídrico y sus aplicaciones.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2005). CALDAS_SUELOS_VF [Archivo geoespacial]. IGAC Portal de Datos Abiertos. Recuperado de <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

Irving, E. M. (1971). La evolución estructural de los andes más septentrionales de Colombia. Boletín Geológico, 19(2), 1–90.

Jaramillo, A. (2005). Clima andino y café en Colombia.

Jaramillo, A. (1982). Balance hídrico de la zona cafetera colombiana.

LaGeo S.A. de C.V. (2016). Informe de síntesis de Geología.

- LaGeo S.A. de C.V. (2016). Modelo Geotérmico.
- LaGeo S.A. de C.V. (2016). Síntesis de Geofísica y modelo 3D MT.
- LaGeo S.A. de C.V. (2016). Síntesis de Geoquímica.
- Londoño, J. M., & Sudo, Y. (2002). A warning model based on temporal changes of coda Q for volcanic activity at Nevado Del Ruiz Volcano, Colombia. *Bulletin of volcanology*, 64, 303-315.
- López, J., Cuéllar, M. A., Aguirre, R., Valencia, M., & Sánchez, A. (2007). Evidencias petrográficas y de campo de una intrusión sintectónica en la Cordillera Central de Colombia: El Caso de la Milonita Granítica del Guacaica. Bucaramanga. CD Room.
- Marín, V. (2010). Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/7128>.
- Marzolf, N. C. (2014). Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia. Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo, 86.
- Maya, M., & González, H. (1995). Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín geológico*, 35(2-3), 44-57.
- Meissnar, R. O., Flueh, E. R., Stibane, F., & Berg, E. (1976). Dynamics of the active plate boundary in southwest Colombia according to recent geophysical measurements. *Tectonophysics*, 35(1-3), 115–136. doi:10.1016/0040-1951(76)90032-9
- Mejía, E. L., Velandia, F., Zuluaga, C. A., López, J. A., & Cramer, T. (2012). Análisis estructural al noreste del volcán Nevado del Ruíz, Colombia-Aporte a la exploración geotérmica. *Boletín de Geología*, 34(1), 27-41.

Mejía, F., & Botero, B. A. (2009). Monitoreo Hidrometeoro-lógico de los glaciares del Parque Nacional Natural Los Nevados. Glaciares, Nieves y Hielos de América Latina. Cambio Climático y Amenazas. Colección Glaciares, Nevados y Medio Ambiente. Editores: CD López y Ramírez J. Instituto Colombiano de Geología y Minería, Bogotá.

Monsalve, M. L., & Méndez, R. (1997). Geología superficial del área geotérmica de Nereidas (Nevado del Ruiz). Manizales: INGEOMINAS, 21.

Montealegre, B. J. (1990). Técnicas estadísticas aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos.

Moreno Castellanos, J. G. (2012). Método de detección temprana de outliers.

Moreno Sánchez, M., Gómez Cruz, A. D. J., & Toro, L. M. (2008). Proveniencia del material clástico del Complejo Quebradagrande y su relación con los complejos estructurales adyacentes. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (22), 27-38

Murcia & Jiménez. (2022). Análisis técnico económico de un sistema de intercambiador de calor de pozo profundo, para alimentar sistemas de producción de electricidad y usos directos del calor, extrayendo la energía geotérmica disponible: caso pozo Nereidas 1. Manizales. Colombia.

Navarro Piedrahita, J. (2008). Caracterización de las áreas fuente de sedimentos y cuantificación de la tasa de sedimentación en la cuenca del río Claro y su influencia en el embalse Camaguadua.

Nelson, H. W. (1957). Contribution to the geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the sector between Ibagué and Cali. *Leidse Geologische Mededelingen*, 22(1), 1-75.

Núñez Ravelo, F., Hernández Labrador, M., & Ugas Pérez, M. (2017). Geomorfología de la duna remontante ubicada en el acantilado sur del Castillo de Araya, estado Sucre (Venezuela). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 26(1), 51-63.

OLADE, Organización Latinoamericana de Energía. 1994. *Guía Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmicos*. Quito, Ecuador.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2008). *Comprender los efectos a escala mundial*.

Organización Meteorológica Mundial (OMN). (2018). *Guía de Prácticas Climatológicas No. 100*.

Osorio, P., Botero-Gómez, L. A., Murcia, H., Borrero, C., & Grajales, J. A. (2018). Campo Volcánico Monogénico Villamaría-Termal, Cordillera Central, Andes colombianos (Parte II): Características composicionales. *Boletín de Geología*, 40(3), 103-123.

Oviedo, M. J., Blessent, D., López-Sánchez, J., & Raymond, J. (2023). Contribution to the characterization of the Nevado del Ruiz geothermal conceptual model based on rock properties dataset. *Journal of South American Earth Sciences*, 124, 104259.

Pabón Caicedo, J. D., Zea Mazo, J. A., León Aristizabal, G. E., Montealegre Bocanegra, J. E., Hurtado Moreno, G., & González Gómez, O. C. (1998). *La atmósfera, el tiempo y el clima*.

Paris, G., & Romero L., J. A. (1994). Fallas activas en Colombia. *Boletín Geológico*, 34(2-3), 4–25. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol34.2-3.1994.347>

Rayo Rocha, L. D. P. (2012). *Evolución geoquímica y térmica del volcán Nevado del Ruiz, Colombia*. Departamento de Geociencias.

Rodríguez, joselin de L. A. (2013). *Estudios magnetotélúricos con fines de interés geotérmico en el sector norte del Nevado del Ruíz*. Universidad Nacional Autónoma de México

Rodríguez Sierra, G. I., Mendez Fajury, R. A., Bernal Cortes, N. F., & Monsalve Bustamante, M. L. (1997, septiembre). Informe de la geología del Pozo Nereidas 1 contrato Geoenergía Andina S.A. - GESA. INGEOMINAS.

Román González, L. F. (2021). Aporte de aguas termales proyecto Valle de Nereidas-zona Botero Londoño. Municipio de Villamaría Caldas.

Rose, C. W. (2004). An introduction to the environmental physics of soil, water and watersheds. Cambridge University Press.

Sánchez San Román, F. J. (2019). Hidrología, 2018-19.

Schaefer, S.J. (1995). Nevado del Ruiz Volcano Colombia: magmatic system and evolution. Thesis Degree of Doctor of Philosophy. Arizona State University, Arizona. 147p

Servicio Geológico Colombiano. (2012). INVTERMALES. Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales. Consultado el 18 de noviembre de 2019. <http://hidrotermales.sgc.gov.co/invtermales/>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2013). Caracterización Hidroclimática, Cuenca Río Chicama.

Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME), IDEAM. Datos abiertos

Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC). Datos abiertos.

Strycon S.A.S. (2017). Estudio de impacto ambiental proyecto geotérmico macizo volcánico del Ruiz. etapa exploratoria. Atmósfera y clima. 103p.

Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., & Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes. *Tectonics*, 19(5), 787–813.

Taborda Ortiz, M. A. (2019). Informe de resultados muestras núcleos [Informe de laboratorio]. Laboratoire ouvert de géothermie (LOG), Quebec, Canadá. Revisado por: Lopez, I. J. & Blessent, D., docentes Universidad de Medellín.

Tamayo, A. L., & Arias, F. I. M. (2004). El retroceso glaciar del Volcán Nevado Santa Isabel y su incidencia hídrica en la ciudad de Pereira. Glaciares, nieves y hielos de América Latina, 19.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical review, 38(1), 55-94.

Thornthwaite, C.W. y Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publ. Climatol., 10(3): 185-311.

Thouret, J. C., Cantagrel, J. M., Salinas, R., & Murcia, A. (1990). Quaternary eruptive history of Nevado del Ruiz (Colombia). Journal of Volcanology and Geothermal Research, 41(1-4), 225-251.

Universidad de Medellín, & Asociación Geotérmica Colombiana-AGEOCOL. (2023). Geotermia, el calor de La Tierra como energía renovable [Apuntes de curso]. Recuperado de <https://uvirtual.udemedellin.edu.co/course/view.php?id=3926>

Universidad Nacional de Colombia, & CORPOCALDAS. (2015). CDIAC - Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas. Recuperado de cdiac.manizales.unal.edu.co/ el 7 de noviembre de 2022.

Vélez, M. I., Parra-Palacio, E., Córdoba, S., López-Sánchez, J., & Raymond, J. (2018). Geothermal potential assessment of the Nevado del Ruiz Volcano based on rock thermal conductivity measurements and numerical modeling of heat transfer. Journal of South American Earth Sciences, 81, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.11.011>

Vinasco, C. J., Cordani, U. G., González, H., Weber, M. A., & Pelaez, C. (2006). Geochronological, isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 355-371.

Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., & Beltrán, A. (2011). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3-4), 875–896. doi:10.1016/j.lithos.2011.05.003

Water Resources Council US. (1982). Guidelines for Determining Flood Flow Frequency, Revised Bulletin 17B of the Hydrology Committee.

Anexo 1. Registro original de precipitación de las estaciones utilizadas a partir de las plataformas DHIME y SIMAC.

Estación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Papayal	2016	55	62	218	198	195	129	129	35	127	183	231	281
	2017	185	54,3	259,8	168,9	242,9	142,1	53,3	60,7	91,1	251	316,9	166,5
	2018	75,9	367,5	287,4	183,1	207,1	55,3	81,9	62,9	111,8	266,6	258,5	42,9
	2019	83,4	121,7	266,2	240,6	235,7	90,9	108,9	30	103,4	94,5	203,9	166,3
	2020	25,8	40	115,1	91		83,9	91,6	133,5	147,6	135,3	139	140
	2021	46	170,4	264,3	216,1	239,8	341,4	266,5	202,7	162,1	104,3	275,5	148,1
	2022	180	151,4	176,3	239,8	207,1	271,7	67,9	64,3	111,3			
Las Brisas	2016	27,1	92	72,1	152,3	14	88	109,8	56,9	96,1	6	240	104,1
	2017	97,7	48,6	293	157,4	272,3	156,9			85,1	123,6	161	
	2018		108,2	155,5	178,4	262,5	87,4	96,6	68,9	41	217,4	110,8	44,7
	2019	61	111,7	157,4	156,3	181,1		57,8	16,7	107,3	162,2	140,9	68,6
	2020	45,3	53,7	68,1	90,6	103,2	121,6	104,1	126,8	156,2	136,5	139	50,2
	2021	38,1	189,8	247,5	110,4	209,3	202,5	90,6	223,6	114,7	140,8	150	60,8
	2022	81,7	160,3	175,6	349	161,7							
Río Claro - La Batea	2016												125,6
	2017	187,8	0	178,2	174,4	361,4	151,2	0	70,4	46,4	54,2	400,4	130,6
	2018	128	307,6	290	230,6	230,4	77,4	105,2	79,8	138,6	378,8	218,6	73,4
	2019	82	139,2	230,4	211,2	210,4	26,4	0	0	8,2	0,2	0	0
	2020	0	0	1,8	9,4	3,6	15	25,6	7,4	32	12,6	66,6	220,8
	2021	453	1078,2	1268,8	731,4	1024,6	969	264,2	292,8	649,8	281,8	227,8	174,2
	2022	7,4	120,6	147,2									
Río Claro - La Guayana	2016		228,54	111,4	53,8	130	44,4	52,2	39,2	125,4	175,6	174,2	202,4
	2017	164,2	117,8	161,6	146,8	271,2	158,4	55,2	67,4	127,4	29,2	12	5
	2018	4,4	2,6	187	203,4	223	62	104	37	81,6	135	270	244,4
	2019	80,4	73,8	199,2	249,6	321,2	190,4	79,6	110,4	113,4	143,6	246	217,4
	2020	85,4	42,6	95,8	163,4	89,8	117,8	103,6	98,6	87,6	77,2	2	0
	2021	0	0	0	0	0	0	0	0			93,6	151,4
	2022	180,2	150,2	242,6	296,6	132,6	180,4	100	104,4	118,6	219,2		
Q. Molinos - P.N.N.N.	2016	20,8	63,2	20,4		60	41,8	52,4	11,4	59,8	118,6	157,8	75
	2017	74,4	356	225,8	114,2	152,2	98,4	26,6	40,4	60	96,6	145,2	88,4
	2018	54	97,4	119,2	108,8	67,8	33,6						
	2019		66	146,2	145,8	139,4	40,2	0	0	0			2,4
	2020	18,6	2	8	2	6,8	4,8	0	10,2	11,4	8,8	0	0
	2021	0	0	0,2	4,6	6,6	6	0					
	2022												
Q. Nereidas - P.N.N.N.	2016	19	46,8	32,2	95,6	29	32,6	163,8	30,6	59,4	83,2	117,8	209,6
	2017	42,4	41,8	153,8	88,6	146,2	86,8	38,8	165,2	64,4	73,8	117,6	84,8
	2018	38	78,2	84,6	90,8	122,4	95,6	30,4	2,6	4,8	14,4	7,2	4,6
	2019	11,8	6,4	9,2	14,2	6	0,4	0	0	0	0	0	42,6
	2020	34,2	36,2	43,2	62,4	73,8	117,8	86,2	114,6	78,2	76,6		
	2022									58,4	187,2		
Río Claro - P.N.N.N.	2016	16,6	358,2	70,2	192,6	170,6	151,2	233	64,2	152	118,4	156,8	64
	2017	57,6	193,4	177	145,8	170,4	168,8	1538,8	125	108,6	102,6	114,2	69,2
	2018	50	72,8	117,2	150,4	197,4	217,6	210,6	116,2	77,2	136,8	108,4	26,4

	2019	41,2	101,8	234,6	161	149,2	146,6	152,4	30	109,6	162,6	111,8	64,4
	2020	41,6	46	45	75,4	111,2	168,2	176	147,8	153,8	103	52,2	
	2021												
	2022									74,6	161,4		
Santa Isabel - P.N.N.N.	2016	16,6	45,2	56	103,2	144,6	82	353,6	76,4	117	107	92,8	41
	2017	63,6	21,6	259,6	185,8	441	730,4	715,2	269,2	151,6	188,4	129,8	93,2
	2018	65,2	84,8	88,6	407,8	838,4	2409	4412,6	885,6	396	264,2	444,2	34,2
	2019	37,8	146,6	233,2	369,8	535,4	40,2	0	0	1,6	0	0	3,2
	2020	0	0	0	0	0	0	0		2,2	22	0	0
	2021	18,2	0,4	0	9,6	0	0	0	0		20,2	85,6	28,8
	2022	48,8	74,4	123,2	135,4	188,4	167	129	96	128,4	134,8		
Q. Nereidas - CHEC	2016				26,8	115,2	43	57,8	23,6	73,4	154	160	166,4
	2017	85,6	47,8	29,4	8,4	164,8	139	43,4	56,8	61,2	93,6	161,6	99
	2018	50,6	110,8	112,4	189,6	102,2	21,8	59,8	57,4	0,6	221,6	141,2	47,6
	2019	37,4	59,4	67,4	53,4	76	33,8	11,2	1	0	0		
	2020	2,8	66,2	70,4	86,6	34	73	59,2	90,6	61,6	107,6	136,4	45,4
	2021	14,8	60,6	7,4	12,8	9,4	0,2	9,2	39,6	28,2	55	0	65,8
	2022	99,8	104,8	185	153,4	11,4	42	16	2	0			
Pirineos - CHEC	2016				37	553	204	313		233	600	903	400
	2017	456	280	1163,2	103	169,6	114	26,4	45,8	67,8	147,6	152	108
	2018	57,4	100,4	100,4	150,6	157,6	36	44,8	38,2	67,8	226	131	45
	2019	27,4	79,8	108,8	139	121	54,2	24,4	6,6	60,2	94,8	109,8	60
	2020	43,4	43,6	83,4	72,8	36,8	0	32	98,8	77,2	123,2	156,8	92
	2021	29,8	182,8	230,2	95,2	143,8	105,2	48,8	102,8	69	132,2	131,4	65,2
	2022	90,4	147,8	163,4	182,2	104,2	118,8	41,2	6,4	48,8			