



Universidad **Mariana**

Oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática- Microcuenca Dolores del municipio de
Pasto - Nariño

Nombre completo del autor(es)
Guerra Fajardo German Esteban
Pallares Chaves Diana Carolina
Tautas Meneses Deivy Yeferson
Vallejo Rodríguez Brayan Guillermo

Universidad Mariana
Facultad ingeniería
Programa de ingeniería civil
San Juan de Pasto
2023

Oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática- Microcuenca Dolores del municipio de
Pasto - Nariño

Nombre completo del autor(es)
Guerra Fajardo German Esteban
Pallares Chaves Diana Carolina
Tautas Meneses Deivy Yeferson
Vallejo Rodríguez Brayan Guillermo

Informe de investigación para optar al título de: ingeniero civil

Ing. Lorena Lucia Salazar Gámez
Asesor

Universidad Mariana
Facultad ingeniería
Programa de ingeniería civil
San Juan de Pasto
2023

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007
Universidad Mariana

Agradecimientos

Los autores expresan sus profundos agradecimientos a:

Dios que es la base fundamental quien con su protección y bendición a permitido lograr alcanzar con éxitos nuestras metas en la vida.

Nuestras familias por ser el apoyo incondicional y el motor para salir adelante.

A la comunidad de Mocondino quien nos brindaron el espacio de desarrollar el trabajo de investigación en su área.

A los docentes de la universidad Mariana, especialmente a nuestra asesora Ing. Lorena Salazar Gámez, quien con su conocimiento guio nuestra investigación.

Contenido

Introducción	15
1. Resumen del proyecto	16
1.1. Descripción del problema	16
1.1.1. Formulación del problema	17
1.2. Justificación.....	17
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo general.....	18
1.3.2. Objetivos específicos	18
1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos	18
1.4.1. Antecedentes	18
1.4.1.1. Internacionales	18
1.4.1.2. Nacionales.	19
1.4.1.3. Regionales.	20
1.4.2. Marco teórico	20
1.4.2.1. Cuenca hidrológica.....	20
1.4.2.2. Caracterización hidrológica.....	22
1.4.2.3. Oferta hídrica.....	24
1.4.2.4. Cambio climático.	25
1.4.2.5. Variabilidad climática	27
1.4.2.5.1 Fenómeno del niño.	28
1.4.2.5.2 Fenómeno de la niña	28
1.4.2.6. Modelación hidrológica.....	29
1.4.2.6.1. Modelo hidrológico WEAP.....	31
1.4.2.6.2. Modelo hidrológico Hydro- Bid.....	31
1.4.2.6.2. Modelo hidrológico SWAT.....	31

1.4.1. Marco contextual	32
1.4.2. Marco legal	34
1.4.2.1. Ley ambiental y plan de desarrollo ambiental.....	34
1.4.2.2 Ley de desarrollo rural sostenible	35
1.4.2.3 Ley general de aguas	36
1.4.2.4 Tratados internacionales.....	37
1.4.2.5 Ley de cambio climático	38
1.4.2.6 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).....	39
1.5. Metodología	40
1.5.1 Caracterizar la microcuenca hidrográfica Dolores desde una perspectiva socioeconómica, climática e hidrológica	40
1.5.1.1 Primera etapa, Caracterización socioeconómica	40
1.5.1.2 Segunda etapa, Caracterización hidrológica	41
1.5.1.3 Tercera etapa, Caracterización climática.....	41
1.5.2 Determinar el escurrimiento superficial y el caudal máximo en la microcuenca hidrográfica Dolores.	41
1.5.2.1 Primera etapa, Determinar el escurrimiento superficial.....	41
1.5.2.2 Segunda etapa, Determinar el caudal máximo.	42
1.5.3 Evaluar la oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática mediante la elaboración de un modelo hidrológico en la microcuenca hidrográfica Dolores.	42
1.5.3.1 Calibración y validación del modelo.....	42
1.5.3.2 Segunda etapa, Escenarios de variabilidad climática.....	42
1.5.3.2 Segunda etapa, Análisis de la oferta hídrica.....	43
1.5.1. Paradigma de investigación	47
1.5.2. Enfoque de investigación.....	47
1.5.3. Tipo de investigación.....	47

1.5.4. Población y muestra / Unidad de trabajo y unidad de análisis	48
1.5.5. Técnica e instrumentos de recolección de información	48
1.5.5.1. Las técnicas de investigación	48
1.5.5.2. Instrumentos de investigación	50
2. Presentación de resultados	52
2.1. Análisis e interpretación de resultados	53
2.1.1. Caracterizar socioeconómica, climática e hidrológicamente la microcuenca Dolores	53
2.2.1.1. Localización geográfica	53
2.2.1.2. Caracterización socioeconómica	55
2.2.1.2.1. Dimensión social.	56
2.2.1.2.2. Dimensión económica	60
2.2.1.2.3. Identificación de la problemática actual.....	61
2.2.1.2.4 Identificación y evaluación de la problemática actual.	64
2.2.1.3. Caracterización hidrológica.....	66
2.2.1.3.1. Caracterización morfométrica	66
2.1.1.5.3. Clasificación según el área	67
2.1.1.5.4. Parámetros de forma.....	68
2.1.1.5.5. Representación del relieve	71
2.1.1.5.6. Rectángulo equivalente.	72
2.1.1.5.7. Pendiente de la microcuenca	75
2.1.1.5.8. Pendiente media del cauce principal.	79
2.1.1.5.8. Curvas representativas.....	81
2.1.1.5.9. Elevación media.	84
2.1.1.5.9. Red de drenaje	86
2.2.1.6. Caracterización climática	87
2.2.1.6.1. Polígono de Thyssen.	89

2.2.1.6.2. Información hidrometeorológica	90
2.2.1.6.2.5. Evaporación.....	96
2.2.2. Determinar el escurrimiento superficial y el caudal máximo en la cuenca hidrográfica Dolores.	98
2.2.2.1. Escurrimiento superficial.	98
2.2.2.1.1. Localización de las estaciones de aforo.	98
2.2.2.1.2. Recolección de información en campo.	99
2.2.2.2. Caudal máximo.	111
2.2.2.2.1 Coeficiente de escorrentía	111
2.2.2.2.2. Intensidad de precipitación.....	114
2.2.3. Determinar el escurrimiento superficial y el caudal máximo en la cuenca hidrográfica Dolores.	120
2.2.3.1 Modelación hidrológica.....	120
2.2.3.1.1 Construcción del modelo.....	120
2.2.3.2. Escenarios de variabilidad climática	137
2.2.3.2.1. Escenarios de cambio de temperatura	137
2.2.3.2.2. Escenarios de cambio de precipitación.	138
2.2.3.3. Estimación oferta hídrica	140
3. Conclusiones	145
4. Recomendaciones.....	148
5. Glosario	150
Referencias bibliográficas	152

Índice de Tablas

Tabla 1. Marco legal ley 99 de 1993	34
Tabla 2. Marco legal ley 152 de 1994	35
Tabla 3. Marco legal ley 373 de 1997	36
Tabla 4. Tratados internacionales.....	37
Tabla 5. Marco legal ley 1930 de 2018	38
Tabla 6. Objetivos de desarrollo sostenible.....	39
Tabla 7. Metodología.....	43
Tabla 8. Coordenadas geográficas microcuenca	53
Tabla 9. Información geográfica	54
Tabla 10. Identificación y evaluación problemática ambiental	65
Tabla 11. Parámetros físicos y forma	67
Tabla 12. Clasificación de una cuenca según el área.....	67
Tabla 13. Índice de compacidad (Kc).....	70
Tabla 14. Clasificación parámetros físicos y forma	70
Tabla 15. Información rectángulo equivalente	74
Tabla 16. Información pendiente de la cuenca	76
Tabla 17. Información perfil longitudinal del curso del agua	78
Tabla 18. Información pendiente media del cauce principal.....	79
Tabla 19. Información curvas representativas	81
Tabla 20. Información elevación media	84
Tabla 21. Informaciones coordenadas UTM estaciones.....	89
Tabla 22. Informaciones precipitación media anual estación Botana	91
Tabla 23. Información temperatura estación Botana.....	92
Tabla 24. Información humedad relativa estación Botana	94
Tabla 25. Información brillo solar estación Botana	95
Tabla 26. Información evaporación estación Botana	97
Tabla 27. Información ubicación geográfica estación de aforo.....	99
Tabla 28. Información sección transversal sección A-B estación de aforo uno.....	101
Tabla 29. Información sección transversal sección A-B estación de aforo dos	103
Tabla 30. Información sección transversal sección A-B estación de aforo tres	105

Tabla 31. Información sección transversal sección A-B de las estaciones de aforo	106
Tabla 32. Información tiempo registrado y promedio del flotador estación uno	107
Tabla 33. Información tiempo registrado y promedio del flotador estación dos.....	107
Tabla 34. Información tiempo registrado y promedio del flotador estación tres.....	108
Tabla 35. Velocidad promedio de aforo	108
Tabla 36. Velocidad promedio corregidas de aforo	109
Tabla 37. Caudales de aforo	110
Tabla 38. Áreas respectivas del uso del suelo	113
Tabla 39. Coeficientes de escorrentías	113
Tabla 40. Precipitación máxima diaria anual	115
Tabla 41. Parámetros de ajustes	115
Tabla 42. Intensidad en periodos de retorno	116
Tabla 43. Intensidad de precipitación en diferentes periodos	119
Tabla 44. Caudales máximos.....	120
Tabla 45. Áreas respectivas del uso del suelo	123
Tabla 46. Reclasificación cobertura vegetal o uso de suelos	124
Tabla 47. Información de entrada al modelo climático.....	129
Tabla 48. Configuración archivos de entrada modelo climático.....	130
Tabla 49. Parámetros de calibración	131
Tabla 50. Estadísticos generados para la modelación de caudales microcuenca Mijitayo.....	135
Tabla 51. Volumen del flujo total.....	136
Tabla 52. Oferta hídrica bajo escenarios de variabilidad climática.....	142

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de interacción en la modelación hidrológica.....	30
Figura 2. Corregimiento de Mocondino, Municipio de Pasto.....	32
Figura 3. Ubicación geográfica y límites pertenecientes a la cuenca Dolores	33
Figura 4. Vista satelital ubicación microcuenca Dolores en relación al municipio de Pasto	53
Figura 5. Vista satelital ubicación microcuenca Dolores	54
Figura 6. Información geográfica microcuenca Dolores.....	55
Figura 7. Institución educativa señora de la Visitación sector de Mocondino centro.....	57
Figura 8. Vivienda típica residencial corregimiento de Mocondino	58
Figura 9. Tanque de almacenamiento de agua sector Mocondino alto	59
Figura 10. Alcantarillado salón comunal Mocondino centro	60
Figura 11. Cultivo de papa Mocondino alto.....	61
Figura 12. Ganado vacuno Mocondino centro	62
Figura 13. Identificación de la problemática ambiental	64
Figura 14. Factor de forma (Kf)	68
Figura 15. Índice de circularidad (Ic).....	69
Figura 16. Curvas de elevación o nivel microcuenca Dolores	71
Figura 17. Representación del rectángulo equivalente.....	75
Figura 18. Representación perfil longitudinal del curso del agua	78
Figura 19. Representación curva hipsométrica	82
Figura 20. Representación clasificación de la curva hipsométrica	83
Figura 21. Representación clasificación de la curva de frecuencia de altitudes	83
Figura 22. Representación elevación media.....	83
Figura 23. Representación red de drenaje	84
Figura 24. Representación ubicación estaciones climáticas municipio de Pasto	88
Figura 25. Representación polígono de Thyssen.....	89
Figura 26. Representación precipitación anual media anual estación Botana.....	91
Figura 27. Representación temperatura máxima, media y mínima estación Botana.....	92
Figura 28. Representación temperatura y precipitación diaria estación Botana.....	93
Figura 29. Representación humedad relativa estación Botana.....	95
Figura 30. Representación humedad relativa estación Botana.....	96

Figura 31. Representación evaporación estación Botana.....	97
Figura 32. Estaciones de aforo del escurrimiento superficial	99
Figura 33. Longitud sección A-B estación de aforo uno.....	100
Figura 34. Profundidad sección A-B estación de aforo uno	100
Figura 35. Sección transversal sección A-B estación de aforo uno	101
Figura 36. Longitud sección A-B estación de aforo dos	102
Figura 37. Profundidad sección A-B estación de aforo dos	102
Figura 38. Sección transversal sección A-B estación de aforo dos.....	103
Figura 39. Longitud sección A-B estación de aforo tres.....	104
Figura 40. Profundidad sección A-B estación de aforo tres.....	104
Figura 41. Sección transversal sección A-B estación de aforo tres.....	105
Figura 42. Resultados de caudales obtenidos por el método del flotador	110
Figura 43. Uso de suelos área microcuenca Dolores.....	112
Figura 44. Curva IDF (intensidad-duración-frecuencia).....	117
Figura 45. Intensidad de precipitación	119
Figura 46. Modelo de elevación shp. Microcuenca Dolores	121
Figura 47. Modelo de elevación y localización shp. Microcuenca Dolores.....	121
Figura 48. Área y red hídrica microcuenca Dolores	122
Figura 49. Uso de suelos departamento de Nariño.....	122
Figura 50. Uso de suelos departamento de Nariño.....	123
Figura 51. Método de regresión lineal para relleno de información-Precipitación.....	125
Figura 52. Precipitación media diaria periodo 1999-2020 estación Botana.....	126
Figura 53. Método de regresión lineal para relleno de información-Temperatura.....	127
Figura 54. Temperatura media diaria periodo 1999-2020 estación Botana	128
Figura 55. Diseño de carpetas para la modelación hidrológica.....	129
Figura 56. Diseño de archivos requeridos para la modelación.....	130
Figura 57. Modelo de calibración microcuenca hidrológica Dolores	132
Figura 58. Modelo de validación microcuenca hidrológica Dolores	133
Figura 59. Validaciones caudales acumulados.....	134
Figura 60. Modelo de información cuenca hidrográfica Dolores	135
Figura 61. Escenario de variabilidad de temperatura	137

Figura 62. Isotherma área microcuenca Dolores.....	138
Figura 63. Escenario de variabilidad de precipitación	139
Figura 64. Isoyetas área microcuenca Dolores.....	140
Figura 65. Análisis oferta hídrica Esc. 1 Temperatura.....	141
Figura 66. Análisis oferta hídrica Esc. 2 Precipitación	142
Figura 67. Modelación comparativa oferta hídrica	144

Índice de Anexos

Anexo A. Ubicación y límites geográficos microcuenca Dolores	155
Anexo B. Mapa conceptual sobre la problemática ambiental	156
Anexo C. Mapa topográfico microcuenca Dolores.....	157
Anexo D. Pendiente del cauce principal	159
Anexo E. Orden de las corrientes hidrológicas microcuenca Dolores.....	160
Anexo F. Polígono de Thyssen Estación Botana	161
Anexo G. Perfil transversal de las estaciones de aforo	162
Anexo H. Uso de suelos área microcuenca.....	164
Anexo I. Imagen satelital Shp. Microcuenca Dolores.....	165
Anexo J. Modelo climático ArcGIS.....	167

Introducción

La presente tesis, representa un esfuerzo fundamental en la exploración y comprensión de los efectos potenciales del cambio climático en la disponibilidad y distribución de los recursos hídricos, en un entorno global caracterizado por la creciente variabilidad climática y sus consecuencias asociadas, el estudio adquiere una relevancia sin precedentes al abordar uno de los desafíos más críticos en la gestión sostenible de los recursos naturales.

El cambio climático plantea incertidumbres significativas sobre el futuro de los recursos hídricos, cuya importancia trasciende el ámbito meramente hidrológico, la cuenca hidrográfica, como sistema interconectado y sensible, enfrenta la presión de las alteraciones en los patrones de temperatura y precipitación, así como la variabilidad en los flujos de agua superficiales y subterráneos (Maidment, 2002). En este sentido, el objetivo central de esta investigación radica en analizar los posibles escenarios futuros y evaluar sus implicaciones en la oferta hídrica de la microcuenca Dolores.

La metodología de esta investigación se sustenta en la combinación de dos pilares fundamentales: la modelación hidrológica y la proyección de escenarios climáticos, la modelación hidrológica, en su faceta más sofisticada y precisa, constituye una herramienta esencial para simular los procesos hidrológicos y sus interacciones en un entorno cambiante, paralelamente, la proyección de escenarios climáticos, basada en datos históricos y tendencias, otorga el fundamento necesario para explorar cómo las variables climáticas pueden influir en la dinámica del ciclo hidrológico.

Desde una perspectiva metodológica, el estudio se sustenta en la recopilación y análisis de datos climáticos e hidrológico, junto con la implementación de modelos hidrológicos que permiten simular el comportamiento del sistema hídrico ante diferentes condiciones climáticas, los resultados obtenidos no solo arrojarán luz sobre las potenciales modificaciones en la oferta hídrica, sino también ofrecerán una base sólida para la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídricos y la formulación de estrategias de adaptación y mitigación.

1. Resumen del proyecto

En la microcuenca Dolores ubicada en el municipio de San Juan de Pasto, perteneciente al río Pasto, se realizó un estudio con el propósito de evaluar la oferta hídrica ante escenarios de cambio climático, a partir de la recolección y procesamiento de la información para desarrollar un modelo el cual permita determinar la representación del proceso de variabilidad climática y la afectación a la unidad hidrológica a futuro.

El proceso metodológico empleado en la investigación consiste en recolectar y procesar la información perteneciente a la microcuenca hidrográfica en base a sus aspectos biofísicos y socioeconómicos, con el objetivo de elaborar un modelo hidrológico el cual evalué la variabilidad climática en un periodo de cincuenta años y con esto, analizar la afectación del recurso hídrico y la disponibilidad de la oferta hídrica de la cuenca ante la población abastecida.

1.1. Descripción del problema

El cambio climático actualmente es considerado una problemática a nivel mundial la cual ha tomado mayor importancia en los últimos años, en temas relacionados con la contaminación, la explotación de los recursos naturales y falta de políticas ambientales entorno a la conservación de los ecosistemas, como se conoce el comportamiento del planeta no es lineal, pero el registro de las últimas décadas determina una variabilidad climática considerable entorno a factores como la temperatura y las precipitaciones en cada región del planeta.(IPCC, 2007b). Teniendo en cuenta lo anterior, el recurso hídrico presenta alteraciones en sus patrones naturales generando sequias más prolongadas y precipitaciones más intensas, estos impactos combinados afectan la oferta y disponibilidad hídrica, lo que a su vez afectan actividades económicas y sociales. (Barros, V.2004).

A nivel regional, existen informes entorno a la relación de la oferta hídrica y el cambio climático en el departamento de Nariño, esto evidenciado en fenómenos climáticos denominado como el fenómeno del niño y de la niña, variando la intensidad y duración de las precipitaciones y las temperaturas en la región generando un impacto en la economía, la sociedad y el medio ambiente. (IDEAM, 2014b).

Esta investigación se enfoca en la microcuenca Dolores, ubicada en el corregimiento de Mocondino en el municipio de Pasto, para analizar la disponibilidad hídrica en el contexto de la variabilidad climática, la problemática actual surge del crecimiento demográfico del corregimiento, resultando en un consumo excesivo de agua, esta demanda se ve agravada por las actividades agrícolas y ganaderas que han tenido un impacto negativo en el ecosistema local, esto se traduce en la reducción de la cobertura vegetal debido a la explotación excesiva de los recursos naturales para las actividades económicas, estas acciones combinadas generan un impacto significativo en la oferta hídrica futura de la microcuenca, la investigación se centra en desarrollar un análisis que comprenda cómo la situación actual de la microcuenca, relacionada con el cambio climático, afectará su disponibilidad hídrica en diferentes escenarios de variabilidad climática.

1.1.1. Formulación del problema

¿Cuál es la afectación a veintidós años de la oferta hídrica de la microcuenca Dolores en el corregimiento de Mocondino, ante escenarios de variabilidad climática?

1.2. Justificación

El cambio climático es considerado una problemática mundial entorno a la variabilidad climática y la afectación en la sostenibilidad del recurso hídrico y los ecosistemas (IPCC,2014). En este contexto, las cuencas hidrográficas cumplen una función importante en el suministro de agua potable, regulación del clima y la conservación de la biodiversidad que en conjunto son un sistema complejo e interconectado que tienen un impacto significativo en la vida humana, por lo cual es esencial garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico.

Por esta razón, surge la idea de estudiar la relación de la oferta hídrica bajo escenarios de variabilidad climática en el contexto regional del municipio de San Juan de Pasto en la microcuenca Dolores perteneciente al corregimiento de Mocondino, con el fin de analizar a través de un modelo de escenario de cambio climático en un periodo de veintidós años la variabilidad climática y las consecuencias en términos de disponibilidad del agua para la población beneficiada, el uso de los modelos de escenarios climáticos brinda la información necesaria para la planificación y adaptación al cambio climático, permitiendo diseñar un modelo de representación con la información registrada en el área de estudio.

De acuerdo a lo anterior, la investigación y desarrollo del modelo hidrológico en la microcuenca Dolores se justifica debido a la necesidad de establecer estrategias para la gestión sostenible del agua en el área, proporcionando información fundamentada, lo cual permita entender y planificar cómo la variabilidad climática afecta la disponibilidad de agua a futuro en la microcuenca, esto con el propósito de facilitar la implementación de medidas efectivas para asegurar un suministro sostenible de agua mejorando la calidad de vida a futuro de la población del corregimiento de Mocondino.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la oferta hídrica de la microcuenca Dolores en el corregimiento de Mocondino ante escenarios futuros de variabilidad climática.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la microcuenca hidrográfica Dolores desde una perspectiva socioeconómica, climática e hidrológica.
- Determinar el escurrimiento superficial y el caudal máximo en la microcuenca hidrográfica Dolores.
- Evaluar la oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática mediante la elaboración de un modelo hidrológico en la microcuenca hidrográfica Dolores.

1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos

1.4.1. Antecedentes

En este capítulo se citan algunos trabajos internacionales, nacionales y regionales realizados para analizar la oferta hídrica en diferentes cuencas hidrográficas ante escenarios de cambio climático.

1.4.1.1. Internacionales. Según el estudio referente a la modelación de escenarios de cambio climático a nivel internacional se desarrolla en la cuenca hidrológica del río Taibilla

perteneciente a la provincia Albacete en España, en el año 2009, la investigación denominada “Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT”, en el cual se plantea cuantificar la información a través de simulaciones realizada mediante el modelo Soil And Water Assessment Tool, analizar la sensibilidad hidrológica de la cuenca a partir de escenarios derivados de diferentes modelos de circulación global siendo adaptados a modelos regionales como son el modelo RCP 8.5 y RCP 4.5 evaluando el impacto en las variaciones de precipitación y temperatura, en el cual los resultados obtenidos indican que para la mayor parte de los escenarios de cambio climático modelados, se producirá una reducción en la magnitud de los caudales medios mensuales y anuales, siendo esta variación mayor en las épocas de primavera y verano.

1.4.1.2. Nacionales. El estudio denominado “Modelación hidrológica cuenca La Vieja”, realiza por medio de la modelación hidrológica la evaluación de los escenarios de variabilidad climática en la cuenca La Vieja ubicada en el valle del Cauca perteneciente a los ríos Quindío y Barragán, la investigación tiene por objetivo analizar el comportamiento del Suministro Total de Agua Superficial en la cuenca bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para el período futuro de 2040-2070.

Para el periodo entre 2006-2019 se escogieron un total de 40 estaciones de lluvia, 9 estaciones de temperatura y 5 estaciones de caudal. Se han observado cambios y/o desplazamientos en el uso y cobertura del suelo desde el año 2000 al 2020, destacándose el reemplazo total, para el año 2020, de áreas agrícolas cubiertas con un volumen predominantemente de pastos. Posteriormente, la información recopilada se utilizó para ensamblar, calibrar y validar el módulo hidrológico del modelo SWAT. La calibración y validación del modelo se realizó en la estación de Cartago, sin embargo, la cantidad limitada de datos disponibles en una resolución anual fue insuficiente para lograr un mejor desempeño estadístico del modelo al realizarse la validación. Pese a lo anterior, el modelo se considera adecuado para el objetivo propuesto.

Una vez calibrado y validado el módulo hidrológico, se generaron y ejecutaron series futuras de variables de precipitación y temperatura presentes en el área, los resultados indican un incremento en la magnitud y frecuencia de los mayores caudales mensuales de agua entre 10% y 25%, en

comparación con registros históricos en la estación de Cartago, también se observa un aumento en la magnitud de caudales de agua con ocurrencia moderada y una disminución en la magnitud de caudales bajos 75% en la estación.

1.4.1.3. Regionales. En la investigación denominada “Modelación hidrológica de la microcuenca quebrada Mijitayo” ubicada en el municipio de San Juan de Pasto por medio de la universidad de Nariño y el programa de ingeniería agroforestal, se desarrolló el estudio de modelación hidrológica de la microcuenca, empleando el uso del modelo SWAT con el fin de analizar y evaluar el comportamiento del caudal ante la variación climática de temperatura y precipitación obteniendo como resultado se observa la variabilidad climática ante fenómenos naturales un aumento del caudal en época de precipitaciones y disminución del mismo en época de verano con el objetivo de identificar estrategias en puedan enfocar en las actividades de protección y conservación del recurso hídrico.

1.4.2. Marco teórico

1.4.2.1. Cuenca hidrológica. La cuenca hidrológica se define como una corriente donde todas las aguas de escorrentías se unen para formar un solo curso de agua, cada curso tiene una cuenca la cual define para cada punto de su recorrido, las cuencas están formadas por un entramado de ríos, arroyos y/o barrancos de mayor o menor entidad que conducen los flujos de agua hacia un cauce principal (Strahler, 1989).

Dentro de otras definiciones importantes que se tienen en el ámbito de la hidrología es el enfoque de una cuenca hidrográfica, la cual se conoce como el área que abarca el agua superficial o subterránea, la cual tiene un cauce por una red natural, toda cuenca tiene un desembocadura el cual puede variar entre río, depósito natural de aguas, un pantano o directamente al mar, se denomina como una unidad fisiográfica la cual está conformada por varios sistemas de agua, los cuales llevan el mismo curso, y que los define el relieve de la zona (Ramakrishna, 1997). La delimitación de una cuenca corresponde a la cota máxima que divide dos cuencas contiguas (IDEAM, 2002).

Las cuencas hidrográficas se clasifican por usos, tamaños, altitud, cantidad de caudal, clima, escurrimiento, torrencialidad y comportamiento hidrológico, estos factores dependen de las diferentes situaciones físicas y socioeconómicas (Aguirre, 2007), de la siguiente manera:

- Uso dominante de las tierras: La sociedad según su actividad ha dado diferente uso a las tierras, teniendo en cuenta la necesidad de tener una cuenca cerca a la comunidad y dependiendo de esto se da el diferente manejo, cuencas urbanas, agrícolas, pecuarias, forestales y de uso múltiple (Aguirre, 2007).
- Tipo dominante de tenencia de la tierra: Según lo derecho de las personas o comunidades, considerando las limitaciones que los individuos tienen como propietarios, se clasifican las cuencas en privadas, estatal y municipal (Aguirre, 2007).
- Tipo de explotación agrícola: Según las actividades agrícolas que desarrollen las comunidades en la zona, se clasifica como cuencas minifundio, latifundio, empresariales y comunitarias (Aguirre, 2007).
- Según la altitud: Según la distancia vertical sobre el nivel del mar se hace la siguiente clasificación según (Aguirre, 2007); cuencas de altas, corresponden a las ubicadas en las nacientes de los ríos, las cuales cuenta con una pendiente elevada y además con un perfil transversal en forma de V y ausencia de valle, las cuencas medias que se ubican entre zonas de montaña y entre algunas zonas planas, y las cuencas bajas que es donde se encuentra el río receptor.
- Permanencia del caudal durante el año: Este factor se mide dependiendo de la escorrentía, donde existen cuencas permanentes que tienen escorrentía todo el año, cuencas intermitentes cuya escorrentía solo está presente en los meses de precipitación y las cuencas efímeras donde hay escorrentía pocas horas después de tiempos de lluvia (Aguirre, 2007).
- Según el clima: Este factor depende netamente de la humedad de la zona, donde hay cuencas de clima húmedo y cuencas de zonas secas (Aguirre, 2007).
- Comportamiento hidrológico de las crecidas: Este factor permite clasificar en 3 grupos, las microcuencas de torrentes, donde las crecidas tienen una rama ascendente y muy pendiente,

las cuencas de ríos torrenciales que abarca varias cuencas de torrente y las cuencas de ríos grandes que tiene subcuencas de ríos de torrentes y tramos de llanura (Aguirre, 2007)

- Según la torrencialidad: Este factor permite indicar el porcentaje de crecida de una cuenca, están las cuencas por flujo torrencial y las cuencas de lava torrencial (Aguirre, 2007).

1.4.2.2. Caracterización hidrológica. Al realizar el estudio de una cuenca hidrológica, no solamente se deben tener en cuenta los parámetros mencionados anteriormente, se debe considerar la morfología, el clima, la actividad socioeconómica del área de investigación.

- **Caracterización morfológica:** Esta caracterización permite identificar la influencia del relieve y morfología en diferentes tipos de eventos que se apliquen en una cuenca hídrica. (Gaspari, 2013).
- **Caracterización climática:** Para llevar a cabo la caracterización climática de una cuenca hidrográfica es necesario conocer los diferentes parámetros meteorológicos con énfasis en la temperatura de un clima en particular, el cual, modifica y altera de manera significativa el comportamiento de la red de drenaje y su ambiente en general, al igual que las precipitaciones presentes, las cuales tienen incidencia directa en las actividades humanas que se desarrollen en la zona. (Gaspari, 2013).
- **Caracterización socioeconómica:** La caracterización socioeconómica es un proceso fundamental en el campo de la investigación social y económica, este método implica la recopilación y análisis sistemático de datos que describen las características sociales y económicas de una población específica o de una comunidad determinada, estos datos suelen incluir información sobre ingresos, nivel educativo, empleo, vivienda, acceso a servicios de salud y otras variables relevantes (Rodríguez, 2015). La caracterización socioeconómica permite entender las condiciones de vida de las personas en una determinada área y proporciona una visión integral de su situación económica y social, este proceso implica la utilización de diversas técnicas de investigación, como encuestas, entrevistas, análisis de datos estadísticos y revisión de documentos, la información recopilada se utiliza para identificar patrones, tendencias y disparidades en la

población estudiada. Además, la caracterización socioeconómica es esencial para el diseño y la implementación de políticas públicas efectivas, proporciona datos empíricos que son fundamentales para la toma de decisiones informadas en áreas como la educación, la salud, el empleo y el desarrollo comunitario.

De igual manera otros factores importantes en el momento de determinar la caracterización hídrica de una cuenca, es la hidrometría, caudal, ciclo hidrológico, oferta hídrica, caudal máximo; diferentes autores definen estas características en base a los conceptos básicos de la hidrología.

- **Hidrometría:** Como su nombre lo dice, consiste en la medición del agua en sus diferentes fases operativas, de esta manera son todos los métodos de medición de las diferentes variables que se implican en el ciclo del agua, como velocidad, caudal, temperatura, etc., (Ortega, 2012).
- **Caudal:** Es la cantidad de agua que fluye en determinado tiempo por el cauce (Béjar, 2004).
- **Caudales máximos:** Es el caudal máximo en un periodo de tiempo, generalmente de un año, es valor es necesario para realizar las estructuras hídricas se deben hacer en base del caudal máximo, para determinar la cantidad de caudal máximo se debe realizar en base de una función de distribución de probabilidades teórica, se debe exceder este valor en dado casos de que en el tiempo se dé un caudal más elevado a los registrados, (Béjar, 2004).
- **Ciclo hidrológico:** El ciclo hidrológico es la transferencia de las masas de agua que se genera gracias al intercambio de energía (Miguel, 2009).
- **Oferta hídrica:** Se define a la oferta hídrica como el volumen de agua que escurre por la superficie terrestre, en los cuales se integra los sistemas de drenaje, se debe entender que abarca solo el agua que no se escurre, solo la que fluye a través de la superficie del suelo. (IDEAM, 2012).

1.4.2.3. Oferta hídrica. La oferta hídrica es “el agua que fluye por la superficie de suelo, que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos y/o en los cuerpos de agua lenticos de una unidad hidrográfica”, por lo tanto, la oferta hídrica superficial corresponde al volumen de agua que escurre en la cuenca la cual proviene del ciclo hidrológico y se ve afectada por el cambio climático (IDEAM, 2013).

La oferta hídrica se hace alusión al caudal de escorrentía superficial que transita por una corriente. La oferta hídrica de una cuenca hidrográfica depende de las condiciones climatológicas, régimen hidrológico, características físicas, geológicas y de cobertura que ésta presente y, por lo tanto, puede ser variable en el espacio y tiempo (IDEAM, 2008), la oferta hídrica se divide entre la Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS). En la evaluación de la Oferta Hídrica Total Superficiales necesario tener en cuenta su definición y los escenarios bajos los cuales puede ser estimada:

- La Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS) es el volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial, representado en el agua que fluye por la superficie de suelo, que no se infiltra o se evapora, y se concentra en los cauces de los ríos y/o en los cuerpos de agua lenticos (IDEAM, 2008).
- El año hidrológico medio es el definido por los caudales/escorrentía medios mensuales multianuales de la serie histórica (IDEAM, 2008).
- El año hidrológico húmedo es el definido por los caudales/escorrentía máximos de los medios mensuales multianuales de la serie de caudales/escorrentía medios mensuales (IDEAM, 2008).
- El año hidrológico seco es el definido por los caudales/escorrentía mínimos mensuales de las series de caudales y escorrentía medios, los cuales se identifican con el año típico seco (IDEAM, 2008).

Para la evaluación del estado de la Oferta Hídrica Total Superficial, el principal componente a considerar es la caracterización de la oferta hídrica sobre las unidades hidrográficas, las cuales

poseen unas características físicas en función del relieve, los suelos y la geología allí presentes (características morfométricas), por lo que en la definición de las unidades de análisis se consideran tres jerarquías sistémicas donde cada una conserva similitud en sus características hidrológicas: áreas, zonas y sub zonas hidrográficas (IDEAM, 2014). Las características morfométricas son útiles para realizar comparaciones entre cuencas con propiedades similares y poder establecer la oferta de agua en unidades no instrumentadas.

En la estimación de la OHTS, la implementación de modelos dinámicos permite mejorar la interpretación de los procesos que se dan en el ciclo hidrológico y apoyar las estimaciones de los componentes del balance hídrico en unidades hídricas adecuadas (IDEAM, 2013a). Estos modelos responden a las siguientes características:

- El modelo matemático en hidrología, o modelo numérico, es el conjunto de expresiones matemáticas y supuestos lógicos necesarios para simular un sistema hídrico (OMM, 2012b). Estos modelos en la evaluación de la oferta de agua son la relación caudal-área, lluvia-escorrentía, y la ecuación del balance hídrico.
- La calibración es el proceso por el cual los parámetros de un modelo se ajustan para obtener concordancia entre los resultados generados por el modelo y los valores medidos de las variables (OMM, 2012b). En la oferta hídrica los resultados generados son los valores de escorrentía estimados a partir de los modelos lluvia-escorrentía y la ecuación del balance hídrico, y los valores medidos son las series de caudal medio monitoreados a la salida de las unidades hidrográficas.
- La validación evalúa la capacidad de un modelo específico de una unidad hidrográfica para proporcionar predicciones suficientemente precisas (OMM, 2012b). Esto se realiza comparando la escorrentía observada (relación caudal - área) y la estimada por los modelos.

1.4.2.4. Cambio climático. El Cambio Climático se entiende como un cambio del clima tribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera

mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. (ONU, 1992).

De acuerdo a lo anterior el cambio climático se abarca como el estado actual de la atmosfera de un ecosistema, incluye las características biofísicas que lo vuelven habitable, estos factores se determinan a nivel superficial, variables como la temperatura, humedad relativa, presión, viento, nubosidad, precipitación entre otras, se ven afectadas directamente atribuido a las actividades humanas que alteran este equilibrio existente en el ecosistema tanto atmosféricamente como climática e hidrológicamente, es decir se refiere a los cambios acelerados a largo plazo del estado del clima con relación al sistema climático.

La convención de las naciones unidas realizada en el 2015, en Paris Francia, reconoce al cambio climático como un problema global que representa una problemática con efectos negativos e irreversibles, estudios realizados por la IPCC, grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático afirman, el fuerte impacto que genera el cambio climático sobre los sistemas físicos y biológicos e influyen sobre las zonas costeras, las zonas de cultivo, los humedales, los páramos y los nevados, los cambios de temperatura, las fuertes lluvias y los prolongados periodos de sequía observados durante los fenómenos del niño y de la niña, afectan el comportamiento de los ecosistemas, provocan el desplazamiento y extinción de las especies (IPCC, 2014).

El cambio climático a partir del año de 1950 toma relevancia en el mundo, ya que los cambios observados no tenían precedentes anteriormente, esto debido al comienzo de la era industrial, refiriendo a un aumento de la temperatura atmosférica, observando un aumento de la temperatura de los océanos aumentando el nivel del mar aumentó entre 10 y 20 centímetros. Sin embargo, la tasa anual de aumento durante los últimos 20 años ha sido de 3,2 milímetros anuales en las ciudades costeras siendo evidente inundaciones, mareas elevadas y las concentraciones de gases de invernaderos procedentes del crecimiento industrial (IPC, 2014). De acuerdo a lo anterior la temperatura media global podría aumentar hasta 1,5°C entre los años 2030 y 2052 si el calentamiento global continúa avanzando a su ritmo actual, según un informe del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014).

Según el Panel intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el cambio climático es un estado de alteración del clima que puede persistir por un periodo de tiempo prolongado, el cual, se origina a partir de fuentes naturales y antropogénicas (IPCC, 2014).

De acuerdo con el IDEAM, las actividades antropogénicas han influido en mayor grado en la aceleración del cambio climático, debido, primeramente, a la emisión de gases de efecto invernadero, lo cuales se asocian a actividades como la quema de combustible fósiles (IDEAM, 2010). A causa del cambio climático, la temperatura atmosférica y oceánica ha aumentado considerablemente, han incrementado los eventos climáticos extremos, el nivel del mar ha subido en gran manera, la oferta hídrica ha disminuido, los sistemas biológicos que mantienen los diferentes ecosistemas se han visto alterados, ha menguado la capacidad de producción de alimentos, entre otros. (IPCC, 2014).

1.4.2.5. Variabilidad climática. La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones y cambios que ocurren en los patrones climáticos a lo largo del tiempo. El clima de la Tierra es naturalmente variable, y esta variabilidad puede manifestarse en diferentes escalas de tiempo, desde variaciones estacionales hasta cambios a largo plazo. La variabilidad climática puede ser causada por diversos factores, tanto naturales como humanos. Algunos de los principales factores naturales incluyen la variabilidad intrínseca del sistema climático, como las oscilaciones climáticas naturales, como el fenómeno El Niño-La Niña, variaciones en la radiación solar, cambios en la actividad volcánica y ciclos naturales de largo plazo, como las variaciones en la órbita de la Tierra. (García, 2012).

La variabilidad climática puede tener impactos significativos en diversos aspectos de la sociedad y el medio ambiente. Puede afectar la disponibilidad de recursos hídricos, la productividad agrícola, los ecosistemas naturales, la salud humana y los eventos extremos, como sequías, inundaciones y tormentas más intensas. Es importante destacar que la variabilidad climática es diferente al cambio climático. Mientras que la variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones normales en el clima, el cambio climático se refiere a los cambios de largo plazo en los patrones climáticos debido a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. (García, 2012).

1.4.2.5.1 Fenómeno del niño. El fenómeno del Niño es un patrón climático que se caracteriza por un calentamiento anómalo de las aguas superficiales del Océano Pacífico tropical, particularmente en la región central y oriental. Este fenómeno tiene importantes repercusiones en los patrones climáticos a nivel mundial y se presenta de forma irregular, generalmente con una periodicidad de dos a siete años. (IDEAM, 2014). En Colombia se caracteriza principalmente por sequías prolongadas y disminución de las precipitaciones en diferentes regiones. Estas sequías tienen efectos negativos en la agricultura, especialmente en los cultivos que dependen de la lluvia, como el arroz, el maíz y el café. La falta de agua también afecta la disponibilidad de recursos hídricos para el consumo humano, la ganadería y la generación de energía hidroeléctrica, lo que puede tener un impacto significativo en la economía del país. Los impactos del fenómeno del Niño no se limitan solo al sector agrícola. La disminución del caudal de los ríos y la reducción de los embalses de agua pueden afectar el suministro de agua potable para la población, la generación de energía hidroeléctrica y la disponibilidad de agua para otros usos industriales y domésticos. Esto pone en evidencia la importancia de una gestión adecuada de los recursos hídricos y la planificación para enfrentar los períodos de sequía. (IDEAM, 2014).

1.4.2.5.2 Fenómeno de la niña. El fenómeno de La Niña es el evento climático opuesto al fenómeno del Niño. Se caracteriza por un enfriamiento anómalo de las aguas superficiales del Océano Pacífico tropical, particularmente en la región central y oriental. Durante La Niña, las temperaturas del agua son más frías de lo normal en comparación con las condiciones climáticas promedio. (IDEAM, 2010). Es un evento climático recurrente que afecta a Colombia y otras regiones del mundo. Durante este fenómeno, se producen cambios significativos en los patrones climáticos y las condiciones meteorológicas, lo que tiene un impacto considerable en diversos sectores del país. En este ensayo, exploraremos los efectos del fenómeno de La Niña en Colombia y los desafíos que plantea para el país. (Melo, 2015).

El fenómeno de La Niña en Colombia se caracteriza principalmente por un aumento en las precipitaciones y condiciones climáticas más húmedas de lo normal. Estas lluvias intensas pueden tener varios efectos en el país. En primer lugar, se producen inundaciones en diferentes regiones, especialmente en las zonas costeras y cercanas a los ríos. Estas inundaciones pueden causar daños

a la infraestructura, desplazamientos de la población y pérdida de vidas humanas. Otro desafío que enfrenta Colombia durante La Niña es la gestión de los recursos hídricos. Aunque las lluvias son bienvenidas, las inundaciones repentinas y el aumento del caudal de los ríos pueden provocar desbordamientos y contaminación del agua potable. Esto afecta el suministro de agua para consumo humano, la generación de energía hidroeléctrica y la disponibilidad de agua para la agricultura y otros usos. (IDEAM, 2014).

Es importante destacar que La Niña, al igual que el fenómeno del Niño, es un fenómeno natural y forma parte del ciclo climático natural conocido como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Ambos fenómenos tienden a tener una periodicidad irregular y pueden interactuar con el cambio climático inducido por el hombre, aunque se requiere más investigación para comprender completamente estas interacciones.

1.4.2.6. Modelación hidrológica. La modelación hidrológica y eco hidrología juega otro de los papeles fundamentales cuando se estudia una cuenca. Este tipo de modelación se conoce como una técnica matemática y/o física, mediante la cual es posible encontrar la representación que se ajuste al proceso del ciclo del agua, con esta representación es posible llegar a conocer el comportamiento del recurso hídrico, en cuanto a la calidad y cantidad; esta herramienta proporciona información en diferentes intervalos de tiempo, escalas espaciales y dimensionales, uno de los beneficios de realizarla es la capacidad de adaptar a la sociedad al manejo del recurso hídrico sobre las consecuencias que genera el cambio climático (Castillo, 2021).

Debido a los cambios que se han presentado en el ecosistema como consecuencia del efecto invernadero, la modelación hidrológica ha evolucionado en busca de alternativas que abarquen las variables que se ven afectadas por dicho efecto; con el fin de lograr expresar correctamente la modelación hidrológica con los cambios del ciclo natural del agua, entendiendo los sistemas y el manejo hídrico el cual conlleve a una disminución del impacto ambiental (Savenije, 2008).

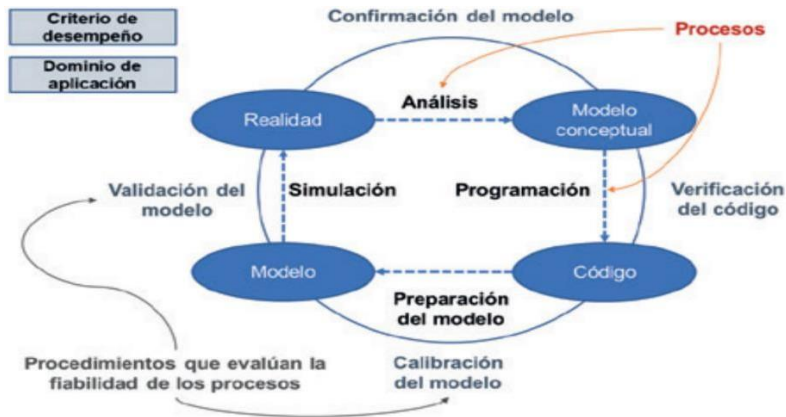
Todo ejercicio de modelación de un sistema natural consiste en una representación de los procesos que ocurren en realidad en la naturaleza, mediante herramientas numéricas o físicas, lo

cual implica una serie de limitaciones intrínsecas al proceso de modelación que pueden condicionar la aplicabilidad de los resultados, teniendo en cuenta que la cantidad de procesos que intervienen introducen un grado de complejidad que no es posible representar de forma precisa en un modelo matemático. Teniendo en cuenta las condiciones mencionadas, es necesario seguir un riguroso protocolo de modelación que permita identificar las fuentes de incertidumbre asociada a las simplificaciones del modelo, entre otros aspectos, de forma que los resultados obtenidos se aproximen a la realidad y sean interpretados adecuadamente.

El proceso de modelación puede entenderse como la interacción de cuatro elementos básicos: realidad, modelo conceptual, código y modelo. Dichos elementos están vinculados entre sí a través de los procesos de análisis, programación, preparación del modelo y simulación, que a su vez comprenden procedimientos que evalúan la fiabilidad de dichos procesos (confirmación, verificación, calibración y validación). En términos generales, el proceso de modelación consiste en la representación de la realidad mediante un modelo conceptual, el cual implica una serie de simplificaciones e hipótesis que permiten describir de forma aceptable el sistema natural a representar. Este modelo conceptual es posteriormente trasladado a un código computacional, con el fin de realizar las simulaciones y cálculos con ayuda de un computador. Posteriormente, el código computacional construido es configurado para que represente las condiciones particulares del área de estudio (por ejemplo, caudales, vertimientos, etc.), con lo cual se obtiene el modelo de un caso de estudio particular.

Figura 1

Proceso de interacción en la modelación hidrológica



Fuente: Manual de usuario SWAT, 2014

1.4.2.6.1. Modelo hidrológico WEAP. El modelo Water evaluation and planning system es una herramienta de simulación para la planificación integrada de los recursos hídricos que analiza los sistemas de suministro de agua en el contexto de la demanda de uso, la calidad del agua y la protección y preservación de los ecosistemas. WEAP se destaca por su enfoque para modelar sistemas de recursos hídricos y su capacidad para analizar políticas de gestión de recursos. WEAP equilibra la ecuación entre la demanda y el suministro de agua y es capaz de abordar una amplia gama de problemas, incluidos el análisis de necesidades sectoriales, la conservación del agua, los derechos de agua y la transferencia prioritaria, la escurrimiento de precipitaciones y el modelado de flujo mínimo, las operaciones de embalses, la energía hidroeléctrica y los proyectos de calidad del agua, requisitos del ecosistema y análisis de costo-beneficio (Smith & Johnson, 2017).

1.4.2.6.2. Modelo hidrológico Hydro- Bid. El modelo Hydrological River Basin Decision Support System es un software de modelado hidrológico desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Instituto Internacional de Gestión del Agua (IWMI) para apoyar la gestión de los recursos hídricos en las cuencas fluviales. se utiliza un modelo hidrológico distribuido espacialmente para simular el ciclo del agua y generar una gama de variables hidrológicas, como lluvia, evapotranspiración, escurrimiento, humedad del suelo y recarga de aguas subterráneas. El modelo tiene en cuenta las características físicas de la cuenca, como la topografía, las propiedades del suelo, el uso del suelo y los datos climáticos. El software proporciona una interfaz fácil de usar para visualizar los datos hidrológicos y tomar decisiones informadas sobre la gestión de los recursos hídricos. Se puede utilizar para analizar diferentes escenarios, como cambios en el uso del suelo, la variabilidad climática o la implementación de intervenciones de gestión del agua, y para evaluar su impacto potencial en los recursos hídricos. HydroBID se ha utilizado en varias cuencas fluviales de América y otras regiones, incluida la cuenca del río Lempa en El Salvador, la cuenca del río Cauca en Colombia y la cuenca del río Mara en Kenia (Nelson & Antonio, 2019).

1.4.2.6.2. Modelo hidrológico SWAT. El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es una herramienta de simulación ampliamente utilizada en la gestión de cuencas hidrográficas y la evaluación de impactos en recursos hídricos. Desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola (ARS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), el modelo SWAT integra datos geoespaciales, información climática, características del suelo y del

paisaje para simular de manera precisa y detallada los procesos hidrológicos y la calidad del agua en una cuenca. A través de su enfoque en la relación entre el uso del suelo, la vegetación, la topografía y los flujos de agua, SWAT ayuda a predecir los efectos de prácticas agrícolas, cambios en el uso del suelo y eventos climáticos en los recursos hídricos, lo que lo convierte en una valiosa herramienta para la toma de decisiones en la gestión sostenible de las cuencas hidrográficas. (Castañeda, 2017).

1.4.1. Marco contextual

La microcuenca Dolores, localizada en el corregimiento de Mocondino al suroriente del municipio, constituye un elemento esencial de esta región. Con una distancia de 12 km desde la ciudad de Pasto, este corregimiento destaca por su amplia extensión en el contexto municipal. La temperatura promedio oscila entre 14° C y 16° C, y su elevación a 2800 m.s.n.m añade un matiz distintivo a su entorno. Los confines de la microcuenca se delinean hacia el norte por el río Pasto, hacia el sur por el sector de loma peña blanca, al noroeste por el área de Pejendino y hacia el oeste por los asentamientos de El Rosario y Jamondino. Con una relevancia vital, la cuenca Dolores desempeña un papel fundamental al abastecer de recursos hídricos a los sectores preeminentes de Mocondino alto, Mocondino medio, Mocondino bajo y Dolores centro, consolidando su importancia en la cotidianidad de la comunidad local.

Figura 2

Corregimiento de Mocondino, Municipio de Pasto.

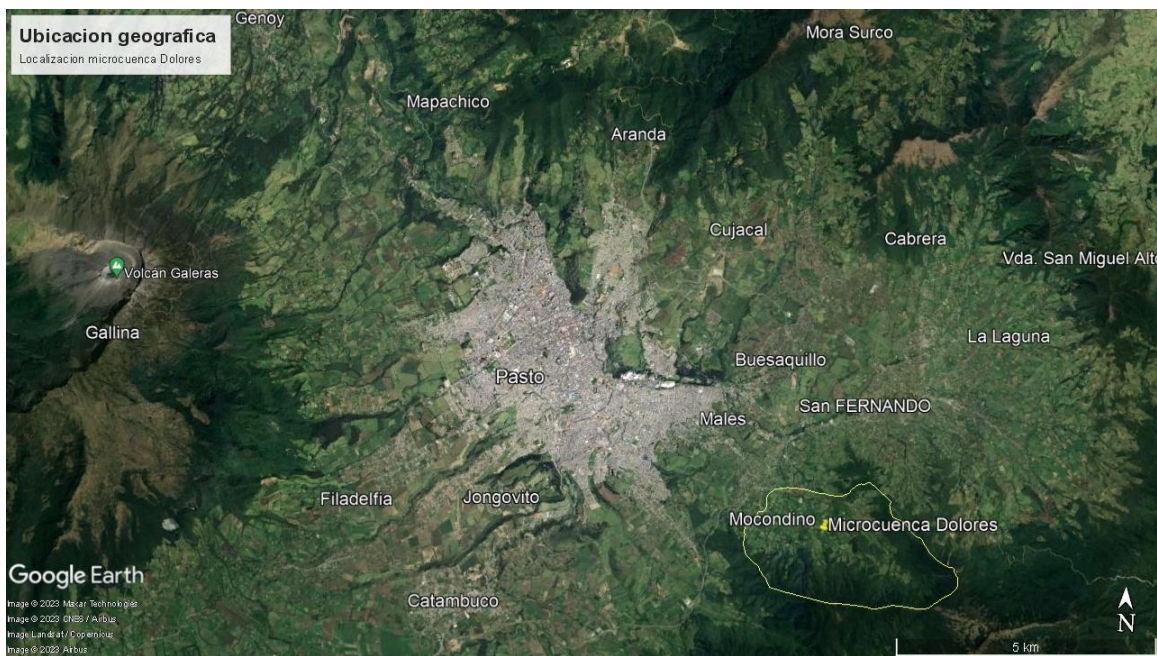


Fuente: Alcaldía de Pasto

La microcuenca Dolores forma parte integral de la cuenca alta del río Pasto, desempeñando un papel esencial en la provisión de recursos hídricos a una variedad de sectores. Con una relevancia vital en el abastecimiento de agua, esta microcuenca beneficia predominantemente a múltiples áreas, incluyendo Mocondino alto, Mocondino medio y Mocondino bajo, así como a los asentamientos de El Rosario, Jamondino, Dolores y Loma Peña Blanca, al ser una fuente vital de agua para estas zonas, la microcuenca Dolores adquiere una importancia destacada en la sustentabilidad y el bienestar de las comunidades locales, al tiempo que contribuye al flujo constante del río Pasto y al funcionamiento armonioso de toda la cuenca hidrográfica.

Figura 3

Ubicación geográfica y límites pertenecientes a la cuenca Dolores



1.4.2. Marco legal

En el contexto de esta investigación, es esencial contextualizar el marco legal que establece el entorno normativo y regulatorio en el cual se enmarca el estudio. El análisis y comprensión de las leyes, políticas y regulaciones pertinentes proporciona el cimiento necesario para abordar las temáticas presentadas en esta tesis, asegurando la pertinencia y conformidad con las directrices establecidas por las autoridades competentes.

1.4.2.1. Ley ambiental y plan de desarrollo ambiental

Tabla 1

Marco legal ley 99 de 1993

Ley 99 de 1993 (ley de medio ambiente)	
Establece la planificación y gestión ambiental en Colombia, incluyendo aspectos relacionados con la conservación, uso sostenible y protección de los recursos naturales, incluyendo el agua. El principal objetivo es garantizar la protección, conservación, restauración y ordenamiento de los recursos naturales y el medio ambiente, promoviendo el desarrollo sostenible y la participación ciudadana en la gestión ambiental	
Modificación ley 1753 2015	
Establece las directrices y lineamientos para el desarrollo social, económico y ambiental del país	
Artículo. 21	Establece las políticas para la adaptación y mitigación del cambio climático, incluyendo la promoción de energías renovables, la eficiencia energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
Artículo. 22	Establece la creación del Sistema Nacional de Cambio Climático, encargado de coordinar las acciones relacionadas con el cambio climático a nivel nacional.
Artículo. 32	Establece los lineamientos para la conservación y uso sostenible de la

	biodiversidad, incluyendo la protección de áreas de importancia ambiental y la promoción de prácticas sostenibles en los sectores productivos.
Artículo. 41	Establece la promoción de energías renovables y eficiencia energética como instrumentos para la transición hacia una matriz energética más sostenible.
Artículo. 59	Establece la participación ciudadana en la toma de decisiones relacionadas con el desarrollo sostenible.

1.4.2.2 Ley de desarrollo rural sostenible

Tabla 2

Marco legal ley 152 de 1994

Ley 152 de 1994 (ley de desarrollo rural sostenible)	
	Establece la planificación y gestión ambiental en Colombia, incluyendo aspectos relacionados con la conservación, uso sostenible y protección de los recursos naturales, incluyendo el agua.
Artículo. 2	Establece los principios del desarrollo rural sostenible, incluyendo la conservación y uso racional de los recursos naturales, la participación comunitaria y la equidad.
Artículo. 12	Aborda la conservación y uso de los recursos naturales, y establece la obligación de los particulares y el Estado de adoptar medidas para prevenir y controlar la degradación del suelo, agua, vegetación y otros elementos del entorno.

Artículo. 32	Se refiere a la protección y promoción de la biodiversidad, estableciendo medidas para el uso sostenible de la diversidad biológica y la conservación de los ecosistemas.
--------------	---

1.4.2.3 Ley general de aguas

Tabla 3

Marco legal ley 373 de 1997

Ley 373 de 1997 (ley general de aguas)	
Establece los principios y normas para la gestión y uso del agua en Colombia, incluyendo la planificación y regulación de las cuencas hidrográficas.	
Artículo. 1	Define el objeto de la ley, que es regular la planificación, uso y manejo integral de los recursos hídricos en Colombia, así como establecer los principios y criterios para su gestión.
Artículo. 2	Establece los principios rectores de la gestión integral de los recursos hídricos, incluyendo la planificación participativa, la equidad, la sostenibilidad, la prevención y control de la contaminación, entre otros.
Artículo. 8	Aborda el tema de la planificación integral del recurso hídrico, estableciendo la cuenca hidrográfica como la unidad básica de planificación, y promoviendo la participación de las comunidades locales en la toma de decisiones.
Artículo. 20	Establece la obligación de implementar sistemas de medición y control de aguas para garantizar su uso adecuado y equitativo.

Artículo. 25	Aborda el tema de la calidad del agua, estableciendo la obligación de prevenir y controlar la contaminación, así como promover su uso sostenible.
Artículo. 32	Introduce el concepto de áreas de manejo y preservación ambiental, que son zonas destinadas a la conservación y uso sostenible de los recursos hídricos.
Artículo. 36	Establece la obligación de elaborar planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas para garantizar su uso sostenible y la protección de sus ecosistemas.

1.4.2.4 Tratados internacionales

Tabla 4

Tratados internacionales

Tratados internacionales	
<p>Los tratados internacionales del cambio climático son acuerdos entre países para abordar los desafíos relacionados con el cambio climático a nivel global, estos tratados establecen compromisos y acciones que los países deben tomar para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mitigar los impactos del cambio climático y promover prácticas sostenibles.</p>	
Acuerdo de Paris	<p>Adoptado en 2015 durante la COP21 en París, el Acuerdo de París es importante en la lucha contra el cambio climático, su objetivo principal es limitar el aumento de la temperatura global a muy por debajo de 2 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales, y esforzarse por limitarlo a 1.5 grados Celsius.</p>

Protocolo de Kioto

Adoptado en 1997, el Protocolo de Kioto fue el primer tratado internacional vinculante que estableció objetivos específicos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para los países industrializados, el protocolo estableció metas cuantificadas para estos países, con el objetivo de reducir sus emisiones en un cierto porcentaje por debajo de los niveles de 1990 durante el período 2008-2012.

1.4.2.5 Ley de cambio climático

Tabla 5

Marco legal ley 1930 de 2018

Ley 1930 de 2018 (ley de cambio climático)

Establece un marco normativo integral para abordar los desafíos e impactos del cambio climático en el país, esta ley busca promover la adaptación y mitigación de los efectos climáticos a través de la creación de estrategias nacionales, coordinación intersectorial y mecanismos de financiamiento. Además, establece la obligación de incorporar medidas de cambio climático en la planificación y gestión gubernamental, promueve la investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles, y establece mecanismos de cooperación internacional.

Artículo. 4

Establece los principios rectores para la gestión del cambio climático en Colombia, incluyendo la promoción de la resiliencia, la adaptación, la mitigación y la inclusión de la perspectiva de género.

Artículo. 6

Crea la Estrategia Nacional de Cambio Climático, que es el plan de acción a largo plazo del país para enfrentar el cambio climático, incluyendo metas de mitigación y adaptación.

Artículo. 8	Establece la Comisión Intersectorial de Cambio Climático, un órgano encargado de coordinar las acciones de mitigación y adaptación entre diferentes sectores y entidades gubernamentales.
Artículo. 20	Introduce medidas para la promoción de tecnologías limpias y la investigación en materia de cambio climático.

1.4.2.6 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

Tabla 6

Objetivos de desarrollo sostenible

Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)	
Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son metas globales establecidas por las Naciones Unidas en septiembre de 2015 como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Fueron creados con el compromiso de líderes mundiales y representan un llamado universal a la acción para abordar desafíos socioeconómicos y ambientales a nivel mundial.	
ODS 6: Agua limpia y saneamiento	Este objetivo se centra en garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.
ODS 13: Acción por el clima	Este objetivo se enfoca en tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos.
ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres	Este objetivo se relaciona con la gestión sostenible de los ecosistemas terrestres y la lucha contra la degradación del suelo.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	Este objetivo se centra en "Ciudades y comunidades sostenibles", buscando asegurar que las ciudades y los asentamientos humanos
--	---

sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles para todos.

1.5. Metodología

En este capítulo, se presentan un esquema metodológico en el cual se encuentran las metas, actividades, estrategias de trabajo y productos esperados necesario para desarrollar cada objetivo específico y así alcanzar el cumplimiento del objetivo general de la investigación. Mediante la implementación de una modelación integral de las variables involucradas en el cambio climático en la cuenca hidrográfica Dolores, ubicada en el municipio de San Juan de Pasto, esta tesis de grado presenta una proyección de escenarios futuros concernientes a la disponibilidad de recursos hídricos y el impacto del cambio climático en el ámbito de dicha microcuenca hidrográfica. La exploración de las transformaciones anticipadas en determinantes climáticos clave, como las pautas de precipitación y temperaturas, y su correlación con la provisión y repartición de agua en la cuenca, ha sido realizada a través de la recolección de datos climáticos históricos y la aplicación de modelos de simulación. Este estudio aspira a establecer un punto de partida para futuras investigaciones y la toma de decisiones fundadas, con el propósito de promover la implementación de políticas y prácticas encaminadas a fortalecer la resiliencia y la preservación de sistemas hídricos frente a las vicisitudes del cambio climático en el contexto específico de la mencionada cuenca hidrográfica.

1.5.1 Caracterizar la microcuenca hidrográfica Dolores desde una perspectiva socioeconómica, climática e hidrológica.

1.5.1.1 Primera etapa, Caracterización socioeconómica. La caracterización socioeconómica de la microcuenca Dolores se emplea para determinar los aspectos relacionados con la población y las actividades económicas que tienen lugar en el área de estudio, la forma empleada para elaborar la caracterización fue a través de entrevistas a las juntas comunales del corregimiento, la cual se basó en reconocer y diagnosticar los aspectos actuales en la gestión actual del recurso hídrico por parte de la comunidad.

1.5.1.2 Segunda etapa, Caracterización hidrológica. La caracterización hidrológica se lleva a cabo mediante el análisis de datos geográficos relacionados con la forma, relieve y características geomorfológicas de una microcuenca. Este proceso tiene como fin identificar y evaluar factores como el tamaño de la cuenca, su perfil topográfico, la red de drenaje y el orden de los cursos de agua. Para lograr esto, se emplean softwares como Global Mapper, ArcGIS y AutoCAD, que permiten obtener información detallada sobre las dimensiones, forma y distribución de los cursos de agua. Además, se recurre a conceptos fundamentales de hidrología para establecer una base sólida en la caracterización morfológica.

1.5.1.3 Tercera etapa, Caracterización climática. La caracterización climática se logra a partir de la recolección y el análisis de la información sobre los patrones climáticos que impactan la disponibilidad y distribución del agua en la región, de lo cual implica examinar las variables de temperatura y precipitación con el fin de obtener una comprensión completa de cómo el clima se relaciona con el ciclo hidrológico en la microcuenca, esta información se obtiene de las estaciones meteorológicas del IDEAM, abarcando datos registrados en un período de veinte años en el área de investigación a partir de lo anterior los datos recopilados se resumen por medio de gráficos lineales y diagramas de barras lo cual permita facilitar la interpretación.

1.5.2 Determinar el escurrimiento superficial y el caudal máximo en la microcuenca hidrográfica Dolores.

1.5.2.1 Primera etapa, Determinar el escurrimiento superficial. El cálculo del escurrimiento superficial se lleva a cabo mediante la aplicación del método de medición del escurrimiento superficial denominado método del flotador, el cual involucra la evaluación de la velocidad del flujo hídrico en la microcuenca. Este enfoque implica realizar mediciones directas de velocidad y profundidad en tres secciones específicas del cauce principal, a lo largo de un período de cinco días, en el cual se registra la información recopilada en tablas de datos, a partir de lo se genera un análisis de acuerdo a los principios fundamentales de la hidrología y así determinar con precisión el escurrimiento superficial en la zona.

1.5.2.2 Segunda etapa, Determinar el caudal máximo. La estimación del caudal máximo se realiza mediante la aplicación del método racional, que se fundamenta en el análisis interrelacionado entre la precipitación, la escorrentía y la ocupación del suelo en la zona. Este método considera que el punto de máxima descarga se alcanza cuando ocurre la precipitación más intensa en el área en estudio. Así, se establece una asociación directa entre la magnitud de la lluvia y la cantidad de agua que fluye, tomando en cuenta la dinámica hidrológica y las características del uso del suelo en el proceso.

1.5.3 Evaluar la oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática mediante la elaboración de un modelo hidrológico en la microcuenca hidrográfica Dolores.

1.5.3.1 Calibración y validación del modelo. El modelado hidrológico se realiza a través del software SWAT (Soil and Water Assessment Tool), la metodología de calibración y validación se realiza a través de un proceso iterativo y sistemático, primero, se calibra el modelo ajustando sus parámetros para que reproduzca con precisión las condiciones observadas en el pasado, parámetros físicos, climáticos e información necesaria para la modelación, este ajuste se basa en comparar las simulaciones del modelo con datos de observación, una vez que se obtienen resultados satisfactorios en el período de calibración, el modelo se valida utilizando datos diferentes pero del mismo contexto temporal y espacial, asegurando que las simulaciones sean consistentes y precisas en condiciones no utilizadas durante la calibración, este proceso de calibración y validación se repite iterativamente, refinando los parámetros del modelo hasta que se logre un buen acuerdo entre las simulaciones y los datos observados, lo que aumenta la confianza en la capacidad del modelo para predecir el comportamiento hidrológico en condiciones futuras.

1.5.3.2 Segunda etapa, Escenarios de variabilidad climática. El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y enfocándose en el escenario RCP 8.5 propuesto por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), la metodología para evaluar la variabilidad climática implica la incorporación de proyecciones climáticas específicas del escenario RCP 8.5 en el modelo, estas proyecciones incluyen cambios esperados en variables climáticas como temperatura y precipitación, primero, se integran estos datos climáticos proyectados en el modelo SWAT, ajustando los parámetros del modelo según las condiciones

previstas en el escenario RCP 8.5, luego, se realizan simulaciones hidrológicas considerando estos datos climáticos futuros para evaluar el impacto potencial en el sistema hidrológico, como caudales de ríos.

1.5.3.2 Segunda etapa, Análisis de la oferta hídrica. El modelo hidrológico se emplea para proyectar a largo plazo los caudales futuros de una microcuenca bajo los escenarios RCP 8.5, considerando tanto los cambios climáticos previstos como las modificaciones en el uso del suelo, durante estas simulaciones, el modelo calcula específicamente los caudales hídricos proyectados para la microcuenca Dolores, proporcionando información crucial para comprender el impacto potencial del cambio climático, estos datos son esenciales para la toma de decisiones en la gestión hídrica y la planificación del desarrollo sostenible.

En este capítulo, se presentan un esquema metodológico en el cual se encuentran las metas, actividades, estrategias de trabajo y productos esperados necesario para desarrollar cada objetivo específico y así alcanzar el cumplimiento del objetivo general de la investigación.

Tabla 7

Metodología

Oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática- Microcuenca Dolores del municipio de Pasto - Nariño

Analizar la oferta hídrica de la microcuenca Dolores en el sector de Mocondino ante escenarios futuros de cambio climático.

Objetivo específico	Meta	Estrategias de trabajo	Actividades	Productos esperados
Caracterizar la microcuenca hidrográfica Dolores desde una perspectiva socioeconómica, climática e hidrológica.	Obtención de los aspectos morfométricos y climáticos actuales de la microcuenca Dolores	Descripción detallada de los parámetros físicos y climáticos mediante las bases teóricas de la hidrología aplicada al análisis de las cuencas hidrológicas.	<ul style="list-style-type: none"> • Localizar del área de estudio • Caracterizar socioeconómica • Identificar los parámetros de forma • Identificar el relieve topográfico • Identificar rectángulo equivalente • Identificar pendiente y perfil longitudinal • Identificar pendiente media del cauce principal • Identificar curva hipsométrica • Identificar frecuencia de altitudes 	<ul style="list-style-type: none"> • Mapa de localización, relieve topográfico y orden de las corrientes. • Informe descriptivo de las actividades socioeconómicas del área. • Tablas de información de resultado de los parámetros de forma, rectángulo equivalente, pendientes medias, pendiente de la cuenca • Diagrama del rectángulo equivalente, perfil longitudinal, curvas representativas y curva IDF.

			<ul style="list-style-type: none"> • Identificar elevación media • Identificar red y densidad del drenaje • Identificar orden de las corrientes • Realizar el polígono de Thiessen • Recolectar información climática • Realizar la curva intensidad – duración - frecuencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Valores numéricos de elevación media, densidad del drenaje, pendientes y parámetros de forma.
<p>Determinar el escurrimiento superficial y el caudal máximo en la cuenca hidrográfica Dolores.</p>	<p>Identificar las condiciones hidrológicas de la microcuenca para determinar el comportamiento del recurso hídrico actual</p>	<p>Obtener el escurrimiento superficial actual mediante el proceso de flotadores y determinar los caudales máximos a través de la curva de intensidad- duración- frecuencia con el fin de tener claridad del comportamiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Visitar al lugar • Localizar de los puntos de aforo • Medir el escurrimiento por el método de flotadores durante cinco días • Procesar la información de campo • Determinar coeficiente de escorrentía 	<ul style="list-style-type: none"> • Tablas de información sobre el proceso de aforo en el cauce y caudales máximos • Diagramas de representación de los aforos.

		hidrológico actual de la microcuenca.	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar Intensidad de lluvia 	
<p>Analizar la oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática en la microcuenca Dolores.</p>	<p>Diseñar un modelo hidrológico para evaluar los efectos de los fenómenos de variabilidad climática y los cambios en el recurso hídrico</p>	<p>Realizar una recopilación exhaustiva y análisis de series de datos históricos climáticos e hidrológicos abarcando un lapso de tiempo de diez años, con el propósito de adquirir información sobre tendencias y patrones. Subsecuentemente, emplear estas tendencias para generar proyecciones climáticas futuras bajo escenarios de variabilidad climática como lo es temperatura y precipitación y sea aplicable al contexto geográfico en cuestión.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Recopilar información de la caracterización de la microcuenca • Seleccionar el modelo hidrológico adecuado. • Calibrar el modelo hidrológico. • Validar el modelo hidrológico • Obtener la información climática futura del modelo • Definir los escenarios de variabilidad climática • Aplicar los escenarios en el modelo • Evaluar el impacto y resultado de los escenarios en la oferta hídrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Mapas representativos de los escenarios climáticos: Isoterma e Isoyeta. • Mapa representativo del uso de suelos actual • Graficas del proceso de validación y calibración del modelo. • Graficas representativas de la información climática. • Tablas de información con los resultados de la modelación.

1.5.1. Paradigma de investigación

Esta investigación se desarrolla dentro de un paradigma científico que integra enfoques positivistas y constructivistas para comprender la complejidad de la oferta hídrica en la microcuenca Dolores, desde una perspectiva positivista, se llevará a cabo una caracterización de la microcuenca abordando aspectos socioeconómicos, climáticos e hidrológicos, implicando de igual manera la aplicación de métodos cuantitativos para determinar el escurrimiento superficial y el caudal máximo, además, se utilizarán técnicas cuantitativas para evaluar la oferta hídrica en escenarios de variabilidad climática, a través de la elaboración de un modelo hidrológico. Al mismo tiempo, desde una perspectiva constructivista, se llevarán a cabo entrevistas y observaciones para comprender las actividades agrícolas y ganaderas realizadas por los habitantes del corregimiento de Mocondino, permitiendo analizar las percepciones locales y las respuestas adaptativas de la comunidad ante los cambios en la oferta hídrica.

1.5.2. Enfoque de investigación

El enfoque de esta investigación se basa en un método mixto que combina elementos cuantitativos y cualitativos, la integración de métodos cuantitativos se centra en la aplicación de técnicas avanzadas para determinar la caracterización hidrológica, climática, el escurrimiento superficial y el caudal máximo en la microcuenca, esta información cuantitativa proporciona una base para evaluar la disponibilidad de agua de manera objetiva y precisa a futuro en el área de investigación.

De igual manera, el enfoque cualitativo se concentra en comprender las dinámicas sociales y las prácticas económicas tales como la agrícola y ganadera de la población local dentro de la microcuenca Dolores, esto a través de entrevistas, observaciones participativas esto mediante la caracterización social realizada a los habitantes del corregimiento de Mocondino.

1.5.3. Tipo de investigación

La investigación propuesta se enfocará en un tipo explicativo, dirigido a comprender las relaciones de causa y efecto entre la variabilidad climática y la oferta hídrica en la microcuenca Dolores. Al emplear métodos cuantitativos y cualitativos, este enfoque permitirá indagar en las razones detrás de los cambios en el suministro de agua, analizando los datos a futuro por medio de

la modelación hidrológica, con el propósito de proporcionar una comprensión de la afectación del recurso hídrico a futuro ante escenarios de variabilidad climática.

1.5.4. Población y muestra / Unidad de trabajo y unidad de análisis

Como muestra, se toma el área perteneciente a la microcuenca Dolores en el corregimiento de Mocondino, en el cual la muestra comprende 05 quebradas las cuales abastecen al cauce principal las cuales son: quebrada Motilón uno, Quebrada Motilón dos, Quebrada Chorrera Negra, Quebrada Tambillo y Quebrada Toma Alta y la población en esta investigación se enfatiza en las actividades agrícolas y ganaderas dentro del área de la microcuenca Dolores desarrolladas por los habitantes de los sectores de Dolores centro, Mocondino Alto, Medio y Bajo.

1.5.5. Técnica e instrumentos de recolección de información

1.5.5.1. Las técnicas de investigación. Las técnicas de investigación desarrolladas en la investigación se basaron en:

- Evaluación e identificación en campo del área de estudio perteneciente a la microcuenca Dolores.
- Identificación del sitio: se realizó la localización a través del software Google Earth
- La caracterización socioeconómica de la comunidad de Mocondino se realizó por medio de las siguientes etapas:
 - Identificar la organización del corregimiento: Se realiza la identificación los sectores pertenecientes al corregimiento de Mocondino y al área de la microcuenca Dolores.
 - Consultar la población y la tasa de crecimiento actual: Recolectar información a través del censo poblacional 2018 realizado por el DANE, con el fin de determinar la demografía de la comunidad.
 - Determinar el área de influencia hídrica: Determinar las comunidades pertenecientes al corregimiento de Mocondino y al área de la microcuenca que se abastezcan hídricamente.

- Análisis de la dimensión social: El enfoque empleado para el análisis de la dimensión social es de tipo integral en el cual se considera la educación, salud, viviendas, acueducto, alcantarillado, disposición de desechos, energía eléctrica, telecomunicaciones y vías de comunicación en base a un enfoque participativo considerando las juntas de acción comunal y acueducto.
- Análisis de la dimensión económica: La dimensión económica se analiza a través de la participación de las juntas comunitaria y la observación en campo con el fin de determinar las actividades primarias que participan en la economía del corregimiento.
- Identificación y evaluación de la problemática: Determinar la problemática actual en la comunidad con relación al uso del recurso hídrico a través del análisis de la dimensión socioeconómica.
- La caracterización hidrológica de la microcuenca Dolores se realizó por medio de las siguientes etapas:
 - Parámetros de forma de la microcuenca: Se realizó de acuerdo a las bases teóricas de la hidrología.
 - Topografía del terreno: Empleando el uso del software ArcGIS y Global Mapper se realiza el levantamiento generando curvas de nivel cada 50 metros.
 - Red y densidad de drenaje: Se llevó a cabo la red y densidad de drenaje por medio del software ArcGIS en el cual se emplea el archivo “.shp” de la red hídrica de la microcuenca.
- La caracterización climática en el área de la microcuenca Dolores se realizó por medio de las siguientes etapas:
 - Identificación de las estaciones meteorológicas: la identificación se realiza a través de la información meteorológica almacenada en el caso de la investigación es de mínimo diez años
 - Recolección de la información: A través del Ideam se obtiene información relacionada con temperatura, precipitación, humedad, brillo solar y evaporación en el área de la microcuenca hidrológica.
- El escurrimiento superficial se determina a partir del método experimental de aforo de caudales por flotadores.

- Los caudales máximos se determinan a partir de las bases teóricas de la hidrología.
- Se realizó la modelación ante escenarios de cambio climático con la información recolectada.
- Se analiza la afectación ante la oferta hídrica en cincuenta años en la microcuenca hidrológica.

1.5.5.2. Instrumentos de investigación.

Como instrumento de investigación, se hace uso de las vistas de campo al lugar del proyecto, realizando observación para definir el área perteneciente a la cuenca hidrológica, como también se contó con la información suministrada por CorpoNariño y la alcaldía de Pasto, las cuales permitieron corroborar la información obtenida previamente, generando un análisis y relación de la modelación ante escenarios de cambio climático.

2. Presentación de resultados

Mediante la implementación de una modelación integral de las variables involucradas en el cambio climático en la cuenca hidrográfica Dolores, ubicada en el municipio de San Juan de Pasto, esta tesis de grado presenta una proyección de escenarios futuros concernientes a la disponibilidad de recursos hídricos y el impacto del cambio climático en el ámbito de dicha microcuenca hidrográfica. La exploración de las transformaciones anticipadas en determinantes climáticos clave, como las pautas de precipitación y temperaturas, y su correlación con la provisión y repartición de agua en la cuenca, ha sido realizada a través de la recolección de datos climáticos históricos y la aplicación de modelos de simulación. Este estudio aspira a establecer un punto de partida para futuras investigaciones y la toma de decisiones fundadas, con el propósito de promover la implementación de políticas y prácticas encaminadas a fortalecer la resiliencia y la preservación de sistemas hídricos frente a las vicisitudes del cambio climático en el contexto específico de la mencionada cuenca hidrográfica.

2.1. Análisis e interpretación de resultados

2.1.1. Caracterizar socioeconómica, climática e hidrológicamente la microcuenca Dolores

2.2.1.1. Localización geográfica. La ubicación geográfica del área perteneciente a la microcuenca Dolores, se determina a través del software Google Earth Pro, el cual permite definir los límites y el área circundante de la cuenca, a partir de lo anterior, la ubicación de la microcuenca hidrológica se presenta a continuación:

Tabla 8

Coordenadas geográficas microcuenca

Ubicación geográfica	
Latitud	25° 14' 67.91"
Longitud	13° 05' 34.72"

Figura 4

Vista satelital ubicación microcuenca Dolores en relación al municipio de Pasto

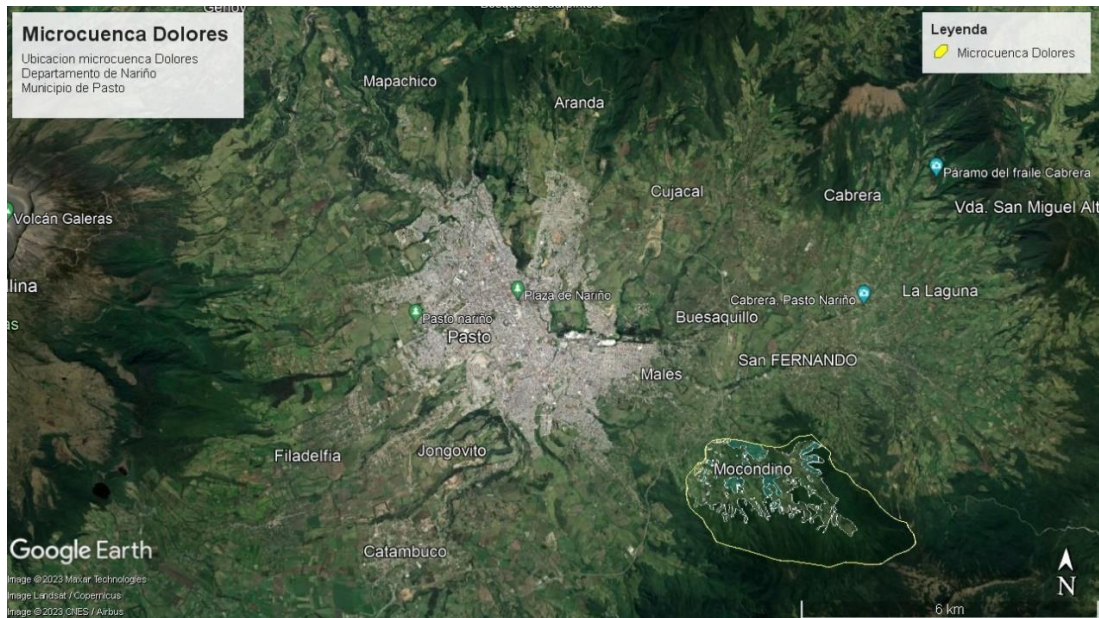


Figura 5

Vista satelital ubicación microcuenca Dolores



En la localización satelital de la microcuenca Dolores, se puede observar que el área geográfica está delimitada al norte por los sectores del río Pasto, al sur por el sector de Loma Peña Blanca, al noroeste por el sector de Pejendino y al oeste por los caseríos El Rosario y Jamondino, la microcuenca hidrológica desempeña un papel fundamental al abastecer de agua a los principales sectores del área los cuales son Mocondino Alto, Mocondino Medio, Mocondino Bajo y el centro de Dolores.

Tabla 9

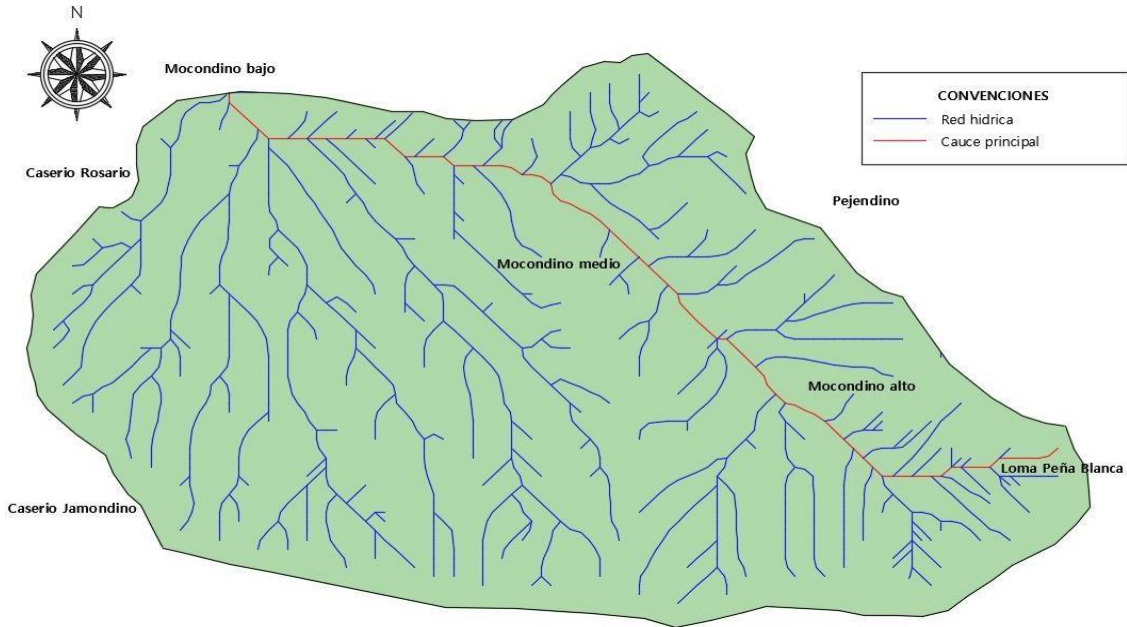
Información geográfica

Información geográfica	
Localización	Pasto - Nariño
	Norte Rio Pasto
	Noreste Pejendino
Distribución territorial	Oeste Caserío Rosario y Jamondino
	Sur loma Peña Blanca
Sectores beneficiarios	Mocondino
	Dolores centro

Obtenida la información anterior, se elabora y se exporta un archivo KMZ obtenido a partir de Google Earth pro y empleando el software ArcGIS – ArcMap 10.4.1 se elabora un modelo de representación cartográfica del área de la cuenca Dolores. (Véase Anexo. A)

Figura 6

Información geográfica microcuenca Dolores



De acuerdo con la información correspondiente a la localización geográfica de la microcuenca hidrológica, se realizó una caracterización socioeconómica en la microcuenca, teniendo en cuenta la ubicación de los sectores limitantes en el área. Con el objetivo de examinar el uso actual del recurso hídrico por parte de las comunidades abastecidas, enfocado en comprender cómo la población utiliza el recurso hídrico, considerando las condiciones socioeconómicas de los sectores circundantes en la microcuenca Dolores.

2.2.1.2. Caracterización socioeconómica. La caracterización socioeconómica se realizó en colaboración directa con las comunidades que viven y dependen del recurso hídrico en la zona correspondiente a la microcuenca hidrológica, el objetivo principal fue determinar y reconocer los elementos fundamentales del entorno ambiental y social, centrándose en la disponibilidad y utilización del agua. Para obtener la información necesaria e identificar el comportamiento

socioeconómico de la comunidad de Mocondino y demás sectores se emplea la herramienta de investigación cualitativa denominada entrevista, esta se realizó a través de las organizaciones representativas comunitaria, como lo son, la junta de acción comunal y la junta de acueducto comunal, con el propósito de obtener información detallada y contextualizada en relación al desarrollo económico y la gestión del recurso hídrico.

2.2.1.2.1. Dimensión social. En el análisis de la dimensión social de la comunidad de Mocondino y sus sectores pertenecientes a la microcuenca hidrológica, se enfoca en entender los factores sociales que influyen en el desarrollo y bienestar de las comunidades, el objetivo de analizar la dimensión social es de identificar los factores que intervienen en la gestión del recurso hídrico, ya que involucra las interacciones y dinámicas de la población con relación al agua. En el análisis de la dimensión social, se enfoca en examinar diversos aspectos, tales como:

La demografía y tasa de crecimiento en la población de Mocondino, según los datos proporcionados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), se estima que en el área de la cuenca Dolores, específicamente en el corregimiento de Mocondino, ubicado en la zona rural del municipio de Pasto, reside una población total de 653 habitantes, según el último censo realizado en el año 2018. Además, estos datos indican un aumento en la población con una tasa de crecimiento anual del 1.04% durante ese período, según la información oficial del DANE publicada en 2018. (DANE,2018). Para el año 2025 se espera que en el corregimiento de Mocondino exista 846 habitantes más, y para el año 2050 se proyecta un aumento de 1095 habitantes, de acuerdo al porcentaje de crecimiento poblacional del 1.04%, lo cual refleja un crecimiento sostenido en la población de Mocondino a lo largo de los años, según las tendencias actuales de crecimiento demográfico.

En el corregimiento de Mocondino, la comunidad está estructurada a través de juntas comunitarias, siendo la Junta de Acción Comunal la principal, la cual desempeña funciones en el desarrollo local y sus áreas circundantes, la cual su función primordial radica en contribuir al progreso de la comunidad, buscando soluciones para los desafíos que afectan el desarrollo del corregimiento. Además, existe una Junta de Acueducto, encargada de administrar y planificar la distribución y uso del recurso hídrico en el área de abastecimiento de la cuenca Dolores, de igual

manera, está presente una junta religiosa, que se dedica a coordinar y participar en eventos religiosos dentro del corregimiento, estas organizaciones comunitarias representan una parte fundamental del tejido social en la comunidad, colaborando activamente para mejorar la calidad de vida y el mejoramiento del corregimiento.

En el ámbito educativo del corregimiento, la población tiene acceso a instituciones educativas de educación primaria y secundaria, en Mocondino centro, se encuentra un centro educativo de educación primaria que cumple un rol fundamental en la formación académica y personal de los niños de la comunidad. Además, en Mocondino Bajo, existe un establecimiento de educación secundaria, brindando oportunidades educativas más avanzadas para los adolescentes del área. Estas instituciones educativas son pilares fundamentales para el desarrollo integral del corregimiento, proporcionando conocimientos y habilidades esenciales para las generaciones presentes y futuras de la comunidad.

Figura 7

Institución educativa señora de la Visitación sector de Mocondino centro



En la actualidad, el corregimiento de Mocondino enfrenta la ausencia de una infraestructura médica local, lo que implica que los residentes dependen del centro de salud del corregimiento de la Laguna para recibir atención médica y dental básica, esta situación subraya la carencia de

instalaciones de salud en Mocondino y la necesidad urgente de contar con una infraestructura adecuada para satisfacer las necesidades de atención médica de la comunidad. La falta de un centro de asistencia médica en Mocondino puede generar desafíos significativos, especialmente en situaciones de emergencia o para aquellos que requieren atención médica regular, la dependencia del centro de salud en el corregimiento de la Laguna resalta la importancia de mejorar las infraestructuras de salud en Mocondino, garantizando así servicios médicos más accesibles y adecuados para los residentes del corregimiento.

La infraestructura residencial en el corregimiento de Mocondino se caracteriza por aproximadamente 150 viviendas situadas en el área de la microcuenca Dolores, estas residencias son predominantemente rurales y se han construido utilizando métodos artesanales, en su mayoría, estas casas son de una sola planta y están fabricadas principalmente con adobe y ladrillo en su estructura, un rasgo distintivo de estas viviendas es que las de mayor antigüedad suelen estar equipadas con pozos sépticos para el desecho de aguas negras, ya que no cuentan con sistemas de alcantarillado. Es importante destacar que, a pesar de las construcciones tradicionales, se observa la presencia creciente de nuevas viviendas en el corregimiento, estas nuevas residencias están siendo construidas con técnicas y materiales más modernos, lo que indica una transición gradual hacia estructuras más contemporáneas.

Figura 8

Vivienda típica residencial corregimiento de Mocondino



El suministro de agua para el corregimiento de Mocondino proviene directamente de la microcuenca Dolores, durante el proceso de transporte, el agua no es sometida a ningún tratamiento de potabilización debido a la ausencia de una planta de tratamiento de agua específica en la zona, según la información proporcionada por la Junta de Acueducto, el único procedimiento que se lleva a cabo es la desinfección mediante cloración y filtrado, lo cual se realiza en el tanque de almacenamiento ubicado en Mocondino Alto. La falta de una planta de tratamiento de agua resalta una limitación importante en la infraestructura de abastecimiento de agua del corregimiento, subrayando la necesidad urgente de invertir en infraestructuras para garantizar un suministro de agua potable seguro y confiable para los residentes de Mocondino.

Figura 9

Tanque de almacenamiento de agua sector Mocondino alto



En el corregimiento de Mocondino, se enfrenta una importante carencia en términos de infraestructura de alcantarillado, ya que actualmente no existe un sistema que permita gestionar de manera adecuada las aguas residenciales y pluviales, en la mayoría del área de la cuenca, las aguas negras y de lluvia son canalizadas a través de zanjias improvisadas que finalmente desembocan en el curso del río Pasto. Esta situación presenta varios desafíos significativos para la población local y la microcuenca hidrológica en su conjunto, en primer lugar, la ausencia de un sistema de alcantarillado adecuado expone a la población a riesgos sanitarios y ambientales, ya que las aguas residuales pueden contaminar tanto el suelo como las fuentes de agua cercanas, además, la

disposición inadecuada de las aguas pluviales puede provocar inundaciones y daños en las viviendas y la infraestructura local, afectando directamente la calidad de vida de los habitantes. Además, la falta de un sistema de alcantarillado dificulta la gestión sostenible de los recursos hídricos en la microcuenca, la contaminación potencial del río Pasto, debido a la descarga directa de aguas residuales sin tratamiento, amenaza la integridad del ecosistema acuático y, por ende, la disponibilidad de agua para consumo humano y actividades agrícolas.

Figura 10

Alcantarillado salón comunal Mocondino centro



2.2.1.2.2. Dimensión económica. El análisis de la dimensión económica en el corregimiento de Mocondino es esencial para comprender la intersección entre la economía local y el suministro de agua de la microcuenca Dolores, este análisis de la dimensión económica no solo implica una mera descripción de las actividades económicas actuales, sino que también se enfoca en analizar en profundidad el contexto económico local, evaluando su relación intrínseca con la disponibilidad y gestión del recurso hídrico, con el fin de identificar las actividades que impactan en el uso y disponibilidad del agua.

En el corregimiento de Mocondino, la agricultura es la base de la economía local y define la identidad de la población, El corregimiento se destaca por su producción agrícola diversificada, incluyendo cultivos de papa, maíz, zanahoria, lechuga, cebolla y una variedad de hortalizas, lo distintivo de esta actividad radica en su enfoque hacia pequeñas y medianas producciones las cuales no son solo generadores de alimentos , sino también ingresos para sus familias y la comunidad en conjunto, los productos cultivados, aunque en cantidades modestas, se comercializan en los centros de mercado locales, donde son vendidos tanto por los habitantes de Mocondino como por intermediarios. Sin embargo, la actual expansión del campo agrícola también plantea desafíos importantes en cuanto a la oferta hídrica, la expansión de las áreas de cultivo ha impactado directamente en la disponibilidad de agua en el corregimiento, ya que se requiere un suministro constante y suficiente para el riego de los cultivos.

Figura 11

Cultivo de papa Mocondino alto



En el corregimiento de Mocondino, la actividad pecuaria ocupa un lugar central, con un enfoque significativo en la producción de leche, esta práctica ganadera está estrechamente ligada a las diversas fuentes de agua dulce y los extensos pastizales que se encuentran en el área de la cuenca, la comunidad se ha especializado en la cría de ganado lechero, aprovechando los recursos naturales circundantes para generar una producción láctea sustancial. Además de la producción lechera en

sí, las familias de Mocondino han diversificado sus fuentes de ingreso a través de la creación de alimentos derivados de la leche, como el queso, el kumis y el yogurt. Estos productos lácteos no solo satisfacen las necesidades locales, sino que también se han convertido en valiosas fuentes de ingresos económicos para las familias, esta diversificación no solo fortalece la economía local, sino que también crea una red de empleo significativa en la comunidad, proporcionando oportunidades laborales para los habitantes locales.

La intensiva actividad pecuaria centrada en la producción de leche y sus derivados en el corregimiento de Mocondino puede afectar significativamente el recurso hídrico local, la cría de ganado lechero requiere grandes cantidades de agua tanto para la hidratación de los animales como para el riego de pastizales, la demanda hídrica asociada con esta actividad, especialmente en períodos secos, puede ejercer presión sobre las fuentes de agua dulce en la microcuenca, agotando los recursos disponibles y afectando la calidad del agua. Además, el lavado de equipos y utensilios utilizados en la producción láctea puede contribuir a la contaminación del agua, afectando la disponibilidad de agua limpia para consumo humano y otros usos.

Figura 12

Ganado vacuno Mocondino centro



2.2.1.2.3. Identificación de la problemática actual. Analizando el área de la microcuenca Dolores con respecto a sus veredas, se identifica el desarrollo agrícola y ganadero el cual representa en gran medida un problema para las comunidades pertenecientes al área, debido a que se benefician hídricamente de la microcuenca, de acuerdo a esto las actividades humanas y el cambio climático están deteriorando severamente los ecosistemas autóctonos de la región que afecta directamente la oferta hídrica para la población. Identificando los problemas ambientales que se presentan en el área, dentro de las actividades de mayor impacto ambiental se encuentra el uso inapropiado de los recursos naturales, tal es la deforestación cuya actividad comprende en la reducción forestal del ecosistema con el fin ampliar la frontera agrícola, simultáneamente las prácticas inadecuadas en los procesos de sembrado y cosecha exponen al ambiente a factores como la degradación del suelo, el acaparamiento del ecosistema y a la consecuente desplazamiento y desaparición del medio ambiente.

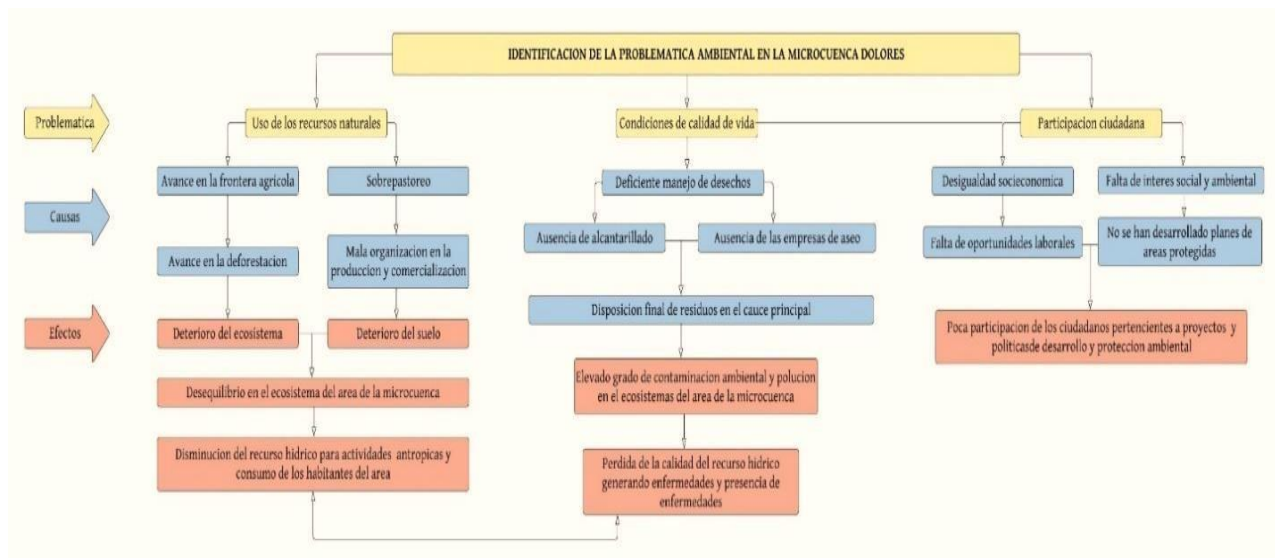
El sobre pastoreo del ganado es otra actividad en la cual se usan los recursos naturales de manera inadecuada, la cual genera gran impacto ambiental en el suelo debido a la reducción de la capacidad de infiltración de la lluvia y aumentando la tasa de erosión consecuencia a la pérdida de la capa orgánica por consumo para los animales a este aspecto sumándole el alto consumo de recurso hídrico para el sostenimiento de los animales se observa en las actividades antrópicas del área un desequilibrio ecológico entrono al balance hídrico disponible en la cuenca.

Las condiciones en la calidad de vida de los habitantes se contempla en el impacto ambiental en el recurso hídrico el aspecto a tener en cuenta es en el deficiente manejo de los residuos, el área de la cuenca no cuenta con alcantarillado en lo cual no es posible el recibir, conducir ni evacuar los residuos y los escurrimientos superficiales producto de las precipitaciones para que puedan ser tratados adecuadamente, todo estos desechos se disponen en el cauce principal de la cuenca afectando a los mismos residentes del área ya que esto genera un elevado grado de contaminación ambiental y polución en el ecosistema, disminuyendo la calidad del agua aumentando la presencia de enfermedades ya que la zona no cuenta con ninguna planta de tratamiento y el consumo es directamente desde la bocatoma hasta la red de distribución de cada uno de los hogares.

La participación ciudadana es otro aspecto a analizar como problemática ya que por falta de interés en el desarrollo de los planes de manejo del recurso hídrico no han dimensionado la afectación que presenta el área debido a esto no se han establecido adecuadamente políticas de manejo del recurso hídrico en el desarrollo y protección de la cuenca Dolores. Para la identificación y cuantificación de los principales problemas identificados en la cuenca Dolores se elabora un árbol de problemas propuestos de acuerdo a la FAO 2015, permitiendo identificar las causas y efectos que dimensionan las problemáticas ambientales. (Véase anexo. B)

Figura 13



Identificación de la problemática ambiental



2.2.1.2.4 Identificación y evaluación de la problemática actual. En la identificación de las acciones impactantes de las actividades antropogénicas de la comunidad se centraliza en la afectación del recurso hídrico en el cual es susceptible de alteraciones e impactos ambientales en el área de la cuenca Dolores y así evaluar con un enfoque cualitativo los impactos ambientales que generan disminución en la oferta hídrica de la cuenca.

Tabla 10

Identificación y evaluación problemática ambiental

Problemática ambiental actual en la cuenca Dolores		
Actividades antrópicas impactantes	Descripción	Anexo
Ganadería	<p>El manejo de la ganadería abarca una sobrepoblación de animales lo cual aumenta el manejo de grandes extensiones de tierra ocasionando aceleración en los procesos de erosión del suelo y contribuyendo a la contaminación del ambiente por los residuos generados por ellos (Heces fecales).</p>	
Agricultura	<p>El área de la cuenca Dolores presenta una gran zona de monocultivos como papa, maíz, trigo entre otros productos de la región, lo cual por falta de conocimiento se emplea practicas adecuadas agrícolas las cuales producen procesos degradativos, contaminación del suelo y aguas superficiales de la cuenca.</p>	

Calidad de vida

En el área de la cuenca la población presenta ausencia del sistema de alcantarillado y un plan de manejo de residuos sólidos por la empresa prestadora del servicio, en la cual el manejo actual es deshacerse de los residuos por medio del cauce principal generando disminución en la calidad del agua y convirtiéndola en un vector de enfermedades por consumo de la misma



Participación ciudadana

La falta de atención y participación ciudadana ha provocado un estancamiento en el desarrollo ambiental del área, implicando la ausencia de procesos de construcción social en beneficio de la comunidad y la búsqueda de soluciones ante la problemática ambiental existente.



2.2.1.3. Caracterización hidrológica. La caracterización hidrológica de la cuenca Dolores se realiza con el propósito de analizar y recopilar información con el fin de comprender el comportamiento del recurso hídrico proporcionando una visión integral y base fundamental para la modelación hidrológica ante escenarios de cambio climático.

2.2.1.3.1. Caracterización morfométrica. La caracterización morfométrica de la cuenca Dolores, se realiza empleando el uso de la información geográfica suministrada por el software Google Earth Pro y analizada mediante el software Global Mapper V.18 y ArcGIS 10.4, obteniendo información que permite el análisis de la forma y medidas geométricas de la cuenca hidrológica. De acuerdo a lo anterior el análisis de los parámetros físicos de la cuenca hidrológica se obtiene la siguiente información.

Tabla 11*Parámetros físicos y forma*

Parámetros físicos y forma		
Descripción	Unidades	Valor
Área	Km ²	6.85
Perímetro	Km	10.90
Longitud del cauce principal	Km	4.15
Factor de forma	-	0.40
Índice de circularidad	-	0.72
Índice de Compacidad	-	1.17

2.1.1.5.3. Clasificación según el área. En Colombia, las cuencas hidrográficas se clasifican en diferentes categorías según su área de drenaje. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) ha establecido una clasificación específica que divide las cuencas en diferentes tamaños. A continuación, se presenta una clasificación típica de las cuencas en Colombia según su área:

Tabla 12*Clasificación de una cuenca según el área*

Clasificaciones de cuencas según el área	
Descripción	Valor (Km²)
Microcuenca	< 50
Pequeña cuenca	50 - 500
Mediana Cuenca	500 - 2000
Grande Cuenca	2000 - 10000
Principal Cuenca	>10000

Fuente. CIDIAT (1978).

La cuenca hidrológica Dolores se clasifica según el instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) recibe la clasificación según el área de microcuenca;

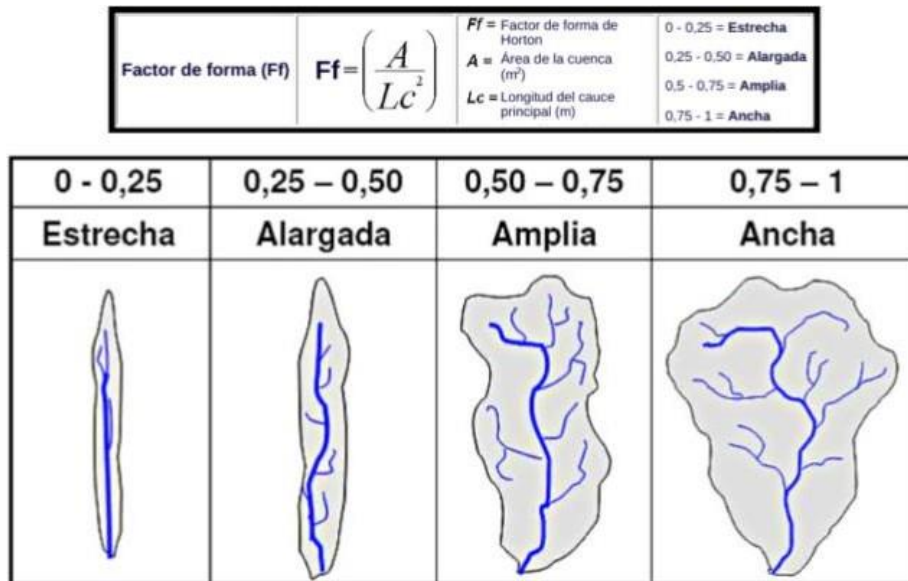
ya que cuenta con un área de 6.85 km² menor a 50 km², el perímetro de la microcuenca es de 10.90 km y con una longitud del cauce principal de 4.15 Km.

2.1.1.5.4. Parámetros de forma. Los parámetros de forma en una cuenca hidrográfica son medidas cruciales que describen la geometría y morfología de la cuenca, estos parámetros desempeñan un papel fundamental en la comprensión de la respuesta hidrológica de la cuenca y son de gran utilidad en estudios hidrológicos y geomorfológicos (Johnson et al., 2018).

Según Máximo Villón (2004), “El factor de forma (Kf) es la relación entre el área de la cuenca con el cuadrado de su longitud principal” (P.42).

Figura 14

Factor de forma (Kf)



Fuente. Bell (1999)

El valor del parámetro de forma de 0.40 obtenido para la microcuenca Dolores implica que su configuración es amplia o ancha en términos hidrológicos. En este contexto, este valor señala que la cuenca tiene una forma alargada y estrecha en comparación con una forma más circular, esta estructura hidrológica particular indica que la cuenca tiene una respuesta moderada-alta ante

eventos de crecida, lo que significa que es capaz de manejar un flujo de agua relativamente mayor durante episodios de lluvias intensas o crecidas, además, esta forma ovalada está asociada con una producción de caudales de magnitud moderada, lo que sugiere que la cuenca genera flujos de agua de tamaño mediano en condiciones normales.

Según Máximo Villon (2004), “El índice de circularidad (Ic) es el cociente entre el área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es equivalente al perímetro de la cuenca” (p. 42).

Figura 15

Índice de circularidad (Ic)

Índice de Circularidad de Miller (Ic)	0 - 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,75	0,75 – 1
	Oblonga	Ovalada	Oval	Circular
$Ic = \left(\frac{4\pi A}{P^2} \right)$ <p>Ic= Índice de circularidad de Miller A= Área de la cuenca (m²) P= Perímetro de la cuenca (m)</p>				
Producción sostenida de caudales	Muy alto	alto	moderado	bajo
Potencial a crecientes	bajo	moderado	alto	Muy alto

Fuente. Bell (1999)

Se obtiene un índice de circularidad de 0.40 en la microcuenca Dolores señalando que su forma es oval en términos hidrológicos, este valor específico indica que la microcuenca tiene una geometría más estirada que circular, lo que sugiere una relación más larga entre su perímetro y su área.

En el contexto hidrológico, una circularidad de 0.40 indica una forma alargada u ovalada, esta configuración tiene implicaciones significativas en el comportamiento del agua en la cuenca, las cuencas alargadas tienden a tener una respuesta hidrológica más eficiente frente a eventos de crecida, lo que significa que pueden gestionar el flujo de agua de manera más efectiva durante

períodos de lluvia intensa, además, esta forma alargada está asociada con una producción de caudales de magnitud moderada, lo que indica que la cuenca genera flujos de agua de tamaño mediano en condiciones normales

El índice de compacidad (K) es el cociente adimensional entre el perímetro de la cuenca y el perímetro del círculo como con área igual al tamaño de la cuenca (p. 43), Máximo Villon (2004).

Tabla 13
Índice de compacidad (Kc)

Índice de compacidad	
Kc	Clasificación
1 -1.25	Casi redonda a oval – redonda
1.25 a 1.5	Oval redonda a oval - oblonga
1.5 a 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
> 1.75	Rectangular

La microcuenca Dolores presenta un valor de índice de compacidad de 1.17, lo que indica que su forma es oval – redonda, indica una distribución más uniforme de la lluvia y una menor variabilidad en la respuesta del flujo de agua en la microcuenca. De acuerdo a lo anterior, se presenta la clasificación realizada para el área de la microcuenca Dolores.

Tabla 14
Clasificación parámetros físicos y forma

Parámetros físicos y de forma			
Descripción	Unidades	Valor	Clasificación
Área	Km ²	6.85	Microcuenca
Perímetro	Km	10.90	-
Longitud del cauce principal	Km	4.15	-
Factor de forma	-	0.40	Alargada
Índice de circularidad	-	0.72	Oval

Índice de Compacidad

-

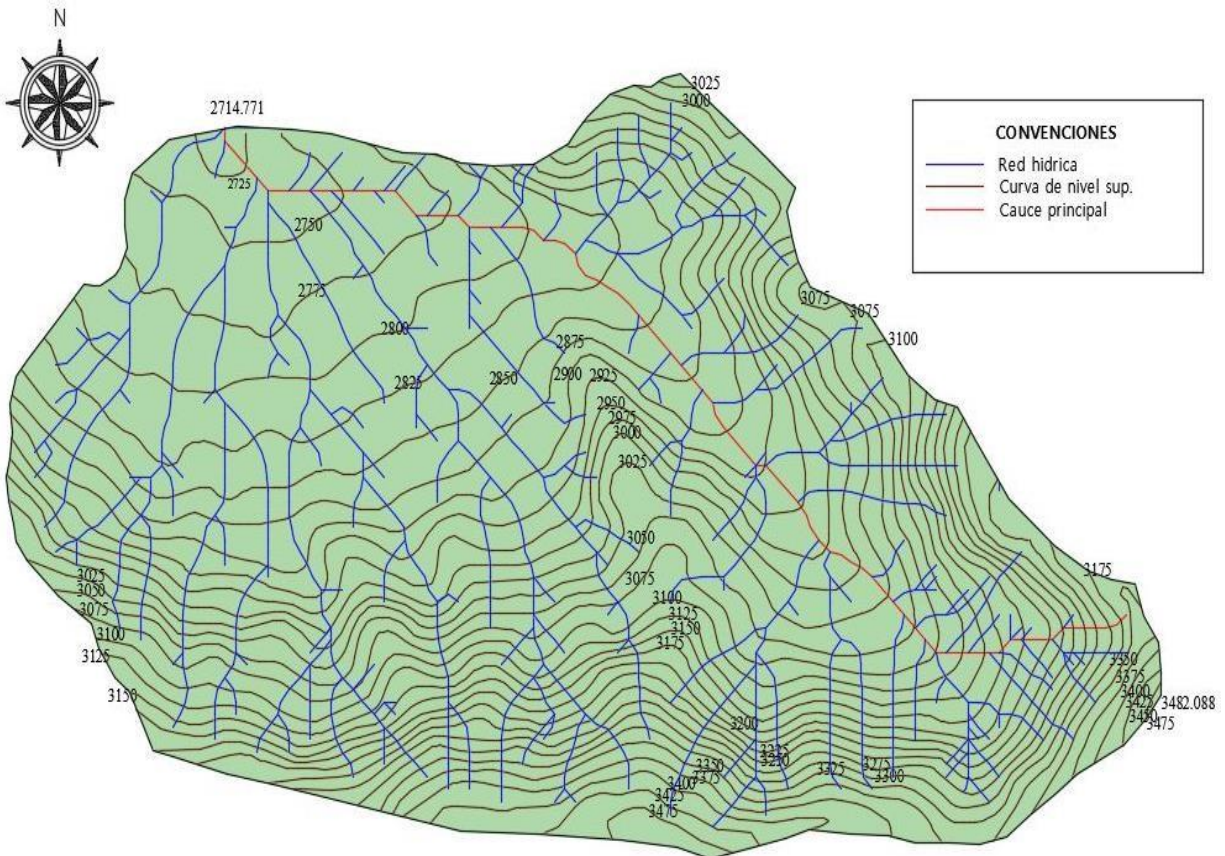
1.17

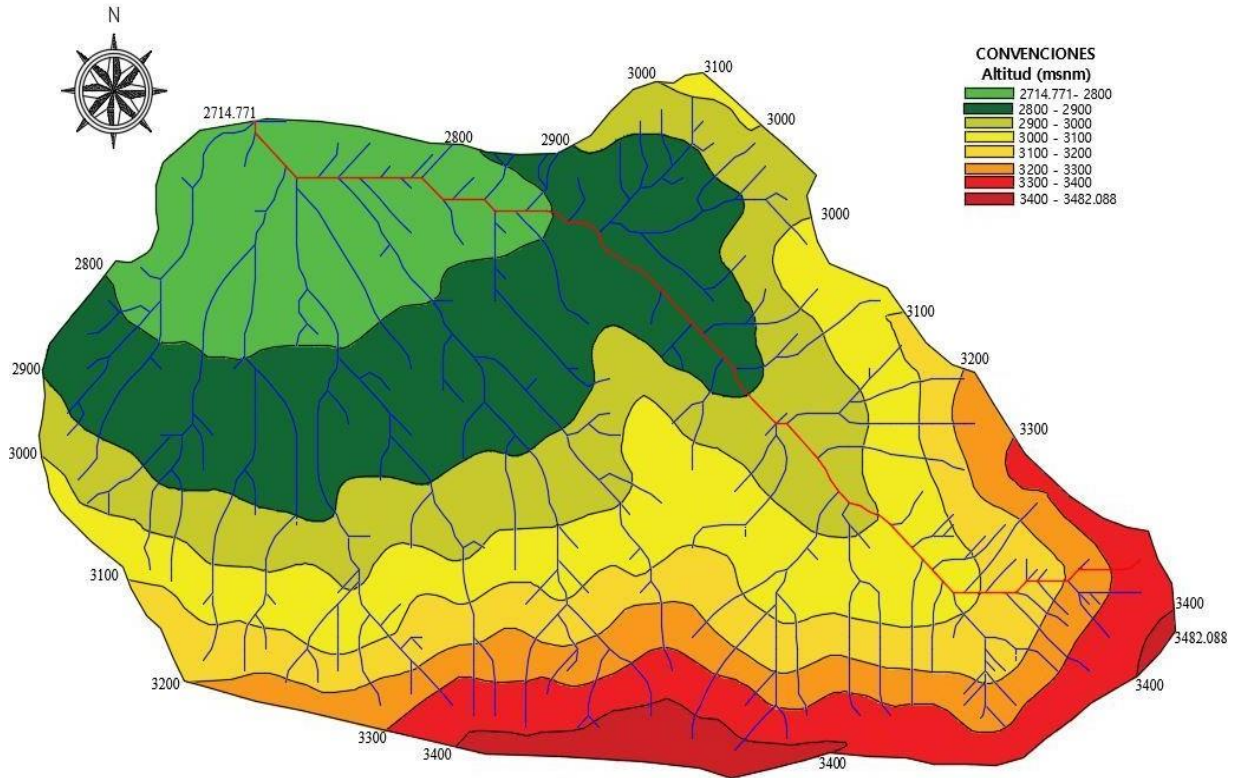
Redonda a oval-Redonda

2.1.1.5.5. Representación del relieve. La representación del relieve perteneciente a la microcuenca se determina empleando el software Global Mapper y así obtener la cartografía del área de la microcuenca, posteriormente exportando los datos obtenidos al software AutoCAD Civil 3D, en el cual se realiza el procedimiento de levantamiento de terreno como resultado la topografía y relieve de la cuenca hidrológica. (Véase anexo C)

Figura 16

Curvas de elevación o nivel microcuenca Dolores





Basándonos en la información previa, se calcula el área geométrica de la microcuenca mediante la utilización de una distribución geométrica o un rectángulo equivalente. También se evalúa la pendiente promedio y se generan las curvas representativas correspondientes.

2.1.1.5.6. Rectángulo equivalente. Para determinar los lados mayor y menor correspondiente al rectángulo equivalente se determinan a partir de las siguientes expresiones. Para determinar el lado mayor, se emplea la siguiente ecuación:

$$Lado Mayor = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K} \right)^2} \right)$$

Donde:

K: Índice de Gravelius o compacidad

A: Área de la cuenca

Se procede a calcular el lado mayor, reemplazando los datos en la ecuación:

$$Lado Mayor = \frac{1.17\sqrt{6.85}}{1.12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.17}\right)^2}\right)$$

$$Lado Mayor = 3.48$$

Para determinar el lado menor, se emplea la siguiente ecuación:

$$Lado menor = \frac{K\sqrt{Area}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2}\right)$$

Donde:

K: Índice de Gravelius o compacidad

A: Área de la cuenca

Se procede a calcular el lado menor, reemplazando los datos en la ecuación:

$$Lado menor = \frac{1.17\sqrt{6.85}}{1.12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1.17}\right)^2}\right)$$

$$Lado menor = 1.97$$

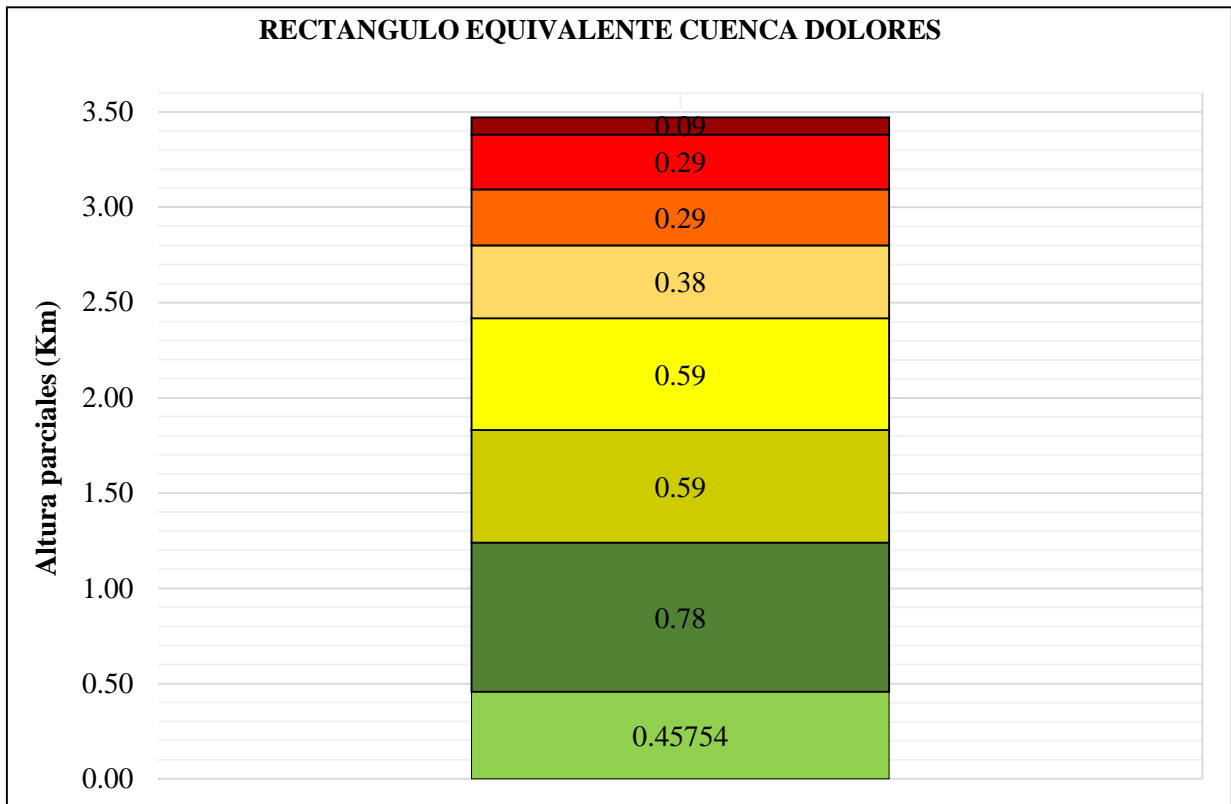
Utilizando la cartografía topográfica que representa los niveles de elevación, se derivan las cotas de elevación máxima y mínima dentro del ámbito de la microcuenca, estas cotas se registran a 3482.09 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) para el punto de mayor elevación, y a 2714.77 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) para el punto de menor elevación, con base en los datos previamente proporcionados, se procede a calcular las altitudes parciales (Li) para cada nivel de elevación.

En el contexto de esta investigación, se han establecido intervalos de elevación de 100 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), la obtención de las áreas correspondientes a estos intervalos se lleva a cabo utilizando el software Civil AutoCAD.

Tabla 15*Información rectángulo equivalente*

Rectángulo equivalente			
Curvas de nivel (msnm)		Áreas (Km2)	Li (Km)
Min	Max		
2714.771	2800	0.8997	0.45754
2800	2900	1.5393	0.78
2900	3000	1.1602	0.59
3000	3100	1.1555	0.59
3100	3200	0.7531	0.38
3200	3300	0.5729	0.29
3300	3400	0.5709	0.29
3400	3482.09	0.1742	0.09
Total		6.83	3.48

A partir de la información anterior, se genera el gráfico que representa el rectángulo equivalente. En este proceso, se confirma que la suma total de las alturas parciales, que asciende a 3.47 kilómetros, es igual al lado mayor del rectángulo, esto valida la correcta conversión de las curvas de nivel presentes en la cuenca a trazos rectos paralelos en el rectángulo equivalente.

Figura 17*Representación del rectángulo equivalente*

De acuerdo a la representación anterior, se constata que la extensión más significativa se ubica en el intervalo altitudinal de las curvas de nivel entre 2800 msnm y 2900 msnm, abarcando un área de 1.53 km², esta mayor área delimitada implica un tiempo de concentración prolongado y una consiguiente amplificación de la escorrentía en respuesta a los episodios de precipitación en esa zona.

2.1.1.5.7. Pendiente de la microcuenca. En el contexto de esta investigación, la pendiente de la microcuenca emerge como un factor primordial que ejerce influencia sobre su dinámica hidrológica y la trayectoria que el agua adopta en toda su extensión. La pendiente, en términos precisos, se define como la variación vertical en la elevación de la superficie terrestre por cada unidad de distancia horizontal, su función radica en caracterizar la inclinación del relieve presente en la

cuenca, desempeñando un papel crucial en la orientación y velocidad del flujo hídrico a lo largo de su recorrido (Máximo Villon, 2004).

El cálculo de la pendiente de la cuenca se efectúa mediante la aplicación del procedimiento reconocido como criterio de Alvord. Este método implica el empleo del software Civil AutoCAD para adquirir la longitud de las líneas de nivel en cada segmento considerado en las diferentes secciones de elevación, estableciendo simultáneamente la diferencia de alturas entre las elevaciones correspondientes a cada sección.

Tabla 16

Información pendiente de la cuenca

Pendiente de la cuenca			
Curvas de nivel (msnm)	Long. curvas de nivel (km)	Desnivel (Km)	
2714.771	2800	2.3	0.09
2800	2900	4.7	0.10
2900	3000	5.1	0.10
3000	3100	4.7	0.10
3100	3200	4.5	0.10
3200	3300	3.8	0.10
3300	3400	3.8	0.10
3400	3482.088	1.9	0.08
Total		30.77	0.77

De acuerdo a la información anterior, se emplea la ecuación de acuerdo al criterio de Alvord establece el producto del desnivel y la longitud de la curva de nivel sobre el área de la microcuenca hidrológica.

Para determinar la pendiente de la cuenca, se emplea la siguiente ecuación:

$$S = \frac{D * L}{A} * 100$$

Donde:

S: Pendiente de la cuenca

D: Desnivel (km)

L: Longitud curvas de nivel (Km)

A: Área de la cuenca (km²)

Se procede a calcular la pendiente de la cuenca, reemplazando los datos en la ecuación:

$$S = \frac{0.09 * 2.3 + 0.10 * (4.7 + 5.1 + 4.7 + 4.5 + 3.8 + 3.8) + 0.08 * 1.9}{6.85} * 100$$

$$S = 0.44 \approx 44\%$$

La microcuenca Dolores exhibe una pendiente que alcanza el 44%, lo cual conlleva un marcado cambio en la altura del terreno a medida que se avanza horizontalmente en su extensión. Esta particularidad se clasifica como empinada y, en el ámbito hidrológico, adquiere relevancia sustancial debido a su potencial para impactar diversos aspectos del flujo de agua y los procesos asociados. Las pendientes pronunciadas tienden a generar una mayor velocidad de escorrentía, lo que puede influir en la acumulación y transporte del agua a lo largo de la cuenca. Además, esta característica topográfica puede contribuir al aumento de la erosión del suelo y desencadenar respuestas más rápidas y agudas ante eventos de precipitación.

El perfil longitudinal se define como la representación gráfica en proyección horizontal de la longitud a lo largo del cauce frente a su altitud. La relevancia elaborar el perfil del cauce principal en la microcuenca reside en que provee una indicación de las variaciones de pendiente en los diversos segmentos del recorrido del cauce. Se determina a partir de información de la pendiente de la cuenca, y se materializa por medio de la disposición gráfica de la pendiente de la cuenca en función de la elevación y la longitud acumulada de las curvas de nivel de nivel.

Tabla 17

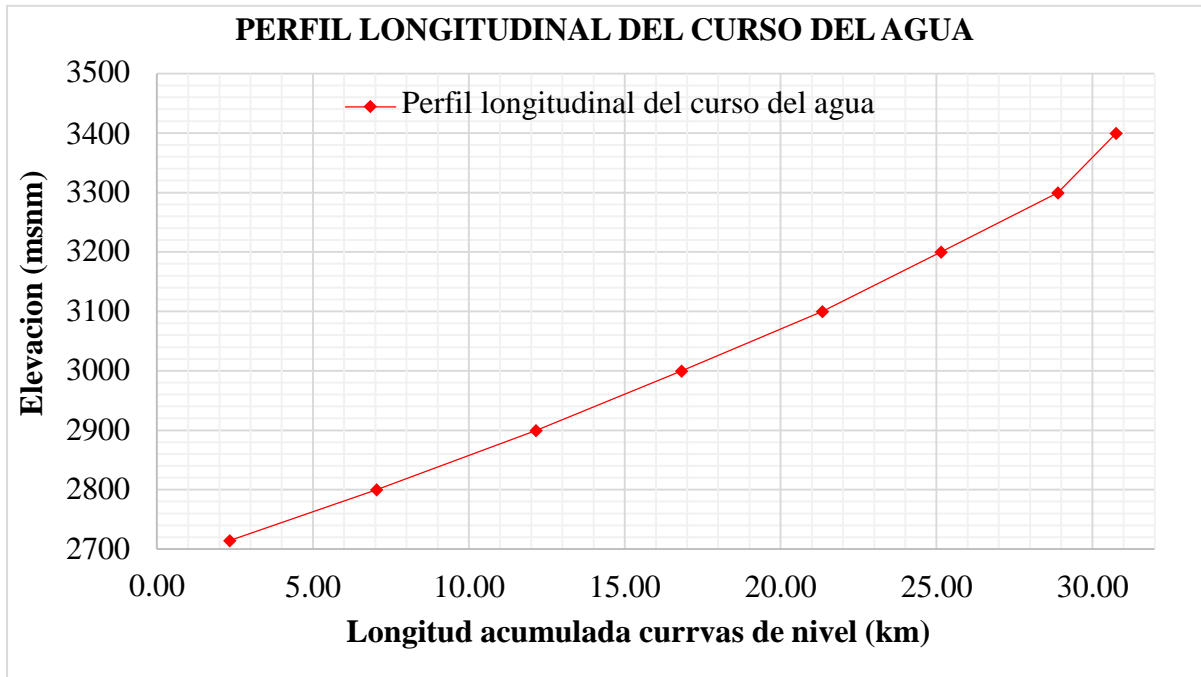
Información perfil longitudinal del curso del agua

Perfil longitudinal del curso del agua		
Curvas de nivel (msnm)	Longitudes curvas de nivel (km)	
2714.771	2800	2.3
2800	2900	7
2900	3000	12.1
3000	3100	16.8
3100	3200	21.3
3200	3300	25.1
3300	3400	28.9
3400	3482.088	30.8

Empleando la información anterior, se grafica el perfil longitudinal del curso del agua.

Figura 18

Representación perfil longitudinal del curso del agua



2.1.1.5.8. Pendiente media del cauce principal. Para determinar la pendiente del cauce principal se aplica el método de Taylor y Schwartz, el cual considera dos casos distintos, en el primer caso del método, se establece a partir de las longitudes de tramos uniformes, mientras que en el segundo caso se determina en función de las diferencias de altitud en cada tramo. En este contexto, se opta por llevar a cabo la caracterización utilizando el segundo caso del método de Taylor y Schwartz.

En base a lo anterior, se establecieron los datos adquiridos de las curvas de nivel en el área de la cuenca en relación con los puntos de referencia o abscisas, los cuales se ubican en intervalos de cincuenta metros sobre el nivel del mar, a partir de los cuales se obtiene la longitud correspondiente de cada tramo del cauce principal, el procedimiento anterior mencionado, se realiza a través del uso del software civil AutoCAD y Global Mapper los cuales permiten obtener la longitud de tramo y el nivel de cada Abscisas respectivamente. (Véase anexo. D)

Tabla 18
Información pendiente media del cauce principal

Pendiente media del cauce principal						
Elevación (msnm)		Long. tramo (m)	Σ Long. de tramo (km)	Desnivel (m)	Pendiente (S)	L/NS
2714.78	2750	530.272	0.530	35.22	0.066	2057.65
2750	2800	738.785	1.269	50.00	0.068	2839.83
2800	2850	544.836	1.814	50.00	0.092	1798.51
2850	2900	481.235	2.295	50.00	0.104	1492.97
2900	2950	441.583	2.737	50.00	0.113	1312.30
2950	3000	299.005	3.036	50.00	0.167	731.19
3000	3050	252.345	3.288	50.00	0.198	566.90
3050	3100	207.708	3.496	50.00	0.241	423.35
3100	3150	148.138	3.644	50.00	0.338	254.98
3150	3200	178.496	3.822	50.00	0.280	337.25

3200	3250	111.943	3.934	50.00	0.447	167.50
3250	3300	92.840	4.027	50.00	0.539	126.51
3300	3365.71	123.140	4.150	65.72	0.534	168.56
Total		4150				12277.5

Para determinar la pendiente media del cauce principal, se emplea la siguiente ecuación:

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \sqrt{S_i}} \right)^2$$

Donde:

S: Pendiente media del cauce

Li: Longitud total de tramo

Se procede a calcular la pendiente media del cauce, reemplazando los datos en la ecuación:

$$SS = \left(\frac{4150}{12277.5} \right)^2$$

$$S = 0.114 \approx 11.4 \%$$

La pendiente media del cauce principal, establecida en un 11.4 %, demuestra que, en promedio, el cambio en la elevación del terreno varía en un 11.4% de la distancia horizontal a lo largo del cauce, esta característica sugiere una inclinación moderada del terreno, esta cifra indica que el cauce exhibe una pendiente gradual, lo que suele resultar en un flujo de agua más controlado y menos pronunciado en términos de velocidad. Las pendientes de este tipo, alrededor del 11.4 %, son típicas de cursos de agua que no presentan inclinaciones extremadamente empinadas ni suaves,

lo que puede influir en la velocidad del flujo de escorrentía y en la interacción con procesos hidrológicos.

2.1.1.5.8. Curvas representativas. Las curvas representativas desempeñan un papel fundamental en la determinación del comportamiento hidrológico en función del relieve, lo cual ejerce una influencia directa en el escurrimiento de las aguas provenientes de precipitaciones, en este contexto, se destacan dos tipos de curvas representativas: la curva hipsométrica y la curva de frecuencia de altitudes, la curva hipsométrica, también referida como curva de altitudes acumuladas, exhibe cómo varía la elevación del terreno respecto al porcentaje acumulado del área total de la región, por otro lado, la curva de frecuencia de altitudes, también denominada curva de frecuencia altimétrica, proporciona una representación gráfica de la frecuencia con la que se presentan diversos intervalos altimétricos en el terreno. La obtención de las curvas representativas de la microcuenca se basa en la información derivada del rectángulo equivalente.

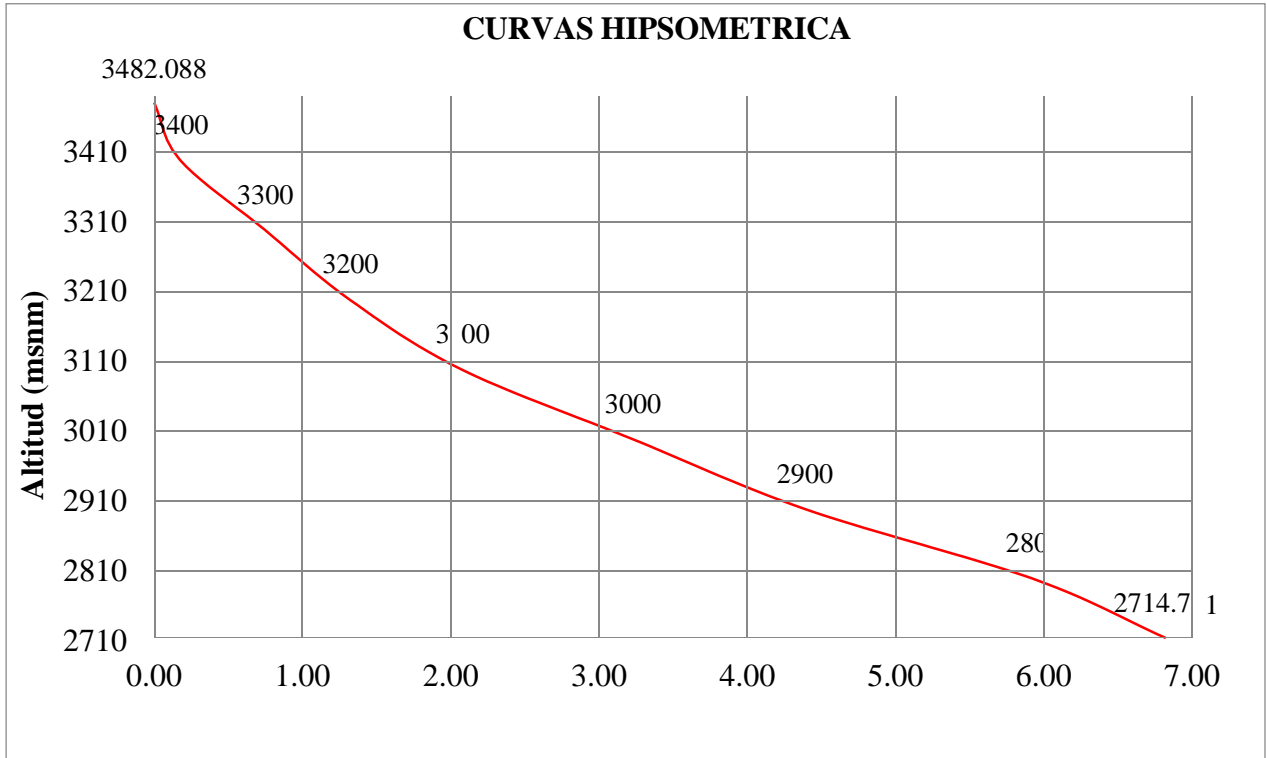
Tabla 19
Información de curvas representativas

Curvas representativas					
Elevación (msnm)	Áreas (Km2)	Área acumulada (Km2)	Área sobre altitud	% Total	% Total sobre altitud
2714.77	0	0	6.83	0.00	100.00
2800	0.900	0.900	5.93	13.18	86.82
2900	1.539	2.439	4.39	22.55	64.27
3000	1.160	3.599	3.23	17.00	47.27
3100	1.156	4.755	2.07	16.93	30.34
3200	0.753	5.508	1.32	11.03	19.31
3300	0.573	6.081	0.75	8.39	10.92
3400	0.571	6.652	0.17	8.36	2.55
3482.08	0.174	6.826	0.00	2.55	0.00
Total	6.83			100.00	

Según los datos previamente mencionados, se genera la curva hipsométrica de la cuenca Dolores utilizando la elevación y el porcentaje sobre las altitudes totales. Además, se elabora la curva de frecuencia de altitudes empleando el porcentaje total y la elevación.

Figura 19

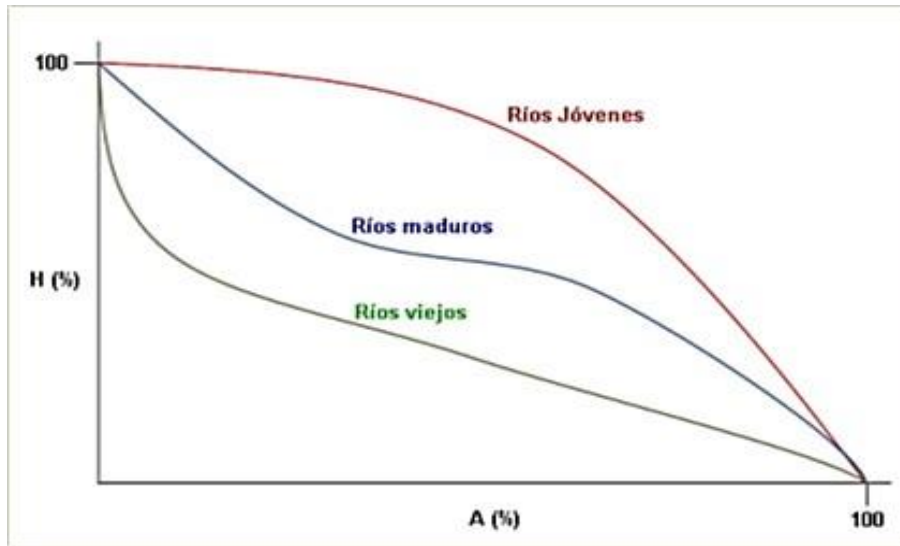
Representación curva hipsométrica



La clasificación de cuencas como jóvenes, maduras o antiguas se basa en la interpretación de la curva hipsométrica, en una cuenca joven, la curva hipsométrica tiende a tener una mayor proporción de su área a altitudes más bajas, indicando una topografía más abrupta y menos erosionada, en contraste, una cuenca madura mostrará una distribución más equilibrada, con elevaciones intermedias predominantes, por último, una cuenca antigua tenderá a tener una mayor proporción de su área a altitudes más altas, sugiriendo una topografía más suavizada debido a procesos erosivos a lo largo del tiempo (Smith, 2010).

Figura 20

Representación clasificación de la curva hipsométrica

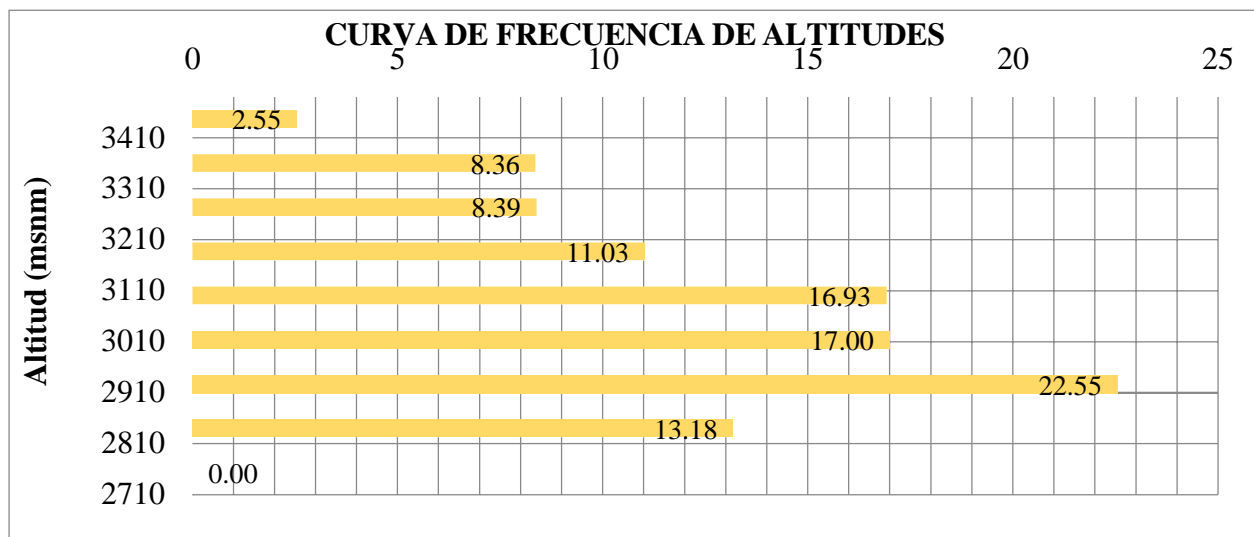


Fuente: Corporación autónoma regional de Risaralda (2007).

Basándose en lo mencionado previamente, la curva hipsométrica derivada del estudio se identifica, conforme a la clasificación, como representativa de una cuenca de carácter "vieja". Esta clasificación se establece debido a que la curva exhibe una predominancia más marcada de altitudes elevadas en contraste con las altitudes más bajas.

Figura 21

Representación clasificación de la curva de frecuencia de altitudes



Mediante el análisis de la curva de frecuencia de altitudes de la microcuenca, se destaca una significativa concentración altitudinal en el punto de 2910 metros sobre el nivel del mar (msnm), lo cual constituye un porcentaje notable del total con un valor del 22.55%. Esta observación refleja la prominencia de dicha altitud en el terreno circundante y puede indicar la presencia de características geológicas, geomorfológicas o hidrológicas particulares en esa elevación. La preeminencia de esta altitud puede influir en el patrón de drenaje y en la interacción entre la cuenca y los procesos hidrológicos.

2.1.1.5.9. Elevación media. La elevación media de la microcuenca se refiere al valor promedio de las altitudes presentes en toda la extensión del área de estudio. A continuación, se representa la información correspondiente a la elevación media.

Tabla 20
Información elevación media

Elevación media				
Curvas de nivel		Elev. Media	Área	A* E
Min	Max	(msnm)	(Km2)	
2714.77	2800	2757.3855	0.90	2481
2800	2900	2850	1.54	4387
2900	3000	2950	1.16	3423
3000	3100	3050	1.16	3524
3100	3200	3150	0.75	2372
3200	3300	3250	0.57	1862
3300	3400	3350	0.57	1913
3400	3482.088	3441.044	0.17	599
Total			6.83	20561

Para determinar la elevación media, se emplea la siguiente ecuación:

$$Em = \frac{\Sigma a * e}{A}$$

Donde:

Em: Elevación media

A: Área de la cuenca

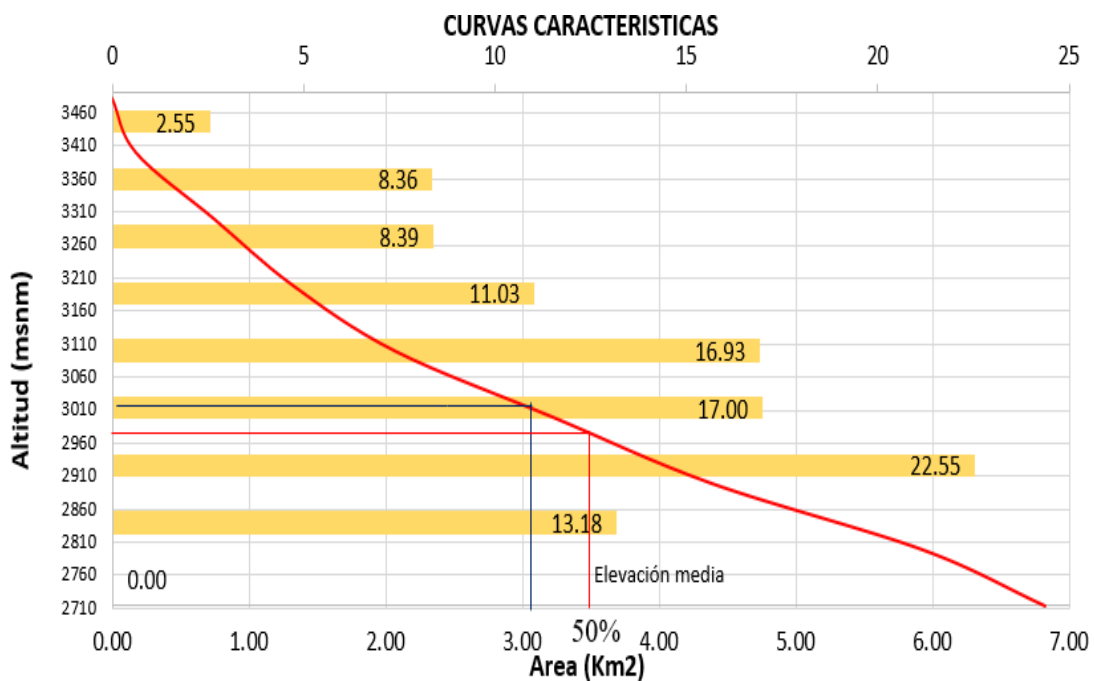
Se procede a calcular la elevación media, reemplazando los datos en la ecuación:

$$Em = \frac{20561}{6.83}$$

$$Em = 3010.39 \text{ msnm}$$

Figura 22

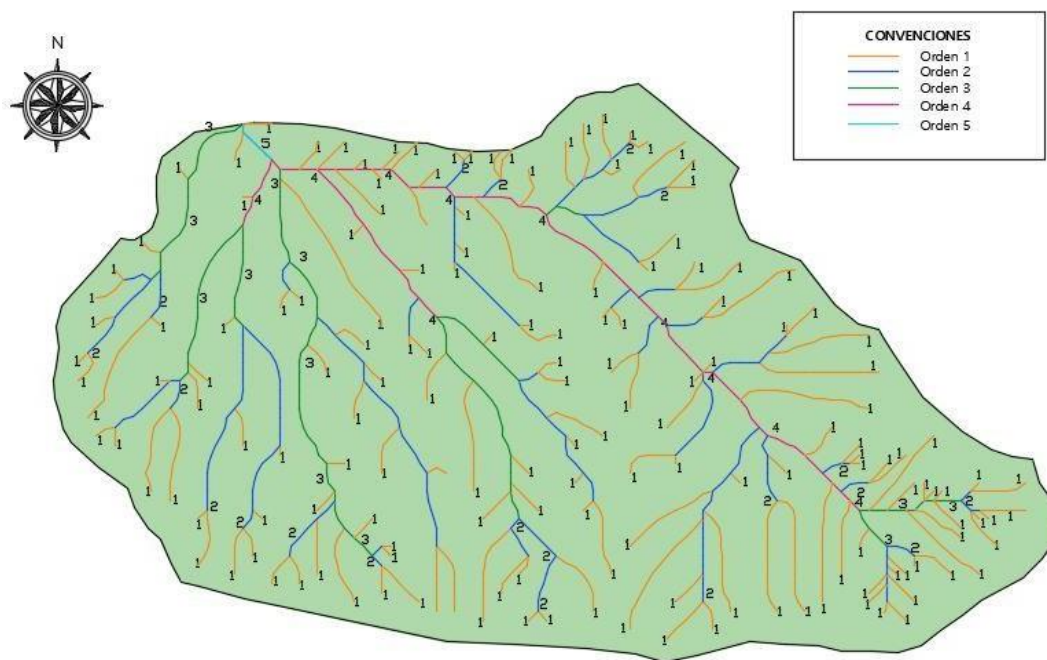
Representación elevación media



2.1.1.5.9. Red de drenaje. Para la determinación de la jerarquía de drenaje, en específico el orden de las corrientes, se hace uso del software ArcGIS 10.4. Mediante esta herramienta, se obtiene directamente el orden de las corrientes en la cuenca, organizándolas en cinco niveles distintos de acuerdo a su grado de bifurcación. (Véase anexo. E)

Figura 23

Representación red de drenaje



De acuerdo a lo anterior, la red de drenaje es de nivel 5 el cual representa el grado más bajo de jerarquía dentro de esta clasificación, esto significa que las corrientes o arroyos de nivel 5 son los más pequeños y están ubicados en las partes más bajas de la microcuenca.

La determinación de la densidad de drenaje se efectúa mediante la utilización del software ArcGIS. A través de este proceso, se identifican y distinguen las corrientes perennes e intermitentes, lo cual arroja información acerca del escurrimiento en función de las particularidades físicas inherentes a la cuenca. Esta fase permite discernir cuáles corrientes contribuyen con el flujo de agua en la mayor parte del tiempo. Posteriormente, se procede a emplear el software Global

Mapper para calcular la longitud de las corrientes identificadas previamente. Para determinar la densidad del drenaje, se emplea la siguiente ecuación:

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Donde:

Dd: Densidad de drenaje

L: Longitud de los
cauces

A: Área de la cuenca

Se procede a calcular la densidad del drenaje, reemplazando los datos en la ecuación:

$$Dd = \frac{L}{A}$$

$$Dd = \frac{22.08 \text{ km}}{6.85 \text{ km}^2}$$

$$Dd = 3.22 \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$$

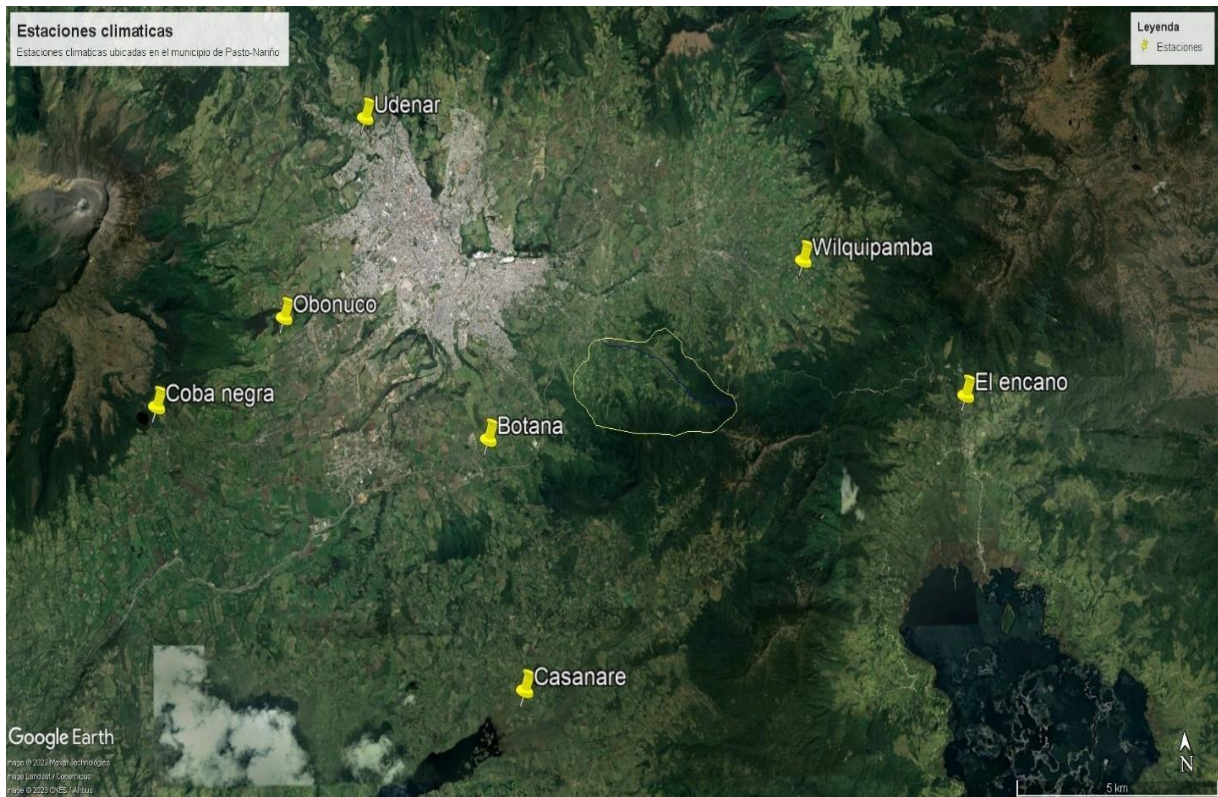
La microcuenca presenta una densidad de drenaje de 3.22 km/km², lo cual se considera relativamente baja en relación con la extensión de su superficie, esto indica la presencia de una cantidad moderada de corrientes o canales que atraviesan el territorio de la microcuenca.

2.2.1.6. Caracterización climática. Para llevar a cabo la caracterización climatológica de la cuenca Dolores, se recopila información de un lapso de veintinueve años con el propósito de analizar el clima en el área de estudio. Este análisis abarca aspectos como la precipitación, temperatura y humedad relativa, en relación con las particularidades ambientales del corregimiento de Mocondino.

2.2.1.6.1. Polígono de Thyssen. De acuerdo a lo anterior los datos presentados son obtenidos del instituto de hidrología, meteorológica y estudios ambientales – IDEAM. Para determinar la estación correspondiente para la zona de estudio se realizó el polígono de Thyssen, empleando la base de datos del IDEAM se establece las estaciones activas hasta el periodo 2021 con un rango de información mínimo de 20 años, correspondiente a ello se selecciona las estaciones Botana (52055040), Coba negra (52055140), Obonuco (52045010), universidad de Nariño (52045080), Wilquipamba (52045070) y Casanare (52055190) ubicadas en el municipio de Pasto.

Figura 24

Representación ubicación estaciones climáticas municipio de Pasto



En el proceso de elaboración del polígono de Thyssen, se hace uso del software ArcGIS, el cual posibilita la precisa delimitación del área de las estaciones en cuestión y la evaluación exhaustiva para identificar la estación que guarda relación y es conexas con la microcuenca. La creación del polígono requiere la obtención previa de las coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM)

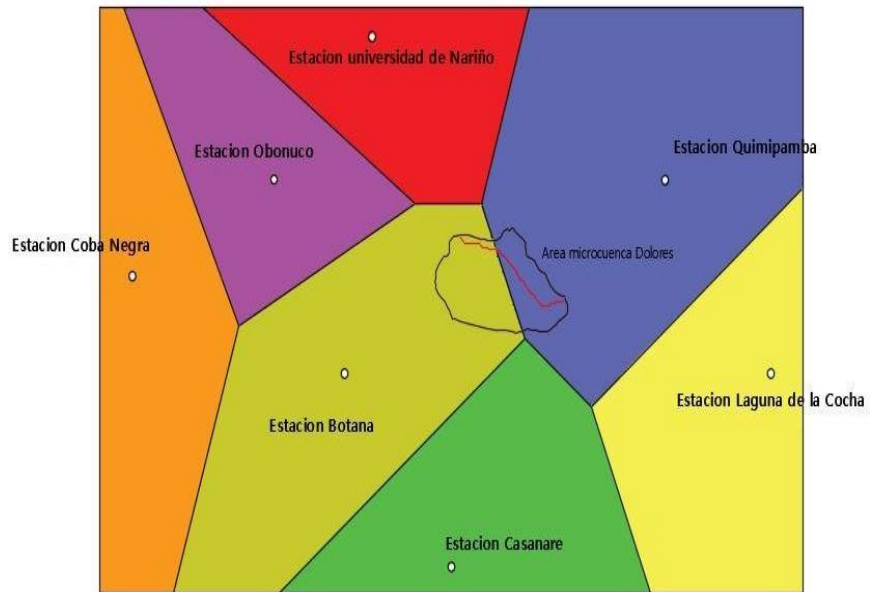
por medio del software Google Earth, a fin de trazar con precisión los límites geográficos en el software ArcGIS.

Tabla 21
Informaciones coordenadas UTM estaciones

Coordenadas UTM estándar estaciones climáticas			
Zona	18	Hemisferio	Norte
Id	UTMx	UTMy	Nombre Estación
1	249614.10	123889.90	Estación Casanare
2	246277.40	128317.30	Estación Botana
3	239598.60	130535.20	Estación Coba negra
4	244054.20	132743.90	Estación Obonuco
5	246283.80	136060.60	Estación U. de Nariño
6	256301.20	132733.80	Estación Wilquipamba
7	259637.70	128306.80	Estación el Encano

Mediante la utilización del software ArcGIS, se procede a llevar a cabo la generación del polígono de Thiessen. (Véase anexo. F)

Figura 25
Representación polígona de Thyssen



Basándose en lo expuesto anteriormente, se determina que las estaciones climáticas con una mayor influencia en el área de estudio de la cuenca Dolores son Botana y Wilquipamba. Específicamente, la estación Botana engloba un área que corresponde al 65% (4.45 Km²) del total. Para este análisis, se opta por utilizar los datos proporcionados por la estación Botana debido a la extensión abarcada que representa la región de estudio y, además, a la actualización reciente de los datos registrados por esta estación hasta la fecha.

2.2.1.6.2. Información hidrometeorológica. De acuerdo a lo anterior, es relevante destacar que la estación meteorológica Botana, ha recopilado de manera constante y sistemática datos durante un período continuado de veintidós años. Dichos datos abarcan diversas variables climáticas de importancia significativa, tales como la precipitación pluvial, la temperatura atmosférica, la humedad relativa, la radiación solar incidente y la tasa de evaporación. Este conjunto de información detallada y extensa ha sido acumulado con el propósito de realizar un análisis exhaustivo de las condiciones climáticas a lo largo de este extenso lapso temporal.

La precipitación registrada en la microcuenca hidrológica, se ha observado un patrón anual de precipitaciones que se refleja en los datos recopilados entre 1999 y 2021, durante este período, se ha constatado que los valores medios anuales de precipitación han variado, con un promedio de 97.6 mm. Se destacan períodos de menor pluviosidad en los años 2015 y 2017, registrando 73.9 mm y 65.21 mm, respectivamente. Contrariamente, se han registrado máximas precipitaciones anuales en los años 2008 y 2021, alcanzando mediciones de 124.2 mm y 119.7 mm, respectivamente.

Esta variabilidad en los patrones de precipitación se ha visto influenciada por fenómenos climáticos como “El Niño”. La línea de tendencia revela una disminución significativa en las precipitaciones durante los episodios de “El Niño”. Estos eventos climáticos han exacerbado los periodos de menor pluviosidad, contribuyendo así a una reducción en la cantidad anual de lluvias.

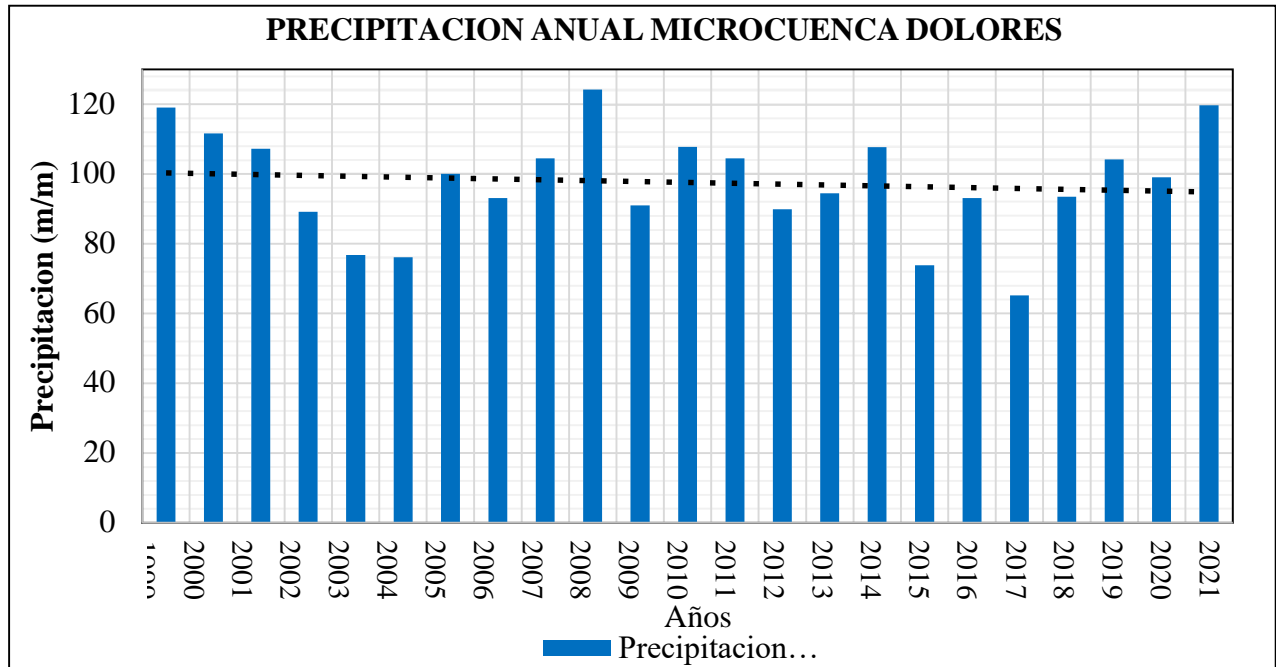
Tabla 22

Informaciones precipitación media anual estación Botana

Precipitación anual estación botana					
Año	mm	Año	mm	Año	mm
1999	119.1	2007	104.5	2015	73.9
2000	111.7	2008	124.2	2016	93.1
2001	107.3	2009	91.02	2017	65.21
2002	89.2	2010	107.8	2018	93.5
2003	76.8	2011	104.5	2019	104.2
2004	76.2	2012	89.9	2020	99.1
2005	100.1	2013	94.5	2021	119.7
2006	93.1	2014	107.7		

Figura 26

Representación precipitación anual media anual estación Botana



La temperatura anual dentro de la microcuenca, en el área de estudio, exhibe variaciones uniformes a lo largo del lapso 1998-2021, se destaca un pico en el intervalo 2016-2018, alcanzando

una temperatura máxima de 23.6 °C, mientras que se registra un mínimo en el año 2015, con una temperatura de 0.6 °C. El comportamiento de la temperatura en el área de la microcuenca registrada por la estación Botana, se observa en un periodo de 1999 a 2021:

Tabla 23
Información temperatura estación Botana

Temperatura estación botana							
Año	Temperatura (° C)			Año	Temperatura (° C)		
	Mínima	Máxima	Media		Mínima	Máxima	Media
1999	4.2	20.4	12.3	2011	4.8	21.6	13.2
2000	5	21.8	13.4	2012	3.8	22.2	13
2001	4.4	21.4	12.9	2013	3	22.4	12.7
2002	5.4	21	13.2	2014	4.2	22	13.1
2003	4.8	21.8	13.3	2015	0.6	22.4	13.7
2004	3.4	21.6	12.5	2016	2.4	23.6	13
2005	4	20.8	12.4	2017	0.6	22.8	11.7
2006	5	20.8	12.9	2018	3.2	23.6	13.4
2007	2.4	22.6	12.5	2019	4.8	22.4	13.6
2008	4.8	20.2	12.5	2020	2.6	22.8	12.7
2009	4.5	22.7	13.6	2021	2.8	22.4	12.6
2010	4	21.9	12.95				

Analizando los datos recopilados entre 1999 y 2021 en la estación meteorológica Botana, se observa una tendencia al aumento de las temperaturas máximas, medias y mínimas en la microcuenca Dolores, esta tendencia se hace especialmente notoria durante los periodos de 2016 a 2021, coincidiendo con la presencia del fenómeno climático “El Niño”, durante estos trimestres específicos, se ha observado un incremento significativo en las temperaturas, oscilando entre 11°C y 13.5°C, lo que indica un patrón de calentamiento en la región.

Por otro lado, las temperaturas más bajas registradas se han asociado con el fenómeno climático opuesto, “La Niña”, durante los años 2007 y 2017, alcanzando mínimos de 2.4°C y 0.6°C respectivamente. Estos datos subrayan una marcada variabilidad climática en la microcuenca Dolores, lo que a su vez sugiere una tendencia hacia el calentamiento global, este aumento en las temperaturas, tanto en mínimas como medias, está generando impactos significativos en la región.

Uno de los impactos más notables es la disminución del recurso hídrico y su disponibilidad en el corregimiento de Mocondino. Los cambios en los patrones de temperatura han alterado los ciclos naturales del agua en la microcuenca, lo que se traduce en una reducción en los caudales de los ríos y arroyos locales, esta disminución del recurso hídrico afecta directamente a la comunidad, limitando el acceso al agua potable y comprometiendo las actividades agrícolas y ganaderas locales.

Figura 27

Representación temperatura máxima, media y mínima estación Botana

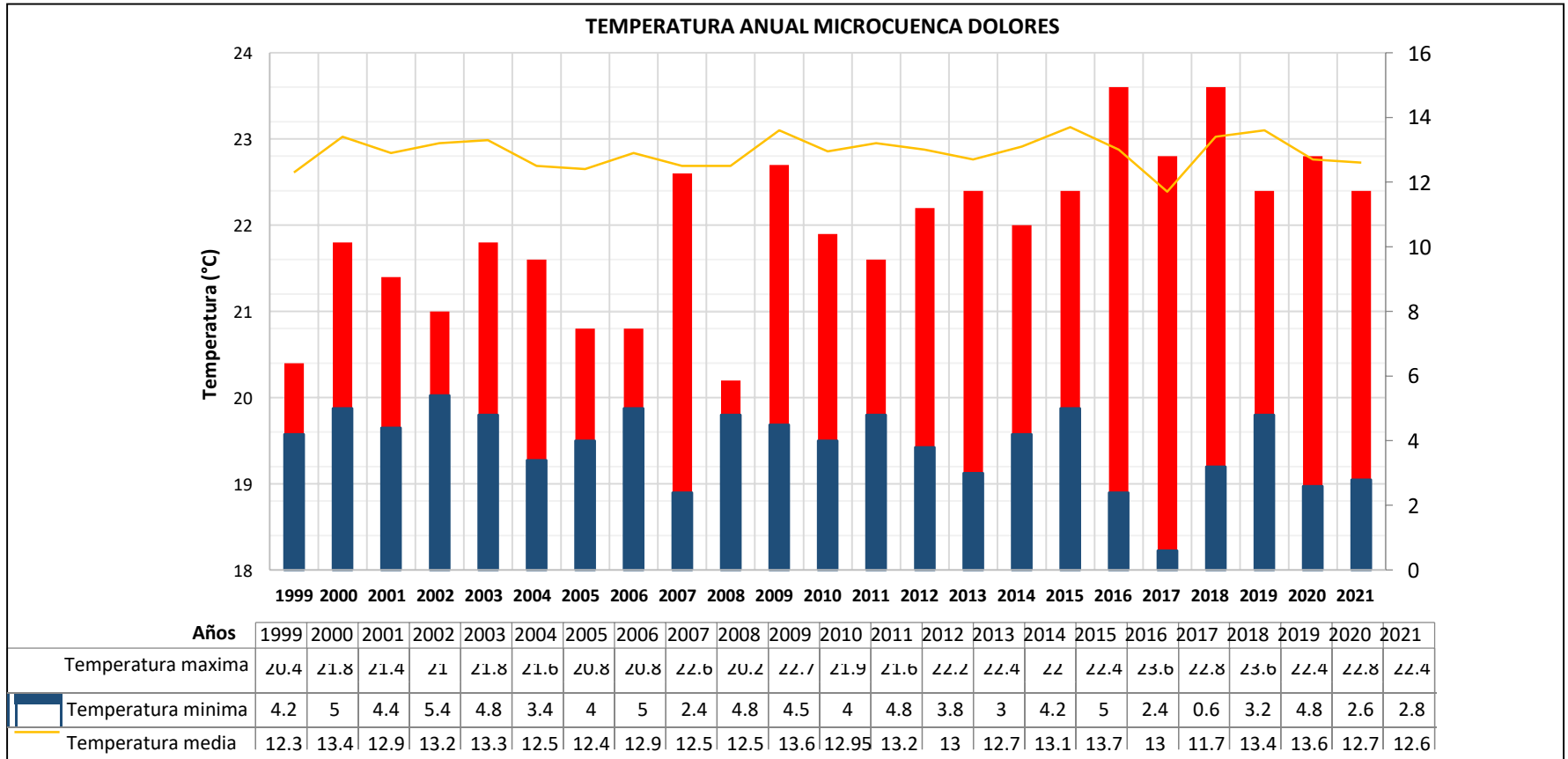
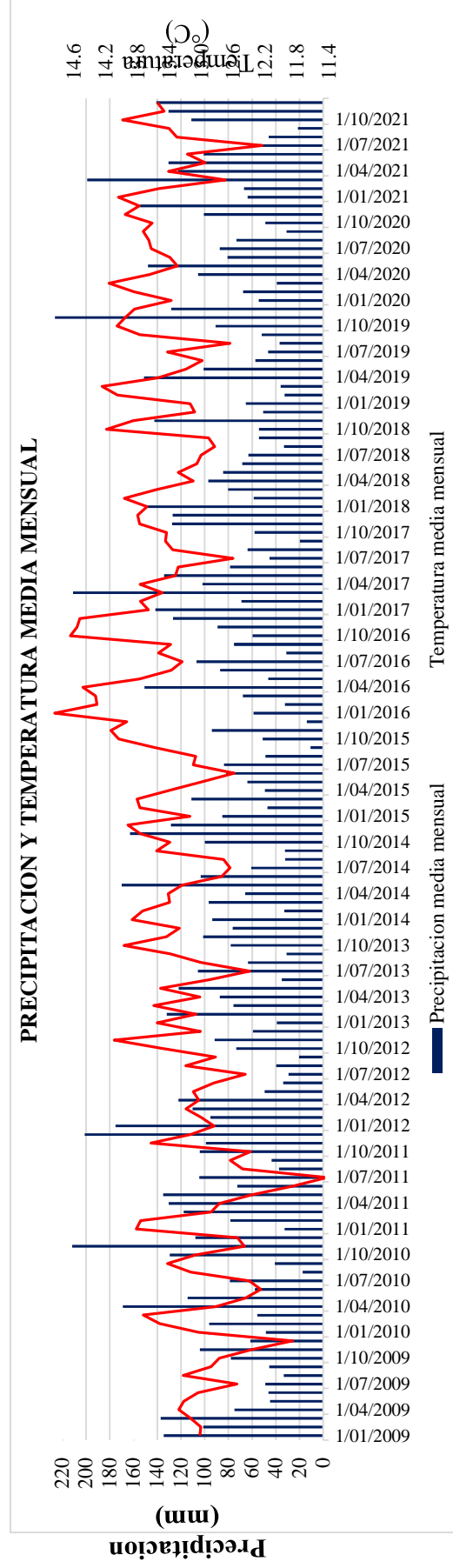
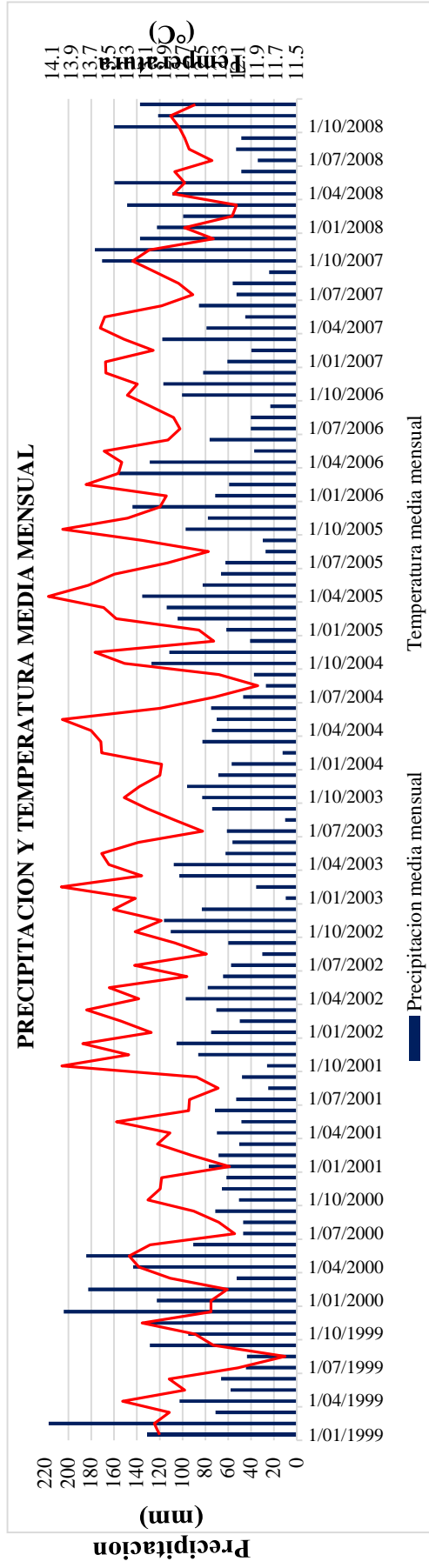


Figura 28

Representación temperatura y precipitación diaria estación Botana



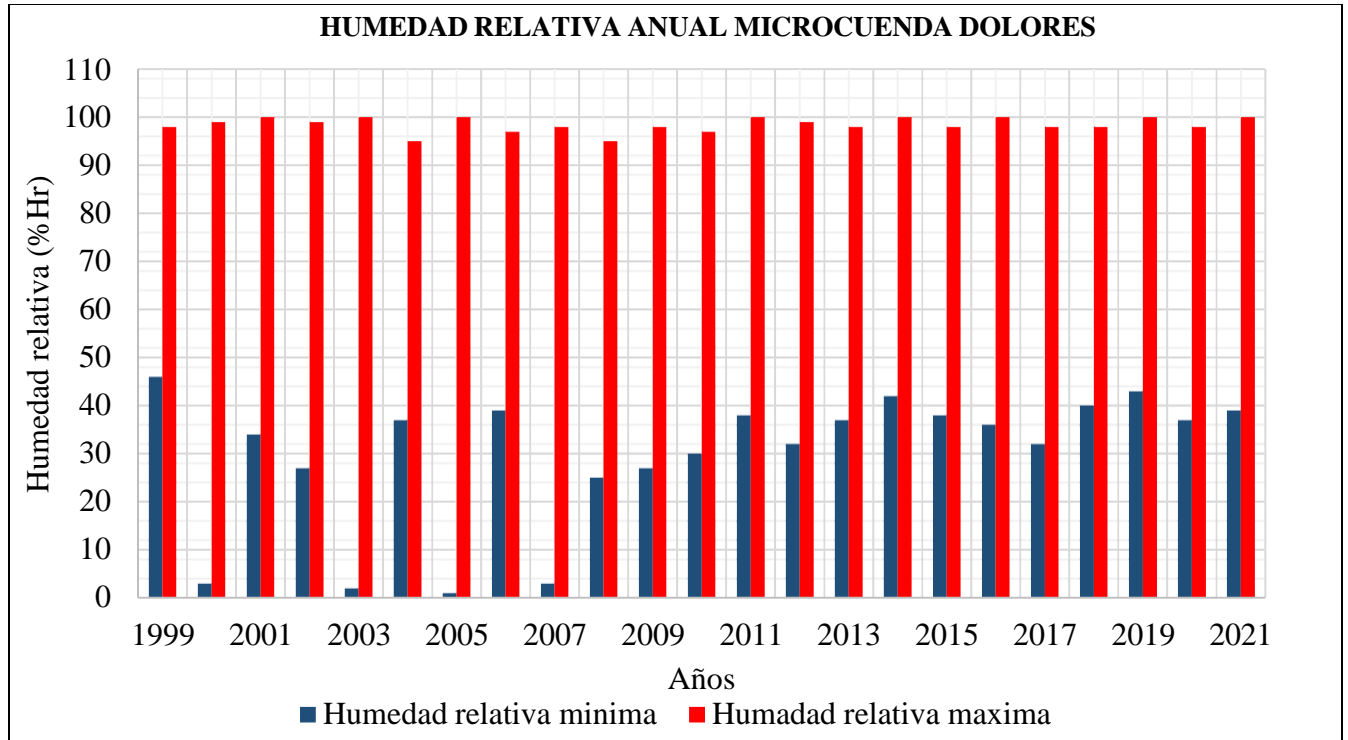
En el área de investigación, la humedad relativa exhibe momentos de humedad máxima en los años 2011, 2014, 2016, 2019 y 2021, alcanzando un nivel del 100%. Estos periodos se caracterizan por una mayor incidencia de precipitaciones. Por contraste, se observan períodos de humedad mínima en los años 2000, 2003 y 2005, con porcentajes de humedad relativa inferiores al 3%. Estos momentos se correlacionan con una disminución en las precipitaciones.

Tabla 24
Información humedad relativa estación Botana

Humedad relativa estación botana					
Año	% Hr		Año	% Hr	
	Mínima	Máxima		Mínima	Máxima
1999	46	98	2011	38	100
2000	3	99	2012	32	99
2001	34	100	2013	37	98
2002	27	99	2014	42	100
2003	2	100	2015	38	98
2004	37	95	2016	36	100
2005	1	100	2017	32	98
2006	39	97	2018	40	98
2007	3	98	2019	43	100
2008	25	95	2020	37	98
2009	27	98	2021	39	100
2010	30	97			

Figura 29

Representación humedad relativa estación Botana



En el ámbito de análisis designado, se procede al registro del índice de brillo solar, el cual exhibe un valor máximo en el intervalo correspondiente al año 2001, alcanzando la cifra de 1326.7 horas por día. En contraposición, se observa un valor mínimo durante el periodo comprendido en el año 2008, manifestándose con una medida de 770.6 horas por día. Estos resultados consignan los niveles de radiación solar incidente y proporcionan una perspectiva detallada sobre la variabilidad en la exposición solar a lo largo del tiempo en el área en cuestión.

Tabla 25

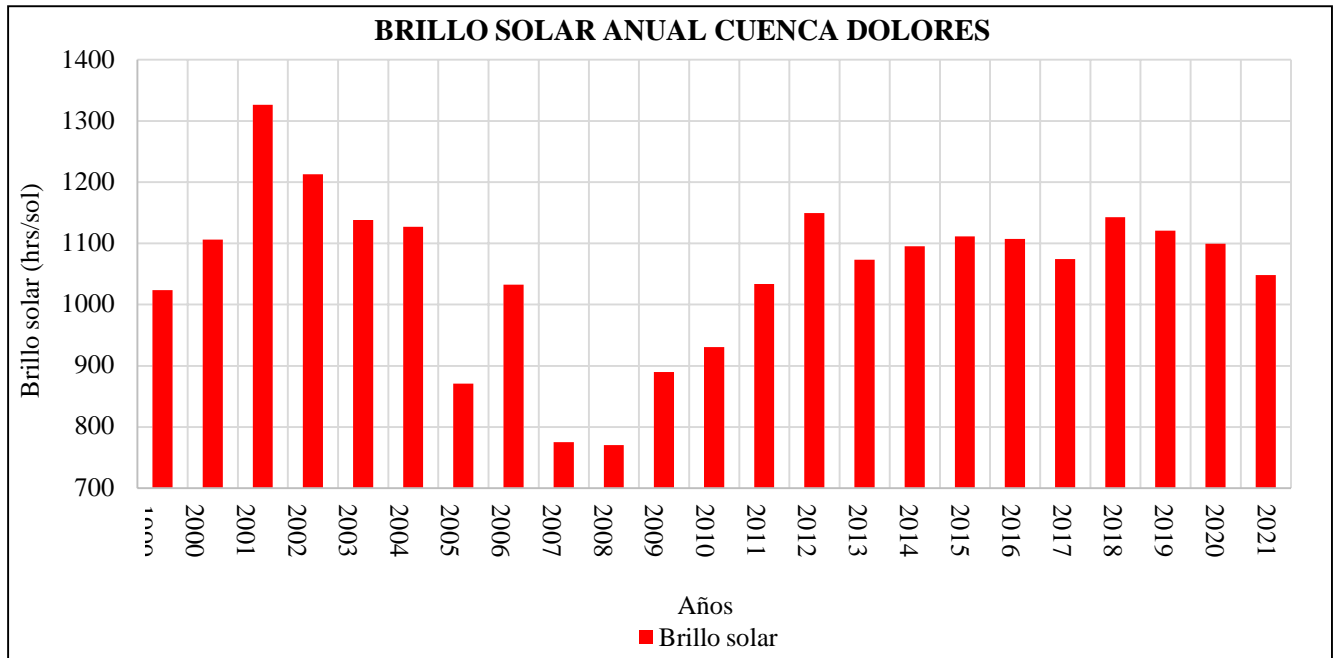
Información brillo solar estación Botana

Brillo solar estación Botana					
Año	Hr/sol	Año	Hr/sol	Año	Hr/sol
1999	1023.7	2007	775.4	2015	1111.5
2000	1106.3	2008	770.6	2016	1107.3
2001	1326.7	2009	890	2017	1074.7
2002	1212.8	2010	930.6	2018	1142.7

2003	1138.4	2011	1033.9	2019	1120.8
2004	1127.4	2012	1149.6	2020	1099.7
2005	871.1	2013	1073.3	2021	1048.5
2006	1032.8	2014	1095.6		

Figura 30

Representación humedad relativa estación Botana



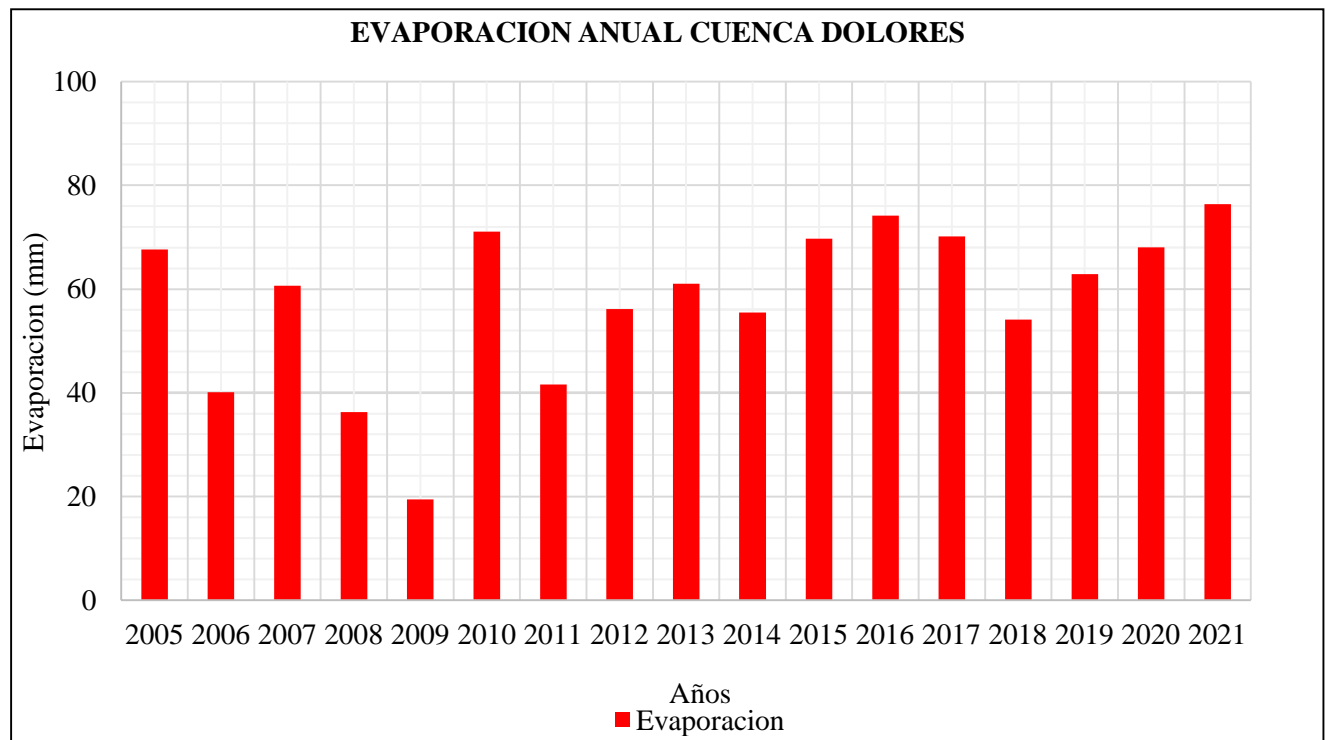
2.2.1.6.2.5. Evaporación

En el área de análisis hidrológico considerada, se constata un aumento en los índices de evaporación. Esta tendencia se refleja en el incremento desde un valor inicial de 41.51 mm, registrado en el periodo 2011, hasta alcanzar una magnitud de 76.35 mm en el periodo 2021. Paralelamente, se identifican valores mínimos de evaporación en los periodos 2007 y 2009, en los cuales se observa una reducción significativa hasta alcanzar un mínimo de 20 mm. Estos hallazgos atestiguan las variaciones en el proceso de evaporación en la región estudiada.

Tabla 26
 Información evaporación estación Botana

Evaporación estación Botana					
Año	mm	Año	mm	Año	mm
1999	-	2007	60.66	2015	-
2000	-	2008	36.31	2016	-
2001	-	2009	19.46	2017	70.15
2002	-	2010	71.05	2018	54.12
2003	-	2011	41.61	2019	62.87
2004	-	2012	56.12	2020	68.07
2005	67.62	2013	61.02	2021	76.35
2006	40.08	2014	55.45		

Figura 31
 Representación evaporación estación Botana



2.2.2. Determinar el escurrimiento superficial y el caudal máximo en la cuenca hidrográfica Dolores.

2.2.2.1. Escurrimiento superficial. La cuantificación del escurrimiento superficial en la microcuenca Dolores, se lleva a cabo mediante la aplicación de una técnica de medición precisa conocida como el método del flotador, este enfoque se fundamenta en la evaluación de los caudales fluviales a través de la observación meticulosa del movimiento de un flotador o instrumento similar a lo largo de la superficie del agua.

El proceso implica la identificación de un tramo representativo del curso de agua donde se establecen puntos de referencia y se mide el tiempo que tarda el flotador en recorrer una distancia conocida. A partir de estas mediciones temporales y espaciales, se obtiene una estimación precisa del caudal, teniendo en cuenta las características hidráulicas específicas del tramo analizado.

2.2.2.1.1. Localización de las estaciones de aforo. Con el propósito de obtener una estimación precisa del caudal vigente en el área de la cuenca Dolores, se ha implementado un enfoque de aforo en tres puntos estratégicos, estos puntos fueron cuidadosamente seleccionados y se situaron en lugares clave, como la salida de campo, para garantizar representatividad en las mediciones. La geolocalización se llevó a cabo utilizando coordenadas UTM mediante la aplicación Coordenadas GPS, la cual facilitó la obtención en tiempo real de los puntos donde se ejecutaron las mediciones de aforo, la utilización del software Coordenadas GPS permitió la exportación de estos datos al software Google Earth, lo que dio lugar a la generación de coordenadas precisas que indican la ubicación exacta de las tres estaciones de aforo.

Figura 32

Estaciones de aforo del escurrimiento superficial

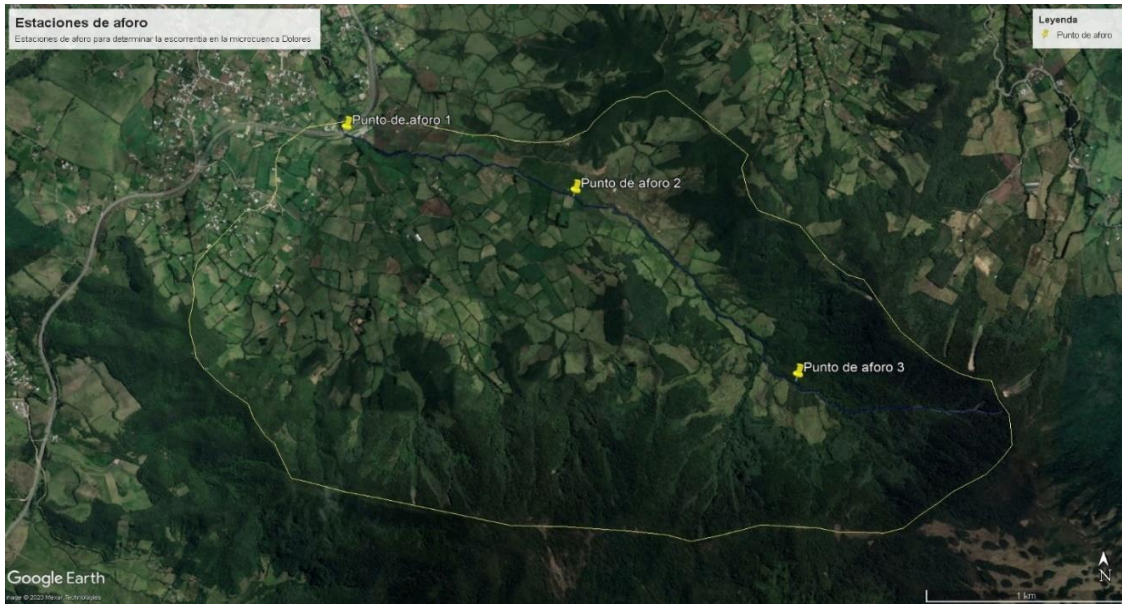


Tabla 27

Información ubicación geográfica estación de aforo

Ubicación geográfica estaciones de aforo		
Descripción	latitud	longitud
Estación 1	1.188434°	-77.238848°
Estación 2	1.184595°	-77.227801°
Estación 3	1.179284°	-77.228678°

2.2.2.1.2. Recolección de información en campo. Una vez seleccionados los puntos de aforo, se implementa el método del flotador, para este propósito, se utilizó un tapón de corcho como flotador, aprovechando las propiedades de flotación inherentes a este material de corteza de alcornoque, las mediciones se realizaron durante un período de cinco días, abarcando desde el 14/04/2023 hasta 19/04/2023.

Con el fin de establecer la sección transversal del cauce fluvial en las tres estaciones seleccionada para el aforo en la microcuenca Dolores, se procedió a efectuar una medición precisa de la longitud o extensión del espejo de agua, esta medición fue complementada por la evaluación

Oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática-Microcuenca Dolores

de la profundidad de las secciones en diversos puntos de interés en cada estación de registro, en este análisis, se consideraron dos parámetros clave: el ancho de la sección (expresado en metros) y la profundidad de la sección (expresada también en metros), estos datos se presentan detalladamente a continuación con el propósito de delinear de manera rigurosa la configuración hidráulica de la zona en estudio. De acuerdo a lo anterior, para la estación uno se recolecto la siguiente información.

Figura 33

Longitud sección A-B estación de aforo uno



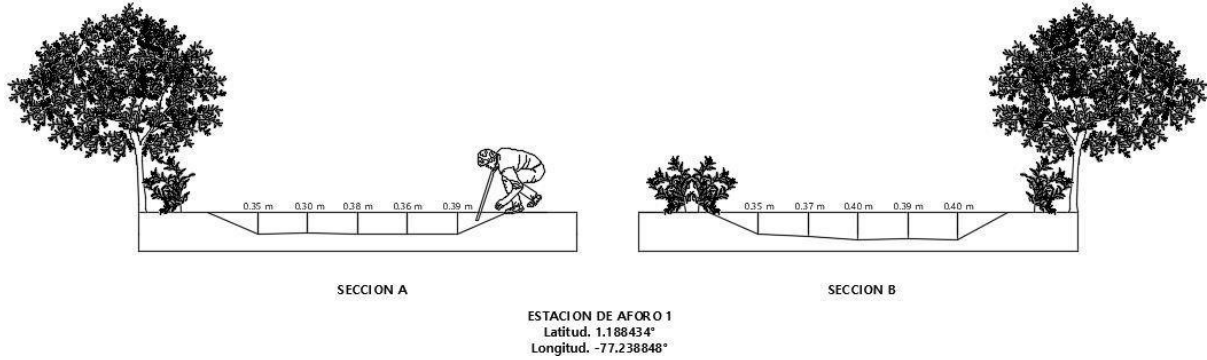
Figura 34

Profundidad sección A-B estación de aforo uno



Figura 35

Sección transversal sección A-B estación de aforo uno



Los datos recopilados en relación a la configuración de la sección transversal entre los puntos A y B de la estación de aforo número uno se registra de manera concisa en la tabla presentada a continuación.

Tabla 28

Información sección transversal sección A-B estación de aforo uno

Estacion de aforo uno					
Sección A			Sección B		
Espejo de agua (m)	Distancia de sección(m)	Profundidad sección (m)	Espejo de agua (m)	Distancia de sección(m)	Profundidad sección (m)
3.90	0.78	0.35	3.54	0.71	0.35
		0.30			0.37
		0.38			0.40
		0.36			0.39
		0.39			0.40

En la estación dos se recolecto la siguiente información.

Figura 36

Longitud sección A-B estación de aforo dos



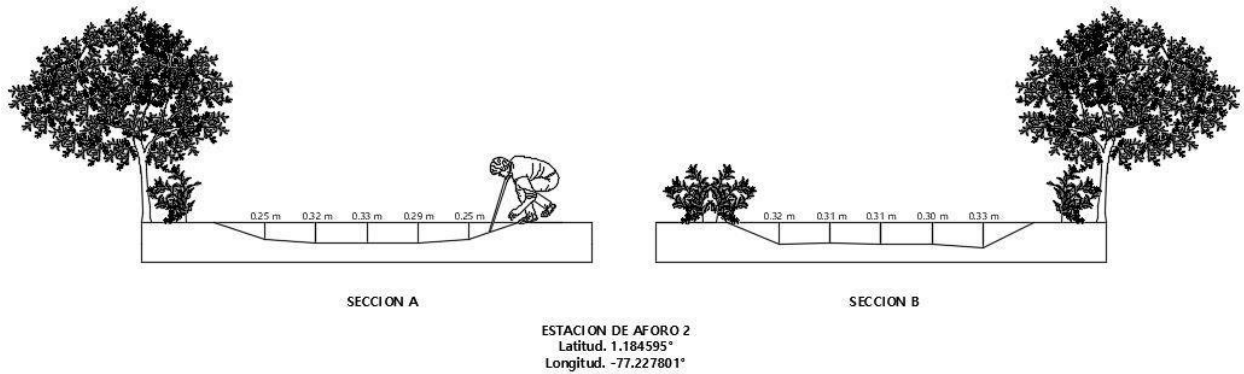
Figura 37

Profundidad sección A-B estación de aforo dos



Figura 38

Sección transversal sección A-B estación de aforo dos



Los datos recopilados en relación a la configuración de la sección transversal entre los puntos A y B de la estación de aforo número dos se registra de manera concisa en la tabla presentada a continuación.

Tabla 29

Información sección transversal sección A-B estación de aforo dos

Estacion de aforo dos					
Sección A			Sección B		
Espejo de agua (m)	Distancia de sección(m)	Profundidad sección (m)	Espejo de agua (m)	Distancia de sección(m)	Profundidad sección (m)
3.47	0.69	0.25	3.20	0.64	0.32
		0.32			0.31
		0.33			0.31
		0.29			0.30
		0.25			0.33

En la estación tres se recolecto la siguiente información.

Figura 39

Longitud sección A-B estación de aforo tres

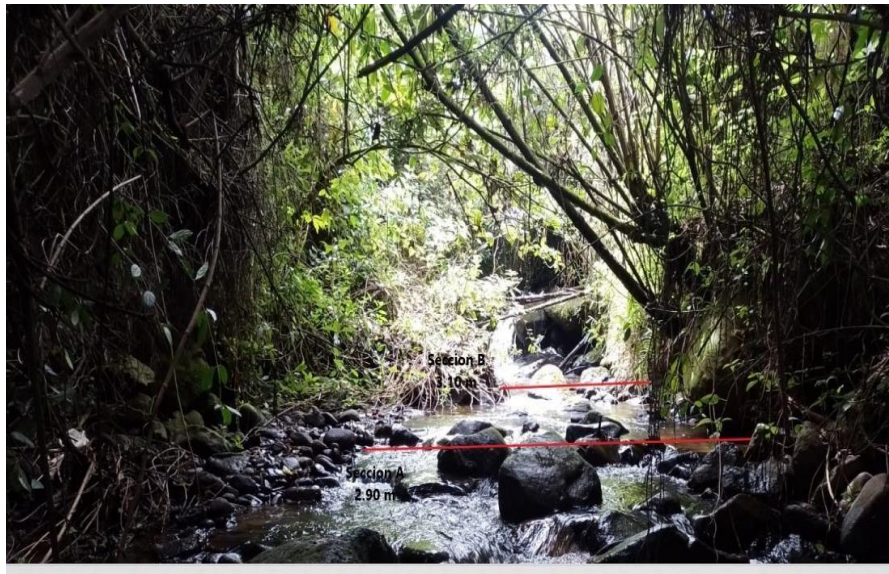


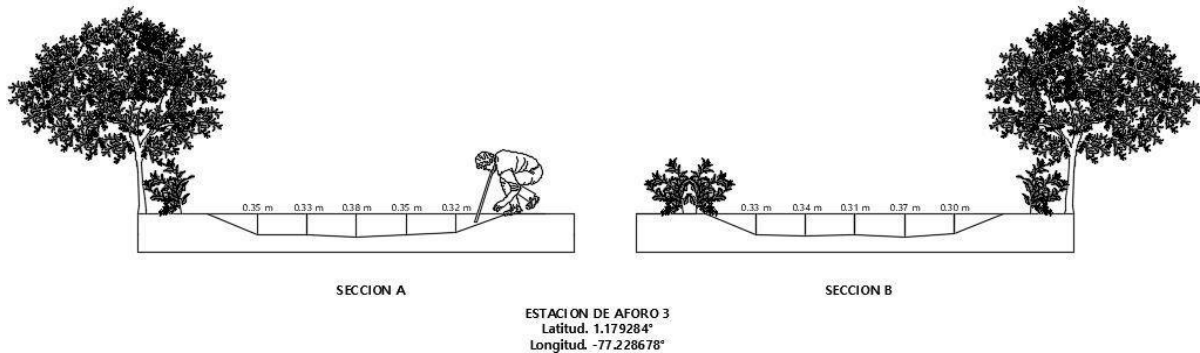
Figura 40

Profundidad sección A-B estación de aforo tres



Figura 41

Sección transversal sección A-B estación de aforo tres



Los datos recopilados en relación a la configuración de la sección transversal entre los puntos A y B de la estación de aforo número tres se registra de manera concisa en la tabla presentada a continuación.

Tabla 30

Información sección transversal sección A-B estación de aforo tres

Estacion de aforo tres					
Sección A			Sección B		
Espejo de agua (m)	Distancia de sección(m)	Profundidad sección (m)	Espejo de agua (m)	Distancia de sección(m)	Profundidad sección (m)
2.90	0.58	0.35	3.10	0.62	0.33
		0.33			0.34
		0.38			0.31
		0.35			0.37
		0.32			0.30

La determinación de la sección transversal se realiza mediante la subdivisión en segmentos del ancho completo del cauce, lo cual asegura la precisión en el cálculo del área transversal de la sección de la estación de aforo. En consecuencia, se aplica este procedimiento para obtener la sección transversal correspondiente a cada punto de las tres estaciones de aforo ubicadas en la microcuenca, el cual se realiza empleando la siguiente expresión. (Véase anexo. G)

$$A = \frac{h1 + h2}{2} * T$$

A= Área sección transversal (m²)

T= Sección de espejo de agua (m)

h1, h2: Profundidad de sección (m)

Tabla 31

Información sección transversal sección A-B de las estaciones de aforo

Sección transversal (m ²)					
Estación uno		Estación dos		Estación tres	
A	B	A	B	A	B
0.14	0.12	0.09	0.11	0.10	0.12
0.25	0.25	0.22	0.22	0.27	0.24
0.27	0.27	0.25	0.22	0.28	0.23
0.29	0.28	0.24	0.22	0.28	0.24
0.29	0.28	0.21	0.22	0.26	0.24
0.15	0.14	0.10	0.12	0.12	0.11
1.39	1.35	1.11	1.11	1.31	1.17
1.37		1.11		1.24	

El área transversal de cada sección denota la configuración geométrica del cauce en relación a sus dimensiones físicas. En consonancia con lo previamente expuesto, el área transversal de la estación uno de aforo se cuantifica en 1.37 m², la estación dos presenta un área transversal de 1.11 m², mientras que en la tercera estación de aforo se registra un área transversal de 1.24 m².

En relación al flujo en el cauce del área seleccionada por cada estación de aforó en la microcuenca Dolores, se procedió a registrar múltiples intervalos de tiempo con un enfoque cronometrado, esta metodología implicó la toma de cinco medidas de tiempo en cada estación de aforo, con el propósito de posteriormente calcular un valor promedio de tiempo para cada día de registro en el proceso de aforo. De acuerdo a lo anterior, se presentan a continuación los tiempos cronometrados que fueron registrados en las diferentes estaciones de aforo.

Tabla 32*Información tiempo registrado y promedio del flotador estación uno*

Estación de aforo uno							
Medición	Fecha	Tiempo de desplazamiento del flotador (seg)					Tiempo Promedio (Seg)
		T1	T2	T3	T4	T5	
1	14/04/2023	5.89	6.25	6.75	5.97	6.78	6.33
2	15/04/2023	6.14	7.05	6.84	6.97	5.84	6.57
3	17/04/2023	6.25	6.41	7.02	6.49	6.99	6.63
4	18/04/2023	6.72	7.05	6.81	6.41	6.37	6.67
5	19/04/2023	7.09	6.25	6.97	7.03	6.84	6.84

Tabla 33*Información tiempo registrado y promedio del flotador estación dos*

Estación de aforo dos							
Medición	Fecha	Tiempo de desplazamiento del flotador (Seg)					Tiempo Promedio (Seg)
		T1	T2	T3	T4	T5	
1	14/04/2023	6.89	6.81	6.35	6.41	6.78	6.65
2	15/04/2023	7.07	7.15	6.95	6.75	6.99	6.98
3	17/04/2023	6.74	6.93	7.08	6.87	6.74	6.87
4	18/04/2023	6.25	6.78	6.97	7.02	6.89	6.78
5	19/04/2023	7.01	6.87	6.78	6.54	6.97	6.83

Tabla 34*Información tiempo registrado y promedio del flotador estación tres*

Estación de aforo tres							
Medición	Fecha	Tiempo de desplazamiento del flotador					Tiempo Promedio
		(Seg)					
		T1	T2	T3	T4	T5	
1	14/04/2023	7.15	7.25	7.42	7.36	7.01	7.24
2	15/04/2023	7.04	6.99	7.25	7.41	7.14	7.17
3	17/04/2023	6.94	7.14	7.25	7.71	6.91	7.19
4	18/04/2023	7.25	6.97	7.32	7.14	7.45	7.23
5	19/04/2023	7.74	7.58	7.12	7.15	7.27	7.37

A partir de la información anterior, se procede a calcular la velocidad del flujo en el lecho del cauce, es relevante destacar que el procedimiento de aforo se llevó a cabo en cada sección del cauce, considerando una longitud constante de dos metros para cada sección. En concordancia con lo anterior, se utiliza la siguiente expresión para realizar el cálculo.

Tabla 35*Velocidad promedio de aforo*

Velocidades de tiempo promedio (m/s)				
Medición	Fecha	Estación uno	Estación dos	Estación tres
1	14/04/2023	0.32	0.30	0.28
2	15/04/2023	0.31	0.29	0.28
3	17/04/2023	0.30	0.29	0.28
4	18/04/2023	0.30	0.30	0.28
5	19/04/2023	0.29	0.29	0.27

Las velocidades promedio obtenidas requieren una corrección de acuerdo a las normas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), esta corrección se basa en un valor "F", que representa el coeficiente de ajuste, siguiendo las directrices presentes en la guía número 168. El valor de corrección se deriva de la profundidad de inmersión del flotador empleado. En este procedimiento, se utilizó un flotador de poliestireno con forma esférica, para el cual se aplica un valor de 0.85. Esto se debe a que la profundidad de inmersión es menor a la décima parte de su tamaño. Siguiendo esta premisa, se procede al cálculo del producto de la velocidad calculada y el valor de corrección, obteniendo así la velocidad corregida.

Tabla 36

Velocidad promedio corregidas de aforo

Velocidades de tiempo corregidas promedio (m/s)				
Medición	Fecha	Estación uno	Estación dos	Estación tres
1	14/04/2023	0.27	0.26	0.23
2	15/04/2023	0.26	0.24	0.24
3	17/04/2023	0.26	0.25	0.24
4	18/04/2023	0.26	0.25	0.24
5	19/04/2023	0.25	0.25	0.23

A partir de la información recolectada sobre el área de la sección transversal y la velocidad corregida del flotador, se procede a calcular el caudal utilizando la siguiente expresión.

$$Q = V * A$$

Q= Caudal de la sección (m³/s)

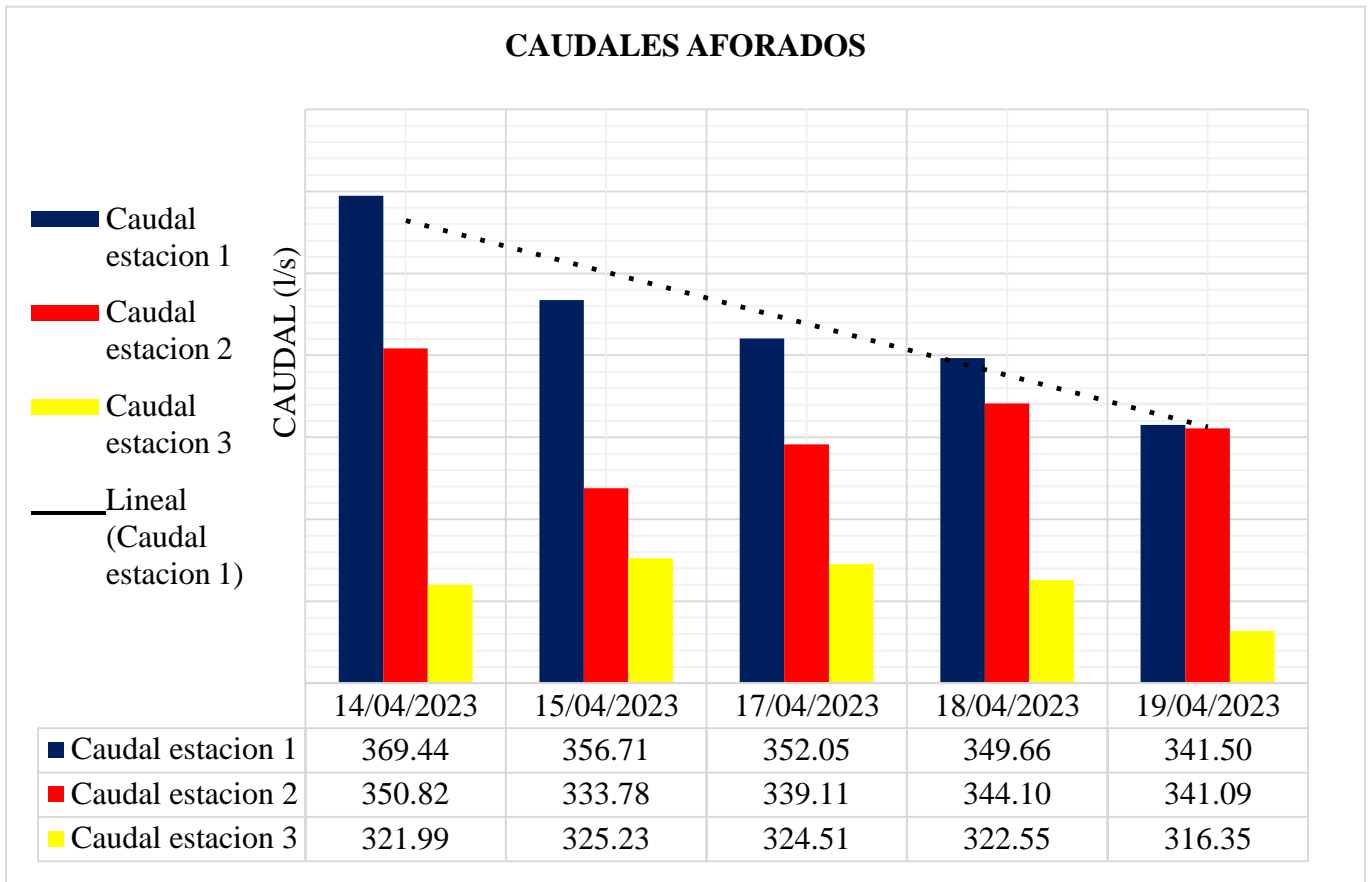
V= Velocidad de la corriente de agua (m/s)

A= Área de la sección transversal (m²)

Tabla 37
Caudales de aforo

Caudal de aforo (l/s)				
Medición	Fecha	Estación uno	Estación dos	Estación tres
1	14/04/2023	369.44	350.82	321.99
2	15/04/2023	356.71	333.78	325.23
3	17/04/2023	352.05	339.11	324.51
4	18/04/2023	349.66	344.10	322.55
5	19/04/2023	341.50	341.09	316.35
CAUDAL PROMEDIO		353.87	341.78	322.13

Figura 42
Resultados de caudales obtenidos por el método del flotador



Los caudales obtenidos son la estimación de los caudales para los tres puntos de aforo, indicando el 14 de abril del 2023 se presentó un mayor caudal para la estación 1 de la microcuenca con un valor de 369.44 l/s, en la estación 2 el caudal mayor medido es de 350.82 l/s y en la estación 3 el mayor caudal registrado es de 321.99 l/s, mediante esta información se denota la diferencia que existe entre las tres estaciones de aforo, debido a que están situados en los extremos correspondiente a la naciente del cauce (Estación 3) y terminación del área perteneciente al corregimiento de Mocondino. De acuerdo a la información registrada el caudal en la microcuenca hidrológica y la línea de tendencia está en disminución de acuerdo al aumento de temperaturas, dependiente al fenómeno de variabilidad climática “El Niño”, en el cual se encuentra el clima en la región.

2.2.2.2. Caudal máximo. En la determinación de caudales máximos, se recurre al método racional debido a su capacidad para calcular el escurrimiento hídrico en función de la superficie de la cuenca y el coeficiente de escorrentía. Este enfoque permite la estimación del caudal máximo al aplicar el método racional.

$$Q = \frac{C * I * A}{3.6}$$

Donde:

Q; Caudal (m³/s)

C: Coeficiente de
escorrentía

I: Intensidad de precipitación (mm/hora)

A: Área de la cuenca (Km²)

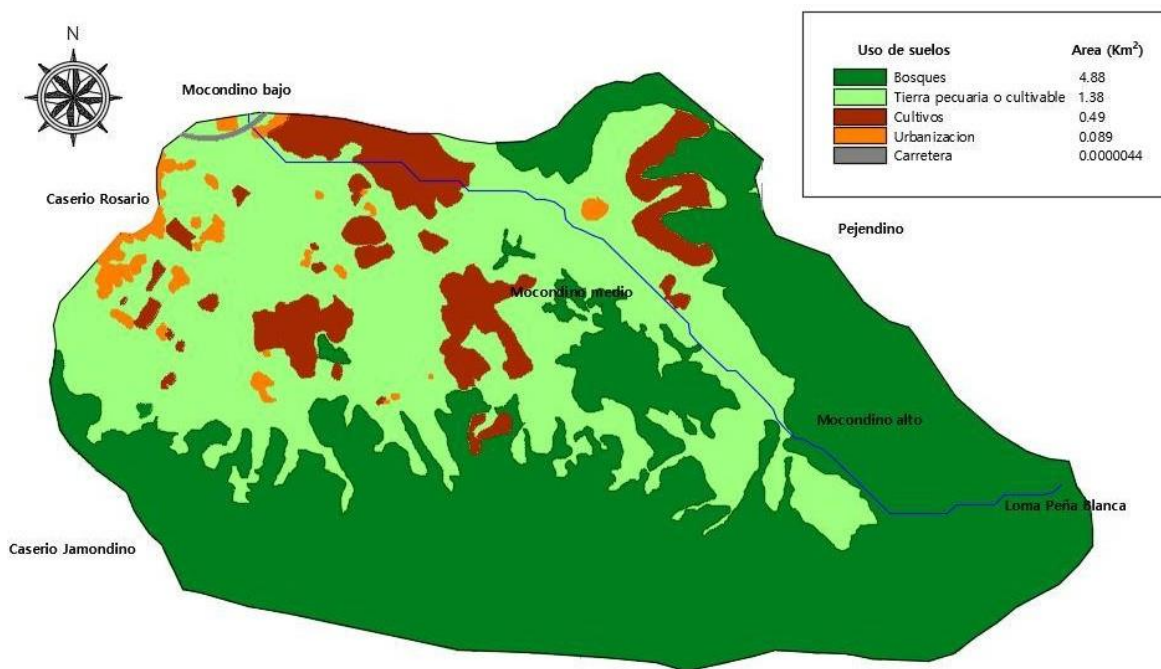
Siguiendo la ecuación anterior, se procede a la determinación específica de los parámetros del método racional, los cuales son determinados en función de las particularidades inherentes a esta investigación.

2.2.2.2.1 Coeficiente de escorrentía. Para calcular el coeficiente de escorrentía, se emplea el software ArcGIS, el cual realiza un proceso que involucra la identificación y delimitación de zonas específicas de uso del suelo dentro del ámbito de la microcuenca hidrográfica. Este procedimiento

se basa en un análisis del uso del suelo, lo que permite definir las áreas donde se produce el escurrimiento superficial en función de la cobertura y tipo de suelo presentes en la microcuenca. Posteriormente, estas zonas específicas se utilizan para calcular el coeficiente de escorrentía, el cual es un parámetro relevante en la estimación de los caudales máximos y coeficientes de escorrentía. (Véase anexo. H)

Figura 43

Uso de suelos área microcuenca Dolores



La información recopilada en relación con el uso de suelos se presenta detallando las áreas correspondientes a diferentes categorías, que incluyen bosques, tierras destinadas a la ganadería o la agricultura, terrenos de cultivos, zonas urbanizadas y carreteras.

Tabla 38*Áreas respectivas del uso del suelo*

Uso de suelos		
Uso de suelo	Valor	Unidad
Bosques	4.88	km ²
Tierra pecuaria o cultivable	1.38	km ²
cultivos	0.495	km ²
urbanización	0.0895	km ²
Carretera	0.0000044	km ²
Área total	6.84	km²

Utilizando la tabla de clasificación y uso de suelos establecida en Hidrología según Máximo Villón, se procede a la determinación del coeficiente de escorrentía correspondiente a cada categoría de uso de suelos identificada en el área de la cuenca hidrográfica. Este proceso permite asignar de manera específica y técnica el coeficiente de escorrentía apropiado a cada tipo de suelo en función de su caracterización (Máximo Villón, 2004).

Tabla 39*Coeficientes de escorrentías*

Uso de suelos		
Uso de suelo	Área (Km²)	C
Bosques	4.88	0.5
Tierra pecuaria o cultivable	1.38	0.4
cultivos	0.495	0.7
urbanización	0.0895	0.3
Calle	0.0000044	0.7

Una vez obtenidos los coeficientes de escorrentía específicos de cada uso de suelos, se procede a calcular el coeficiente de escurrimiento promedio para la microcuenca. Este cálculo se basa en la agregación y promediación de los coeficientes individuales previamente determinados para las distintas áreas de uso de suelos dentro de la cuenca.

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

$$C = \frac{(0.5 * 4.88) + (0.4 * 1.38) + (0.7 * 0.495) + (0.3 * 0.0895) + (0.7 * 0.0000044)}{6.85}$$

$$C = 0.49$$

Un coeficiente de escorrentía de 0.49 en la microcuenca indica que aproximadamente el 49% de la precipitación que cae en esa cuenca se convierte en escurrimiento superficial. En otras palabras, la mitad del agua de lluvia que llega a la cuenca fluye directamente a través de del relieve característicos del área en lugar de infiltrarse en el suelo o ser absorbida por la vegetación.

2.2.2.2.2. Intensidad de precipitación. Para determinar la intensidad de precipitación se debe realizar la generación de las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), se aplica el enfoque aceptado a nivel nacional por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales(IDEAM), que consiste en la implementación del método simplificado para la construcción de las Curvas IDF. Este método se enfoca en la determinación de la relación entre la intensidad de la precipitación, su duración y la frecuencia de precipitación en una determinada área geográfica.

A partir de lo anterior, se emplea la siguiente expresión la cual permite elaborar las curvas IDF con la información de la precipitación diaria máxima anual registrada por la estación Botana en el área hidrológica.

$$I = \frac{a x T^b x M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c}$$

Donde:

I: Intensidad de precipitación (mm/h)

T: Periodo de retorno (años)

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 hr a nivel mundial

t: Duración de la lluvia (min)

a, b, c, d= parámetros de ajuste de la regresión

Utilizando los datos obtenidos de la estación Botana, la cual se encuentra ubicada en la zona de influencia de la microcuenca hidrológica, se ha recopilado información de la precipitación máxima diaria anual durante un período de veintidós años. Esta serie temporal de datos representa el registro de las cantidades máximas de precipitación diaria anual observadas en la mencionada estación a lo largo de dicho período.

Tabla 40*Precipitación máxima diaria anual*

Precipitación máxima diaria anual			
Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)
1999	217.30	2011	201.20
2000	184.50	2012	175.10
2001	105.40	2013	131.90
2002	116.30	2014	170.00
2003	107.80	2015	111.00
2004	127.30	2016	150.60
2005	144.00	2017	210.90
2006	155.80	2018	148.60
2007	176.80	2019	226.30
2008	160.10	2020	154.40
2009	137.10	2021	199.00
2010	211.70		
Promedio			161.87

Una vez obtenidos los datos de la precipitación máxima diaria anual, se procede a determinar los parámetros de ajuste para la regresión. En el contexto de esta investigación, se establece que esta regresión se enfoca en la región Andina, donde se ubica la estación Botana, así como en la microcuenca Dolores.

Tabla 41*Parámetros de ajustes*

Región	a	b	c	d
Andina(R1)	0,94	0,18	0,66	0,83
Caribe (R2)	24,85	0,22	0,50	0,10
Pacifico (R3)	13,92	0,19	0,58	0,20
Orinoquia (R4)	5,53	0,17	0,63	0,42

Fuente. IDEAM (2019)

A través de la expresión y los datos recopilados, se procede a la construcción de las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF). Para esta finalidad, la mencionada ecuación se formula de la siguiente manera:

$$I = \frac{0.94 x T^{0.18} x 161.87^{0.83}}{\left(\frac{t}{60}\right)^{0.66}}$$

Nota. El estudio contempla períodos de retorno (T) de 2, 5, 10, 20, 30, 50 y 100 años. Asimismo, se considera las duraciones de las precipitaciones, que abarcan desde 10 hasta 180 minutos. Estos intervalos temporales y duraciones son esenciales para evaluar y caracterizar los eventos de lluvia extremos en el análisis de las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

Tabla 42
Intensidad en periodos de retorno

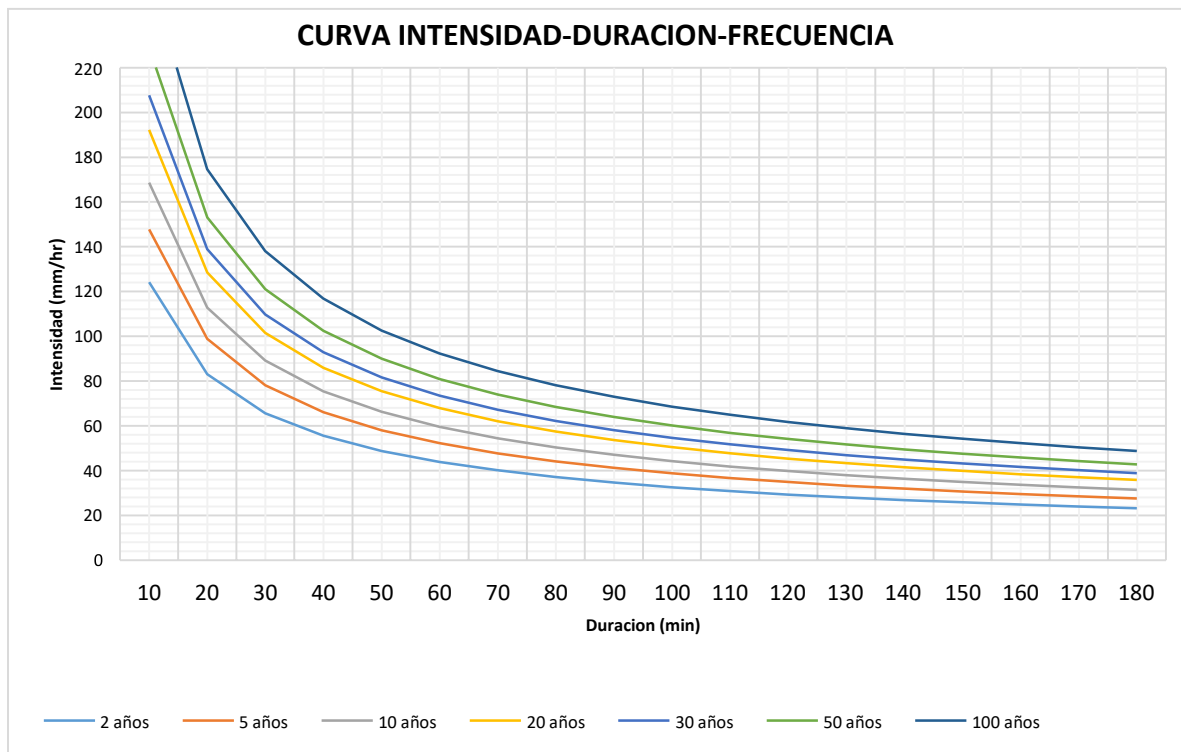
Intensidad en periodos de retorno							
Tiempo (min)	2	5	10	20	30	50	100
10	124.16	147.78	168.58	192.31	207.71	228.88	261.10
20	83.06	98.86	112.77	128.65	138.95	153.11	174.66
30	65.65	78.14	89.14	101.69	109.83	121.03	138.06
40	55.57	66.13	75.44	86.06	92.95	102.43	116.84
50	48.82	58.10	66.28	75.61	81.67	89.99	102.66
60	43.92	52.27	59.63	68.03	73.47	80.96	92.36
70	40.16	47.80	54.53	62.21	67.19	74.04	84.46
80	37.17	44.24	50.47	57.57	62.18	68.52	78.16
90	34.72	41.32	47.13	53.77	58.08	63.99	73.00
100	32.66	38.87	44.34	50.58	54.63	60.20	68.68
110	30.90	36.78	41.96	47.86	51.69	56.96	64.98
120	29.38	34.97	39.89	45.51	49.15	54.16	61.78
130	28.05	33.38	38.08	43.44	46.92	51.70	58.98
140	26.87	31.98	36.48	41.61	44.95	49.53	56.50

150	25.81	30.72	35.05	39.98	43.18	47.59	54.28
160	24.87	29.59	33.76	38.51	41.60	45.84	52.29
170	24.01	28.57	32.59	37.18	40.16	44.25	50.48
180	23.22	27.64	31.53	35.97	38.85	42.81	48.84

La generación de las Curvas IDF se lleva a cabo mediante la utilización y procesamiento de la información recopilada. Con base en este análisis integral se obtienen las siguientes Curvas IDF, que representan de manera precisa las relaciones entre la intensidad de la precipitación, su duración y la frecuencia de ocurrencia.

Figura 44

Curva IDF (intensidad-duración-frecuencia)



La intensidad de precipitación se establece empleando la curva IDF, este cálculo se basa en el tiempo transcurrido desde que la precipitación comienza en el punto más distante de la microcuenca hasta que alcanza la salida de la estación de aforo, lo que se conoce como el tiempo de concentración, el tiempo de concentración se calcula mediante la aplicación del método modificado

de Teméz. Para implementar este método, se requiere previamente determinar tanto la longitud como la pendiente del cauce principal, información que ha sido obtenida con anterioridad durante el proceso de caracterización hidrológica, estos parámetros son esenciales para llevar a cabo de manera adecuada el cálculo del tiempo de concentración.

$$T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Donde:

L: Longitud del cauce principal

S: Pendiente de la cuenca

$$T_c = 0.30 \left(\frac{4.15 \text{ Km}}{11.43^{0.25}} \right)^{0.76}$$

$$T_c = 0.56 \text{ h} * \frac{60 \text{ m}}{1 \text{ h}}$$

$$T_c = 33.6 \text{ m}$$

En el área de la microcuenca hidrológica, se ha determinado que el tiempo de concentración es de 33.6 minutos, esto implica que el agua de lluvia que se precipita en el punto más alejado de la microcuenca requiere aproximadamente 33.6 minutos para recorrer todo el trayecto y llegar a la salida de la misma, este valor es significativo, ya que indica la velocidad con la que el agua fluye a través de la microcuenca en respuesta a la precipitación.

Basándose en la información anterior, se procede a utilizar la curva IDF previamente desarrollada para calcular la intensidad de precipitación correspondiente a diferentes períodos de retorno, que incluyen valores de 2, 5, 10, 20, 30, 50 y 100 años.

Figura 45

Intensidad de precipitación

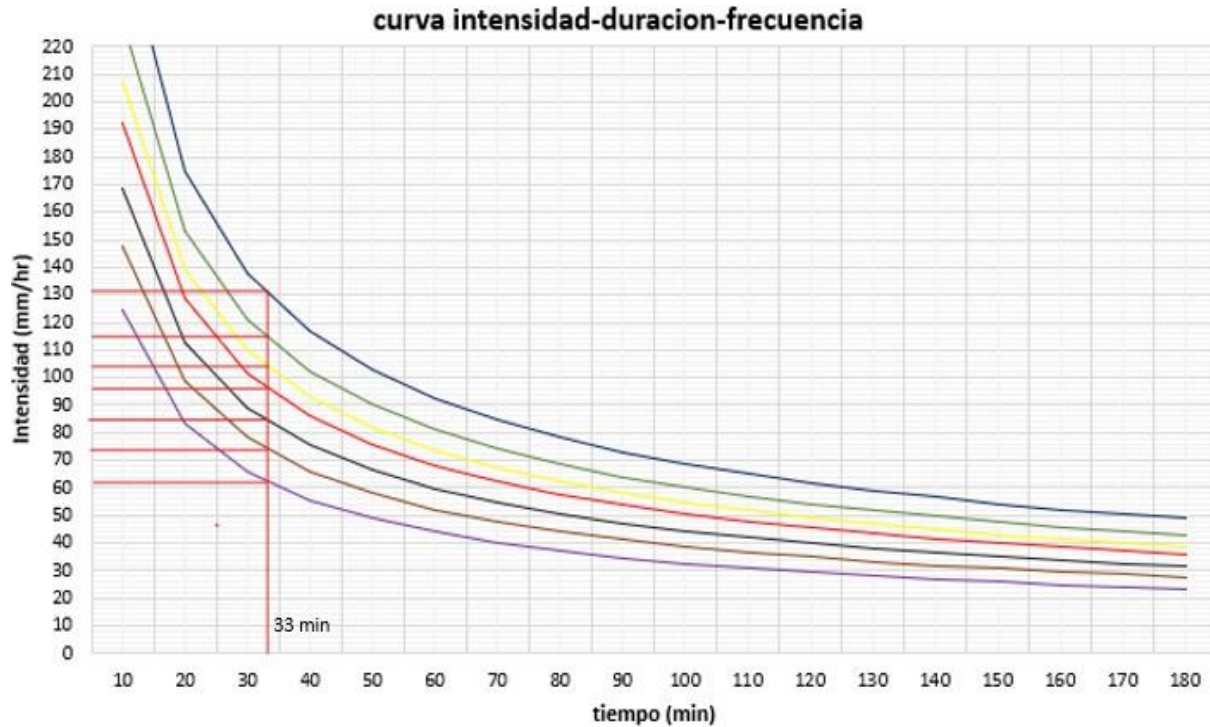


Tabla 43

Intensidad de precipitación en diferentes periodos

Intensidad	
Periodo (años)	Intensidad (mm/hr)
2	61
5	73
10	85
20	96
30	102
50	115
100	131

Obtenida la información necesaria y considerando los factores relevantes para aplicar el método racional en la estimación de caudales máximos, se procede a calcular el caudal máximo para cada uno de los diferentes períodos de retorno correspondientes a los años respectivos. Este proceso implica determinar, en función de la información recopilada, cuáles serían los caudales máximos esperados para eventos de lluvia que tienen una recurrencia de 2, 5, 10, 20, 30, 50 y 100 años.

Tabla 44
Caudales máximos

Caudales máximos	
Periodo (años)	Caudales (m³/s)
2	5.7
5	6.8
10	7.9
20	8.9
30	9.5
50	10.7
100	12.7

Los caudales máximos obtenidos indican que se espera que el caudal alcance los 5.7 metros cúbicos por segundo (m³/s) una vez cada dos años y que, en circunstancias extremadamente raras, se alcance un caudal máximo de 12.7 m³/s solo una vez cada 100 años en la microcuenca hidrológica.

2.2.3. Determinar el escurrimiento superficial y el caudal máximo en la cuenca hidrográfica Dolores.

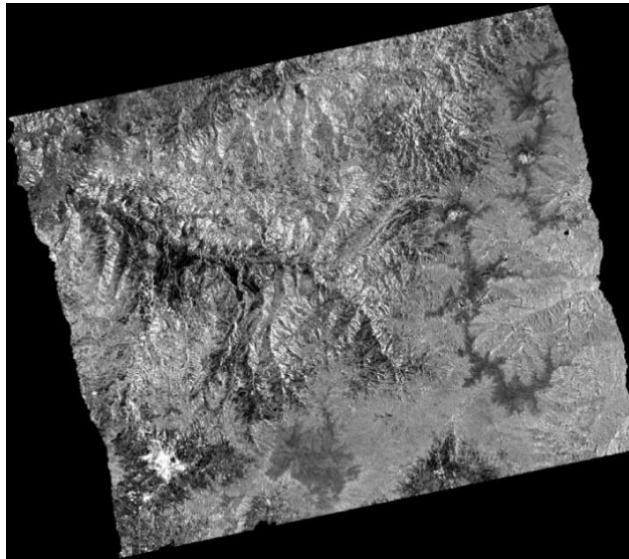
2.2.3.1 Modelación hidrológica. La modelación hidrológica se lleva a cabo utilizando los datos recopilados de parámetros físicos y climáticos obtenidos anteriormente. Estos datos son esenciales para calibrar y validar los modelos hidrológicos utilizados en la microcuenca Dolores y en la evaluación de diferentes escenarios de variabilidad climática. La calibración y validación de estos modelos son procesos cruciales para garantizar su capacidad de representar de manera precisa los procesos hidrológicos y las respuestas ante diferentes condiciones climáticas y geográficas en la cuenca.

2.2.3.1.1 Construcción del modelo. La construcción del modelo hidrológico implica una serie de pasos clave, estos incluyen la definición de los límites de la cuenca, la incorporación de datos climáticos, la inclusión de información sobre el uso de la tierra y la representación de la red de drenaje en el área que se va a modelar, estos procesos son fundamentales para establecer una base sólida que permita la simulación precisa de los procesos hidrológicos en la región de interés. La delimitación de la cuenca Dolores se empleó el DEM (modelo digital del terreno) en resolución

12.5 m x 12.5 m proveniente de la ASF DATA SEARCH (Alaska Satellite Facility, los archivos digitales (.shp) de la red hídrica y el área de la cuenca obtenidos a través de Global mapper extensión con Google Earth. (Véase anexo. I)

Figura 46

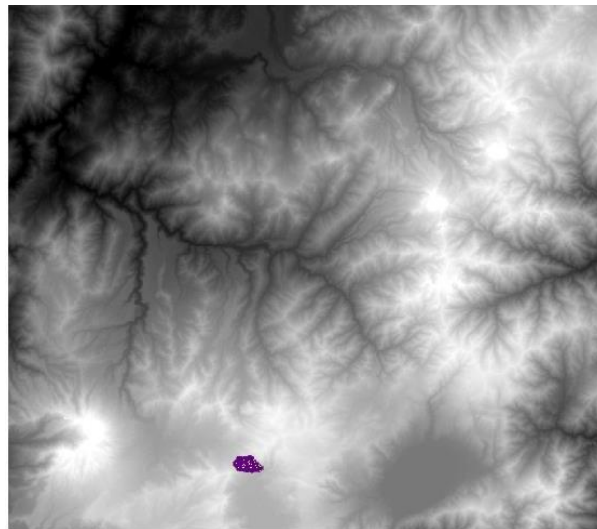
Modelo de elevación shp. Microcuenca Dolores



Fuente. ASF Data Search (Alaska Satellite Facility)

Figura 47

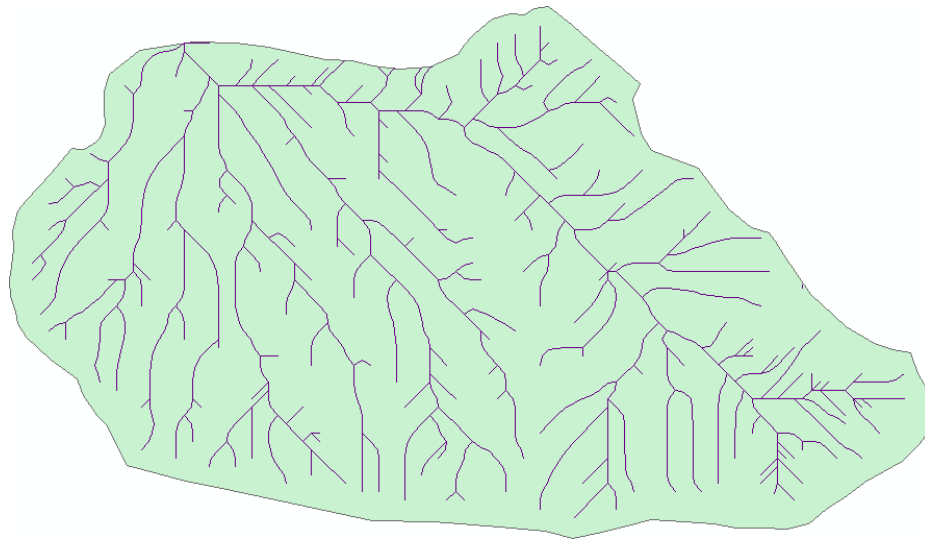
Modelo de elevación y localización shp. Microcuenca Dolores



Fuente. ASF Data Search (Alaska Satellite Facility)

Figura 48

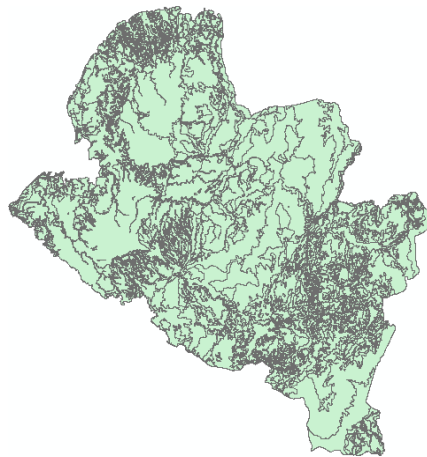
Área y red hídrica microcuenca Dolores



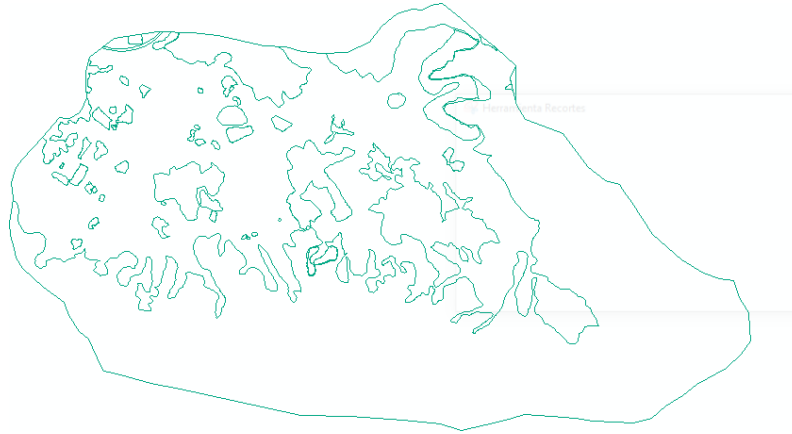
Utilizando la información geográfica proporcionada por el mapa mundial de suelos (FAO/UNESCO, 1971), se procede a determinar las categorías de uso de la tierra y las coberturas que son equivalentes al área de la microcuenca hidrológica. Esta acción implica ubicar con precisión la ubicación geográfica del área utilizando coordenadas UTM.

Figura 49

Uso de suelos departamento de Nariño



Fuente. FAO/UNESCO, 1971

Figura 50*Uso de suelos departamento de Nariño*

Fuente. FAO/UNESCO, 1971

La modelación en el software Arc-SWAT se basa en las capas obtenidas mediante ArcGIS, que incluyen la configuración de los componentes y el terreno, la clasificación del uso actual del suelo se realiza utilizando información geográfica proporcionada por CorpoNariño, donde se asignan códigos de CLC para identificar diferentes tipos de terreno en la microcuenca hidrológica, que tiene un área total de 6.84 km².

Tabla 45*Áreas respectivas del uso del suelo*






Uso de suelos		
Uso de suelo	área (km²)	%
Bosques	4.88	71
Tierra pecuaria o cultivable	1.38	20
cultivos	0.495	7.2
urbanización	0.0895	1.3
Carretera	0.0000044	0.000064
Área total	6.84	100

Para ingresar esta información en el modelo SWAT, se realiza una reclasificación de las categorías de tierras de acuerdo con las directrices establecidas en el manual de usuario de la interfaz ArcSWAT y en consonancia con la base de datos y definiciones de suelos de la FAO. Además, se lleva a cabo una configuración específica basada en el archivo “Shapefile” del

Oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática-Microcuenca Dolores departamento de Nariño. Esto se logra mediante la generación de un nuevo campo en el archivo “Shapefile” que contenga una tabla de equivalencias. Esta tabla se utiliza para establecer una relación entre los códigos utilizados en el manual de usuario de la interfaz y las categorías de tierras presentes en la microcuenca, lo que facilita la integración efectiva de la información geográfica en el modelo SWAT.

Para incorporar la información sobre la cobertura vegetal o el uso de suelos en el software ArcSWAT, es necesario realizar una equivalencia y reclasificación de acuerdo con la metodología Corine Land Cover Colombia (CLC), esta metodología se utiliza para llevar a cabo un inventario detallado de la cobertura del suelo, lo que resulta esencial en el contexto de SWAT, La equivalencia y reclasificación se efectúan para que los datos de cobertura de tierra sean compatibles y coherentes con la estructura y requerimientos específicos del modelo SWAT. Esta acción facilita la incorporación precisa de la información sobre la cobertura vegetal y el uso de suelos en el modelo, lo que a su vez contribuye a una representación más precisa de los procesos hidrológicos y de erosión en la cuenca estudiada.

Tabla 46
Reclasificación cobertura vegetal o uso de suelos

Reclasificación cobertura vegetal o uso de suelos				
Clasificación Corine Land Cover Colombia			Equivalencia SWAT	
Ítem	Código	Tipo	Tipo	Código
1	 31211	Bosques	Forest-Evergreen	FRSE
2	 231	Tierra pecuaria o cultivable	Pasture	PAST
3	 223	cultivos	Agricultural Land-Generic	AGRL
4	 111	urbanización	Residential-High Density	URHD
5	 -	Calle	-	-

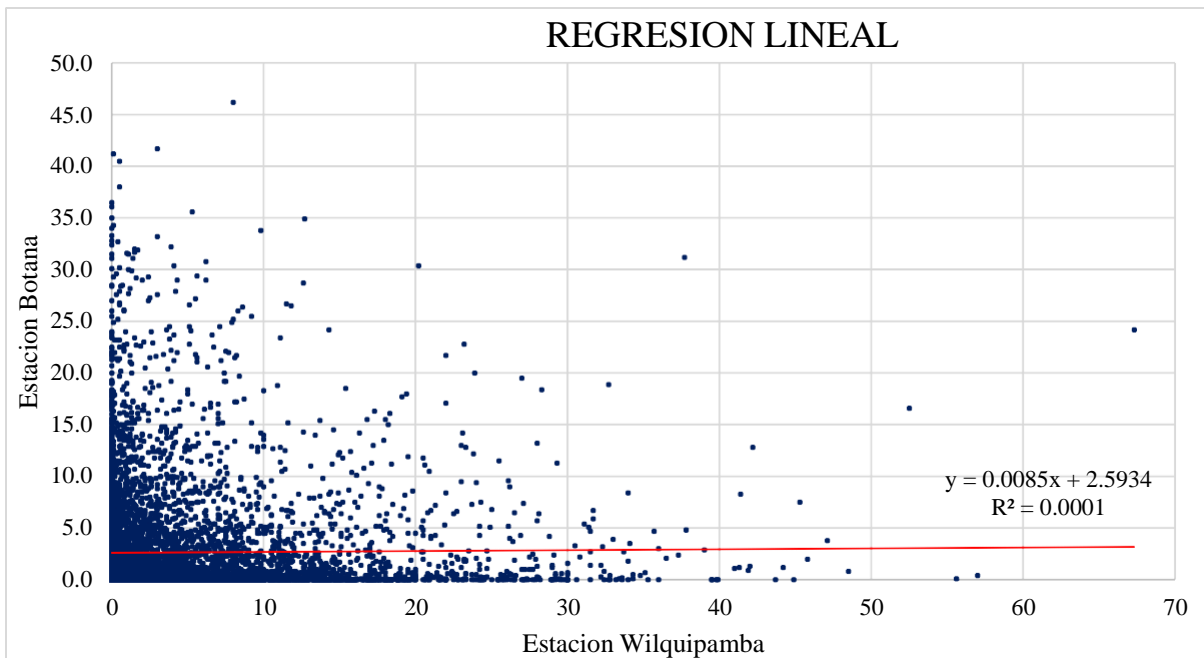
Para comenzar la modelación hidrológica con SWAT, es esencial contar con datos climáticos específicos, que incluyen las series diarias de precipitación y la temperatura media. En el caso de la cuenca Dolores, se utilizó información climática correspondiente al período de 1999 a 2021,

estos datos fueron procesados de acuerdo con la estación meteorológica Botana, que previamente se había seleccionado durante la fase de caracterización climática.

En la serie de datos descargada de la estación Botana, se observaron meses y días en los que faltaba información climática, para abordar esta falta de datos, se decidió recurrir a la base de datos del IDEAM y se identificó que la estación Wilquipamba (52045070) tenía datos complementarios similares a los de la estación Botana, como solución, se aplicó el método de regresión lineal para completar los datos faltantes. En este proceso, se realizó un análisis que permitió establecer una relación y asociación entre la estación Botana y la estación Wilquipamba, esto facilitó el relleno de los datos faltantes en la estación Botana utilizando la información disponible de Wilquipamba, la elección de este método se basó en que el porcentaje de datos faltantes en la serie de precipitación no superaba el 15%.

Figura 51

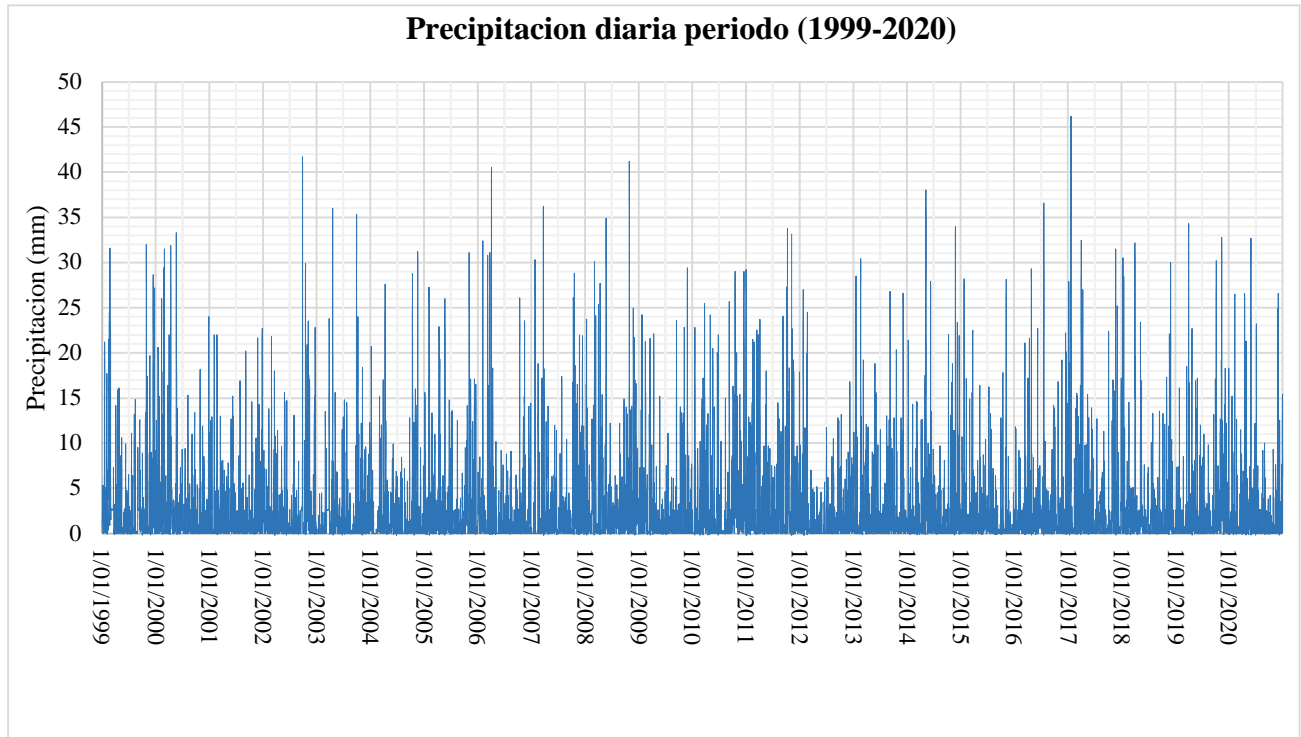
Método de regresión lineal para relleno de información-Precipitación



Empleando el método de regresión lineal se obtiene la serie de información faltante en el periodo de 1999-2020 con un total de 8030 datos de precipitación diaria.

Figura 52

Precipitación media diaria periodo 1999-2020 estación Botana



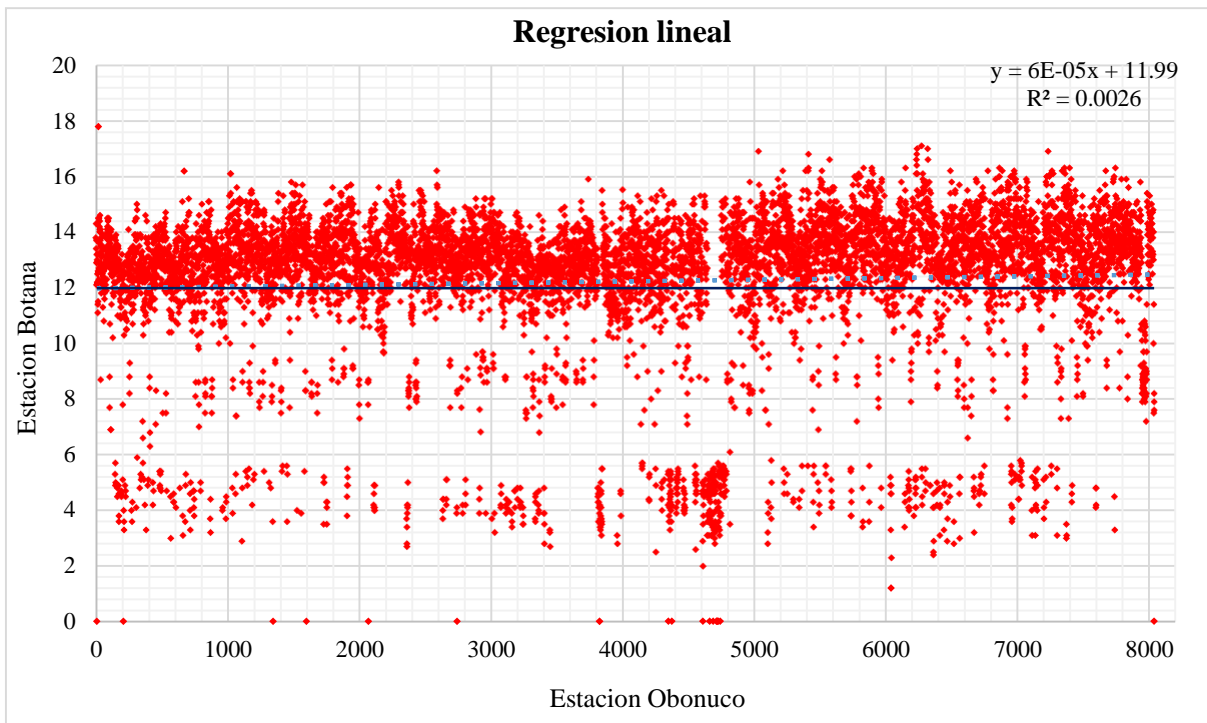
La serie de datos de temperatura abarca desde 1999 hasta 2020 y se utiliza para calcular la temperatura media diaria, esta temperatura media se determina tomando el promedio entre la temperatura máxima y mínima registrada cada día, sin embargo, durante este período, hubo días en los que no se registraron datos debido a mantenimiento o fallos en la estación meteorológica. Para abordar esta falta de información, se aplicaron métodos estadísticos y se recurrió a la estación de Obonuco (52045010), que tenía datos disponibles en los períodos en los que faltaban datos en la estación original.

La serie de temperaturas fueron obtenidas a partir del periodo de 1999 hasta el 2020, para determinar la temperatura media diaria, la cual se registra a partir del promedio de la temperatura máxima y mínima diaria, sin embargo existieron días en los cuales no hubo registro de datos por mantenimiento o falla de la estación, por lo que se recurrió a las metodologías estadísticas para completar la información faltante, de la cual la estación con información suficiente era la estación de Obonuco (52045010) contenía información en los periodos faltantes.

Se llevó a cabo un análisis para aplicar el método de regresión lineal entre las dos estaciones seleccionadas: Botana y Obonuco. Se estableció una asociación entre estas estaciones y se utilizó este método para completar los datos que faltaban en la estación Botana. La elección de este método se basó en que el porcentaje de datos faltantes en la serie de precipitación no superaba el 18%.

Figura 53

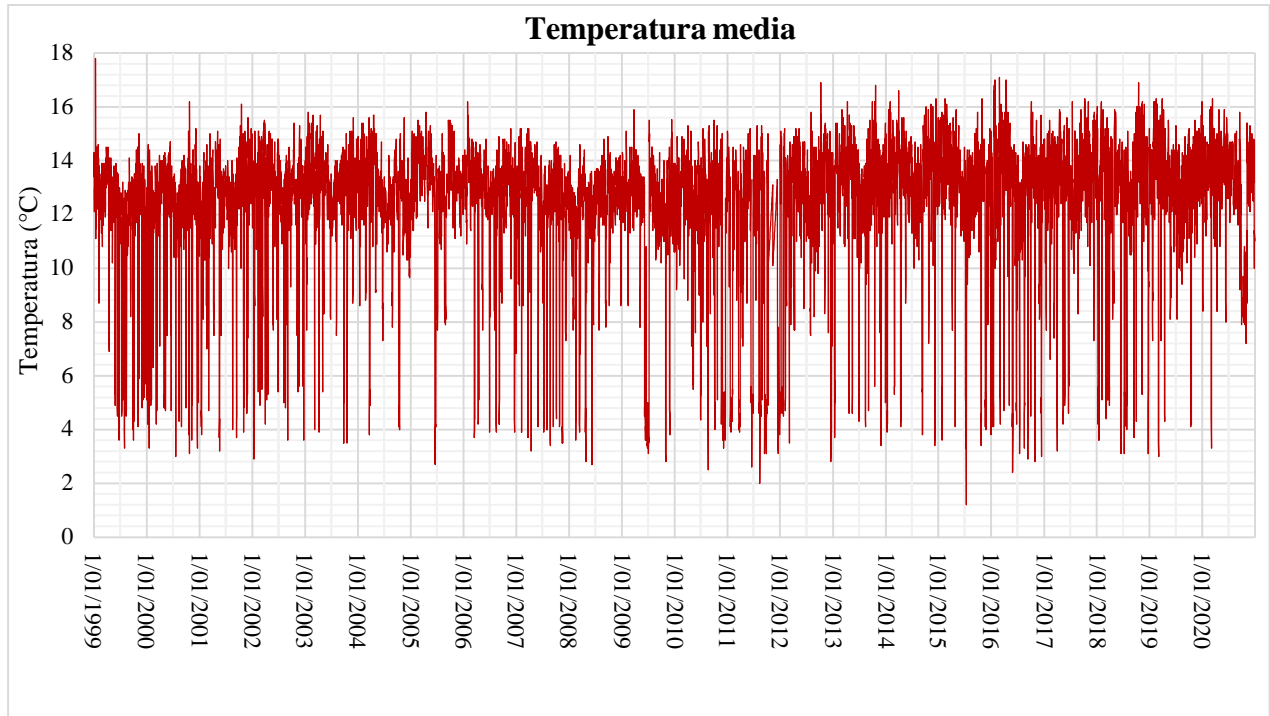
Método de regresión lineal para relleno de información-Temperatura



Empleando el método de regresión lineal se obtiene la serie de información faltante en el periodo de 1999-2020 con un total de 8030 datos de temperatura diaria.

Figura 54

Temperatura media diaria periodo 1999-2020 estación Botana



Procesada la información necesaria para realizar la modelación, tanto la caracterización climática e hidrológica se configuran como componentes clave en la representación del terreno, siguiendo esta premisa, se ingresan estos parámetros junto con los datos relativos a la delimitación de la microcuenca Dolores, esta acción implica la configuración de los componentes y características del terreno que son esenciales para el modelo de la cuenca hidrográfica, lo que permite una representación precisa de los procesos hidrológicos en dicha cuenca.

La información recopilada debe ser procesada y preparada adecuadamente para su posterior uso en la modelación hidrológica, de acuerdo con este enfoque, se lleva a cabo la preparación de la información de acuerdo con los parámetros de caracterización que se han establecido previamente para la microcuenca. La información relacionada con la caracterización hidrológica debe organizarse en carpetas que contengan todos los datos pertinentes sobre el relieve o modelo de elevación, uso de suelos, red hídrica y caracterización hidrológica, esta organización implica la

creación de subcarpetas que contengan los archivos correspondientes a cada una de estas categorías.

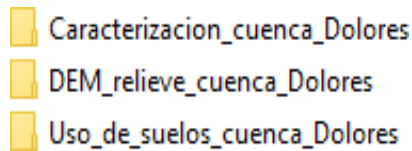
Tabla 47

Información de entrada al modelo climático

Información de entrada- caracterización hidrológica		
Carpeta	Subcarpeta	Tipo de archivo
Caracterización Microcuenca Dolores	Delimitación y parámetros de forma	shp – xls
	Red y densidad de drenaje	shp - xls
Modelo digital de elevación (DEM)		shp
Uso de suelos	Cobertura vegetal	shp - xls
	Información de uso de suelos	xls

Figura 55

Diseño de carpetas para la modelación hidrológica



El proceso de tratamiento de datos climáticos comienza con la evaluación de los registros diarios de caudal, precipitación y temperatura, los cuales deben haber sido previamente revisados y validados para asegurar su integridad. A continuación, se procede a la organización de la carpeta de caracterización climática, la cual se desglosa en tres subcarpetas, cada una de estas subcarpetas debe contener un archivo ejecutable configurado según el formato requerido por el modelo.

Tabla 48*Configuración archivos de entrada modelo climático*

Información de entrada- caracterización hidrológica		
Carpeta	Contenido	Tipo de archivo
Caudales	Información hidrológica	xls
Precipitación	Información climática	xls
Temperatura		xls
Estación	Localización UTM	xls

Los archivos de las subcarpetas deben contener la siguiente estructura:

Figura 56*Diseño de archivos requeridos para la modelación*

Encabezado	Date	Flow
Formato/unidades	DD/MM/AAAA	m ³ /s

Encabezado	Date	Precip
Formato/unidades	DD/MM/AAAA	mm

Encabezado	Date	Temp
Formato/unidades	DD/MM/AAAA	Celsius

Encabezado	Name	Latitud	Longitud
Formato/unidades	nombre de la estación	UTM	UTM

2.2.3.1.2. Calibración y validación del modelo. Durante el proceso de calibración del modelo hidrológico en la microcuenca Dolores, se estableció un período que abarca desde el 1 de enero de 1999 hasta el 31 de diciembre de 2010, durante esta fase de calibración, se buscó lograr una correspondencia cercana entre el comportamiento del caudal observado en la cuenca y el caudal simulado por el modelo, este ajuste se realizó manualmente utilizando la herramienta ArcSWAT, que permitió una comprensión más profunda del comportamiento del modelo y la influencia de los cambios en los parámetros en el área de estudio, en consecuencia, se seleccionaron cuidadosamente los parámetros de ajuste para la modelación de la escorrentía en la cuenca.

Los parámetros seleccionados para la calibración, junto con sus valores iniciales y finales, se basaron en estudios previos como punto de referencia para la modelación en SWAT, con el objetivo de estimar la oferta hídrica en cuencas hidrológicas, a partir de estas investigaciones previas, se pudo identificar que el parámetro que ejercía la mayor influencia en la calibración del modelo era el número de la curva (CN2), este parámetro, en particular, representa la capacidad de infiltración del suelo y la respuesta de una cuenca ante las precipitaciones. En el contexto de la calibración de SWAT, el número de la curva se ajusta para reflejar las condiciones específicas de la cuenca en estudio, teniendo en cuenta su capacidad de retención de agua en función de distintos tipos de suelo, cobertura vegetal y uso de la tierra.

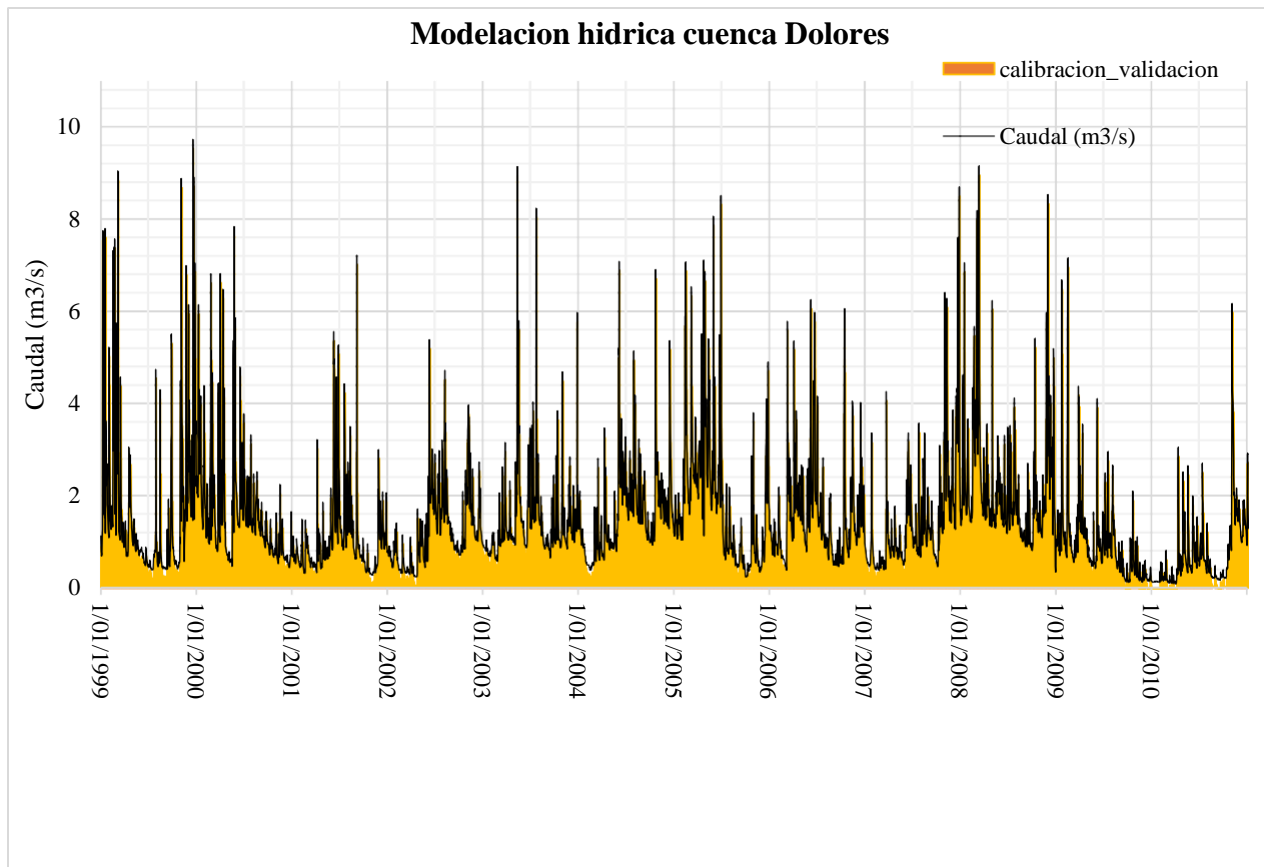
Tabla 49
Parámetros de calibración

Parámetro de ajuste	Código	Unidad	Inicial	Calibración
Constante de recesión de flujo	ALPHA_BF	1/día	0.057	0.056
Numero de curva	CN2	Adimensional	-80 %	-35%
Factor de evaporación	ESCO	Adimensional	0.14	0.98
Capacidad de agua en el suelo	SOL-AWC	mm/hr	-80 %	-35%
Conductividad hidráulica saturada	SOL-K2	mm/hr	-50 %	-50%
Profundidad mínima de escurrimiento subsuperficial	GWQMN	adimensional	0.0099	0.048

Durante el proceso de calibración, se aprecia un ajuste aproximado en las magnitudes del escurrimiento superficial en el área de la cuenca Dolores. Esto se debe a la proximidad y distribución uniforme de los puntos de datos con respecto a la línea de base utilizada para la modelación.

Figura 57

Modelo de calibración microcuenca hidrológica Dolores

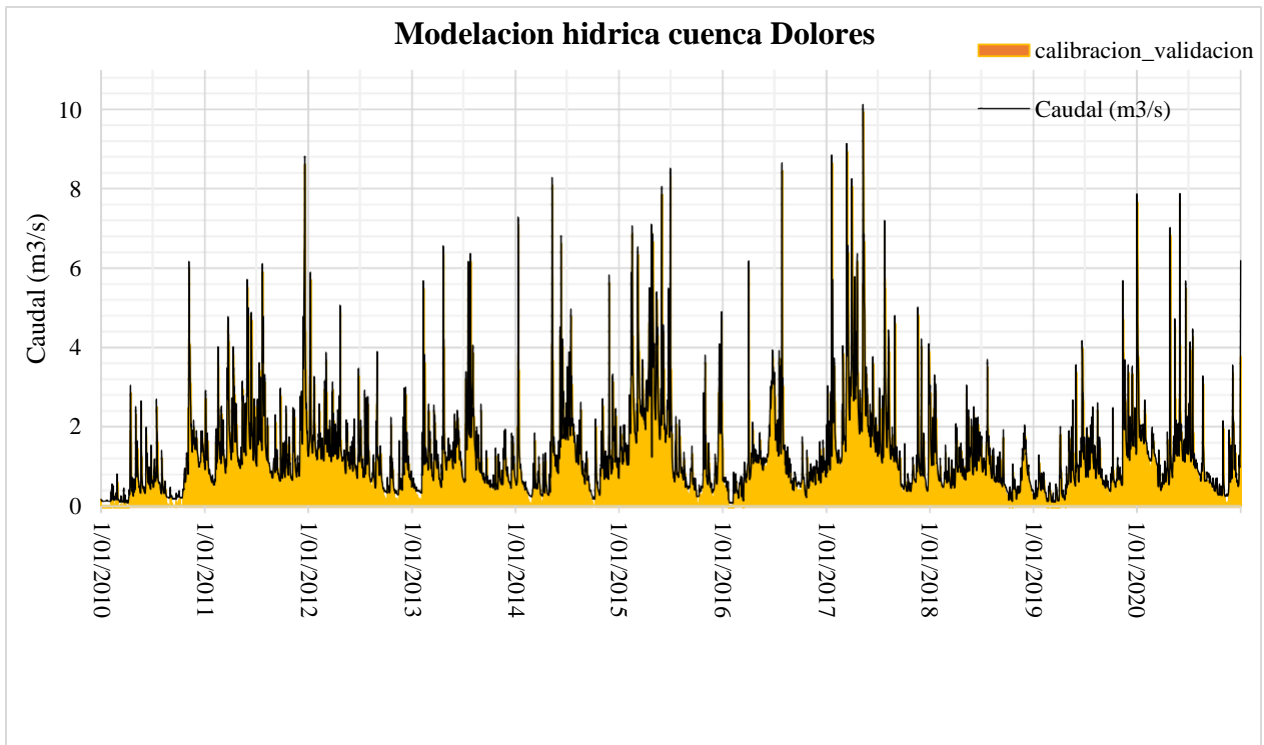


Durante el período de validación del modelo, que comprendió desde el 1 de enero de 2011 hasta el 31 de diciembre de 2020, se utilizaron datos de series de caudal de la estación para llevar a cabo simulaciones basadas en el ajuste realizado previamente durante la fase de calibración. Este ajuste se realizó considerando una aproximación representativa de la tendencia diaria en la estimación de la escorrentía superficial.

Es importante destacar que, aunque existe una diferencia en los caudales acumulados, se observa que la tendencia de ambas curvas es similar tanto en el período de calibración como en el de validación.

Figura 58

Modelo de validación microcuenca hidrológica Dolores



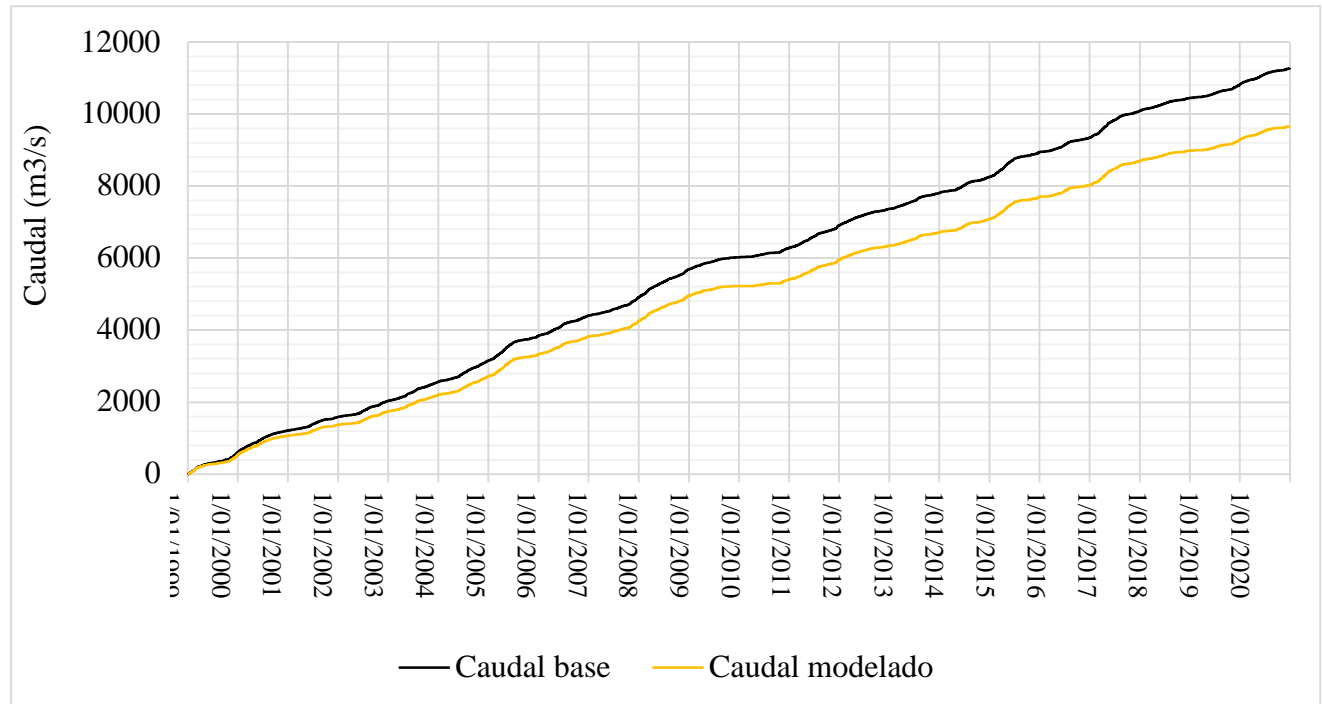
En el proceso de evaluación de eficiencia en una modelación hidrológica, se compara el comportamiento de los caudales modelados con los datos observados hasta el periodo 2020, a pesar de que existe una pequeña discrepancia en los caudales modelados, esta diferencia se considera aceptable, esto se debe a que el comportamiento entre los caudales modelados y los caudales observados ha sido similar desde el proceso de calibración hasta la validación de la modelación hidrológica.

El método de evaluación de eficiencia indica que, a pesar de una pequeña discrepancia en los caudales modelados en comparación con los datos observados hasta 2020, se acepta esta diferencia

porque el comportamiento general entre ambos flujos ha sido consistente y similar durante todo el proceso de calibración y validación de la modelación hidrológica, esta consistencia en el comportamiento sugiere que el modelo hidrológico utilizado es efectivo y confiable para prever el comportamiento de los caudales en el periodo estudiado.

Figura 59

Validaciones caudales acumulados



En la evaluación del modelo, se aplicó el sistema de puntuación propuesto por Moriasi et al. (2007), inicialmente, se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 de 0.52 en la primera fase de modelación, lo cual indica que el modelo inicial es aceptable. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, con un valor inicial de 0.51, también se consideró satisfactorio, además, el sesgo porcentual, medido como el Percent Bias, presentó un valor de -23.45%, el cual se evaluó como adecuado, sin embargo, durante el proceso de calibración, se obtuvieron diferentes valores: un R^2 de 0.68, un PBIAS de 12.37%, y un NSE de 0.64.

Tabla 50

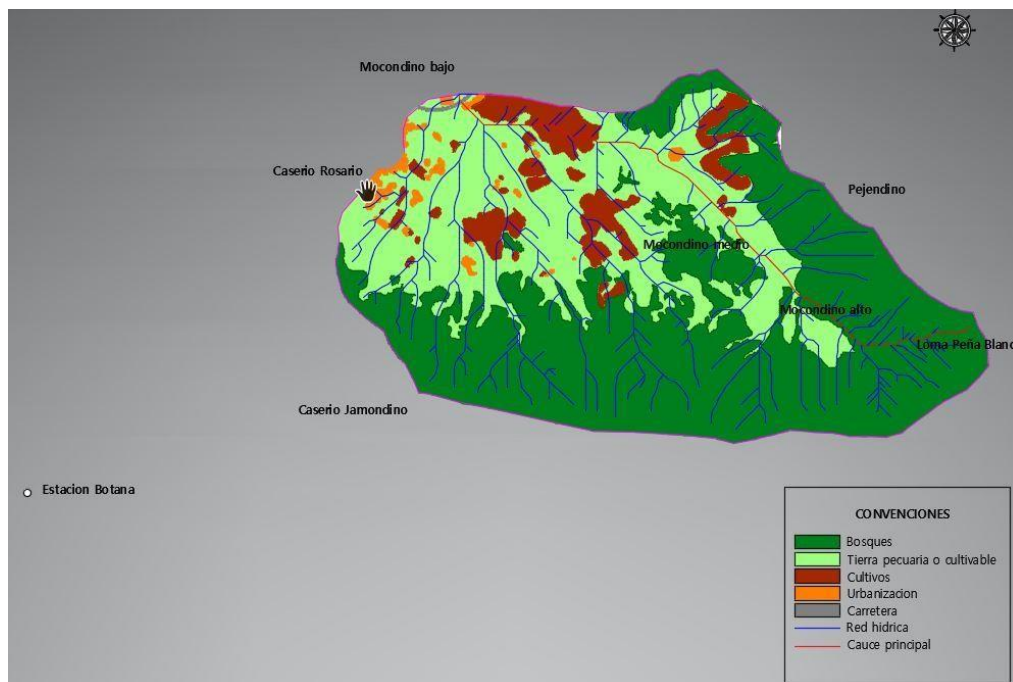
Estadísticos generados para la modelación de caudales microcuenca Mijitayo.

Evaluación del modelo			
Descripción	R2	NSE	PBIAS
Modelación inicial	0.52	0.51	-23.45%
Calibración validación	0.68	0.64	12.37%

2.2.3.1.3. Información de salida. En el contexto de la modelación de la microcuenca hidrológica, la información de salida se genera a partir del procesamiento previo de la información a través del ArcSWAT, esta información de salida es esencial para obtener una representación gráfica de la microcuenca, en la cual se representa el uso del suelo, la temperatura y la precipitación actuales, los cuales son las variables a analizar en el contexto de escenarios de cambio climático. (Véase anexo. I)

Figura 60

Modelo de información cuenca hidrográfica Dolores



De acuerdo al proceso de calibración y validación se obtiene, los volúmenes de flujo total obtenidos en la modelación hidrológica en la microcuenca , analizando los datos de salida que muestran los caudales y simulados durante los procesos de calibración y validación, en estos períodos, se observa que el caudal base representa la mayor proporción del flujo superficial en la microcuenca, en contraste, la escorrentía directa generada por la precipitación es significativamente menor en comparación con el caudal base.

Tabla 51
Volumen del flujo total

Volumen del flujo total		
Descripción	Calibración	Validación
Precipitación (mm)	22784.41	21043.74
Volumen de flujo base (mm)	17122.48	15387.18
Flujo base (%)	75.15	73.12
Volumen de escorrentía (mm)	5661.93	5656.56
Escorrentía directa (%)	24.84	26.88

El volumen del flujo total en milímetros durante las etapas de calibración y validación del modelo hidrológico en la microcuenca, durante la calibración, la precipitación total fue de 22784.41 mm, con un flujo base de 17122.48 mm, que constituye el 75.15% del flujo total, la escorrentía directa representó el 24.84% del flujo total, con un volumen de 5661.93 mm, en la fase de validación, la precipitación total fue de 21043.74 mm, con un flujo base de 15387.18 mm, que corresponde al 73.12% del flujo total, la escorrentía directa durante la validación fue del 26.88% del flujo total, con un volumen de 5656.56 mm. Estos valores indican la distribución de la lluvia entre el flujo base y la escorrentía directa durante las diferentes fases, lo que es esencial para entender cómo el agua se mueve a través de la microcuenca y para la gestión adecuada de los recursos hídricos en el área.

2.2.3.2. Escenarios de variabilidad climática. Los escenarios de cambio climático se construyen considerando las fluctuaciones en las temperaturas y las precipitaciones a lo largo de un período de veinticinco, como se han definido en la modelización hidrológica, estos parámetros son fundamentales para evaluar tanto la disponibilidad de agua como la respuesta de la microcuenca ante los efectos de la variabilidad climática y los fenómenos climáticos extremos.

2.2.3.2.1. Escenarios de cambio de temperatura. En el análisis del cambio de temperatura según el Escenario RCP 8.5 propuesto por el IDEAM para el departamento de Nariño, se ha empleado el modelo RCP 8.5, que forma parte de los escenarios de cambio climático proporcionados por esta entidad, según este modelo, en la región Andina, donde se encuentra el departamento de Nariño, se proyecta un aumento de temperatura que oscila entre 2 y 3.5 °C durante el período que va de 2040 a 2070, esta variación implica un incremento del 0.04 % con respecto a la temperatura media actual de 13.2 °C. De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la modelación basada en los datos facilitados por el IDEAM, se estima que la temperatura se elevará en 1.9 °C en relación con la media registrada de 12.21 °C durante el período comprendido entre el 1 de enero de 1999 y el 31 de diciembre de 2021.

Figura 61

Escenario de variabilidad de temperatura

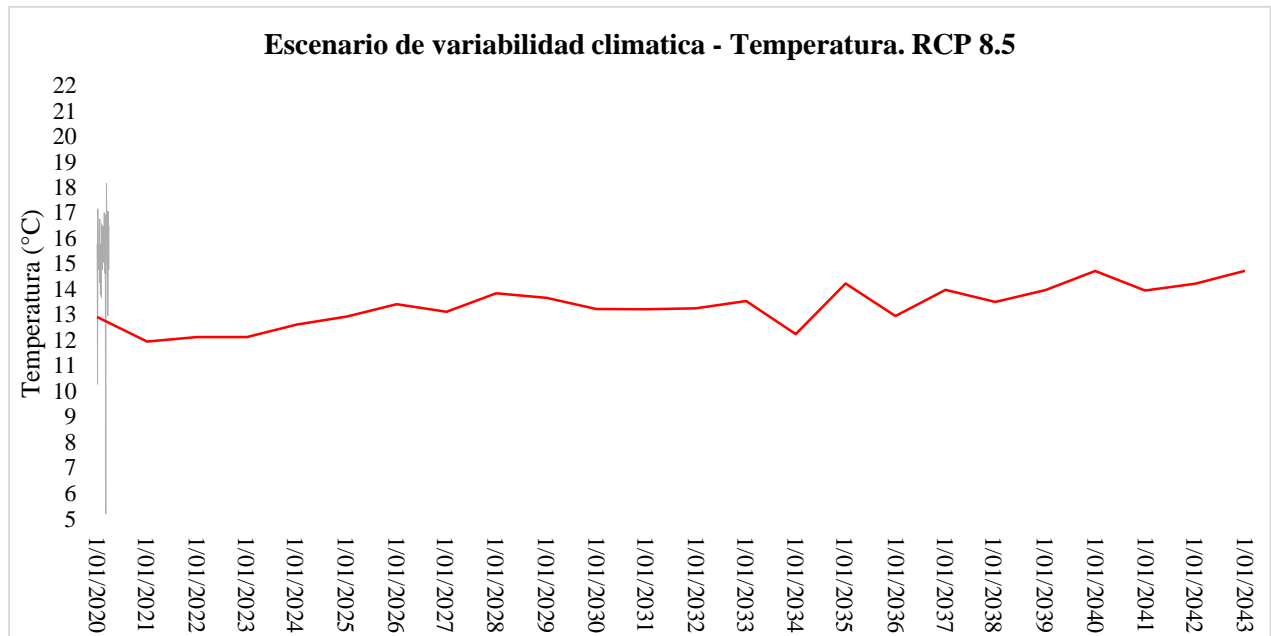
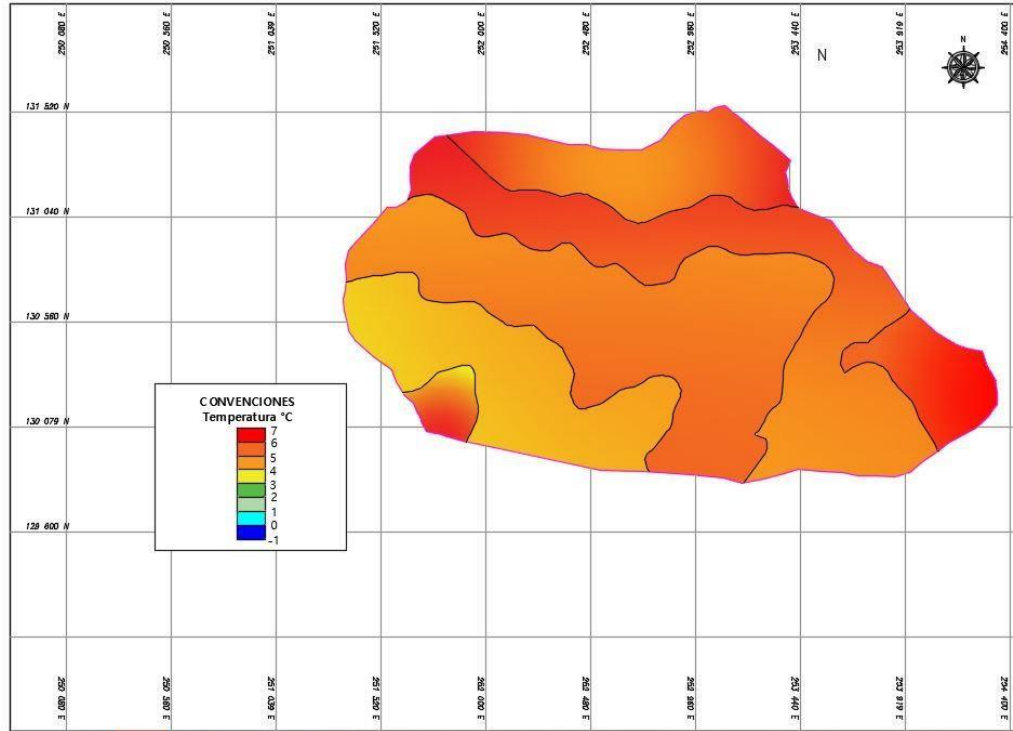


Figura 62

Isoterma área microcuenca Dolores

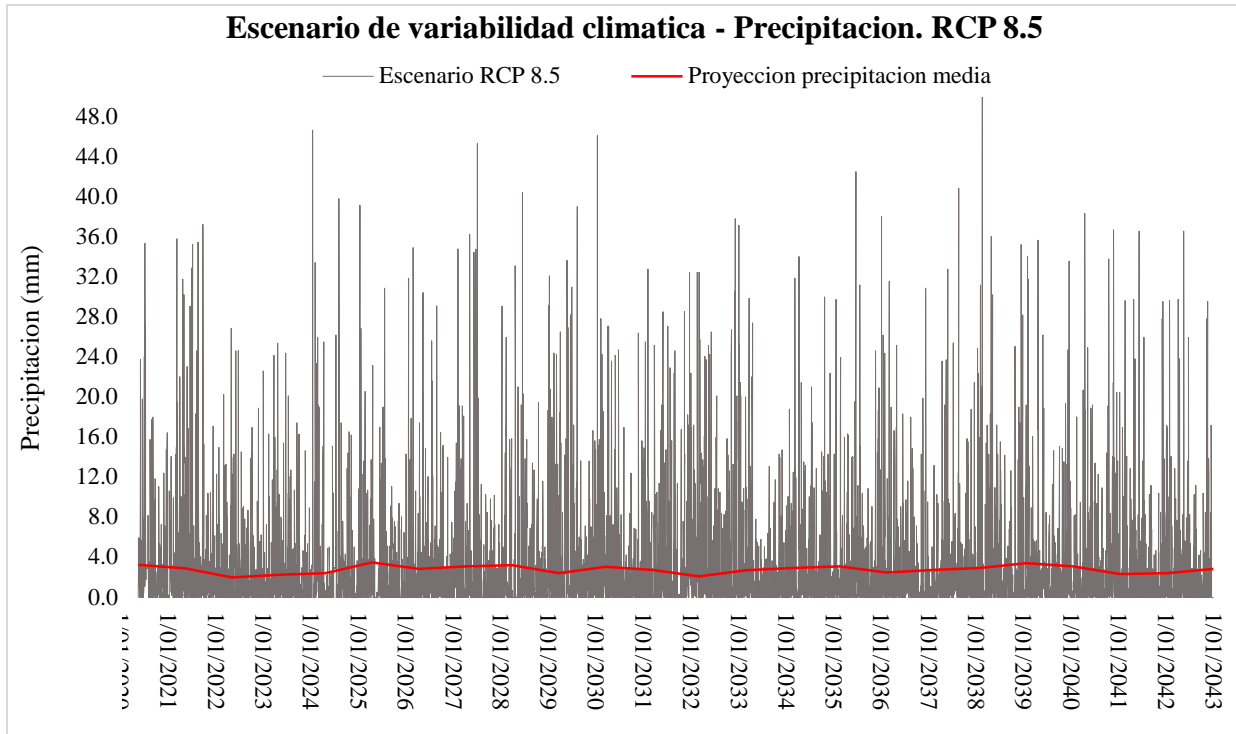


2.2.3.2.2. Escenarios de cambio de precipitación. La predicción de los patrones de precipitación se basa en la recolección de información a través del IDEAM, en los cuales en el periodo de veintidós años la estación meteorológica Botana ha registrado cuatro años excepcionalmente húmedos y otros cuatro años significativamente más secos, entre estos, al menos un año ha experimentado tanto condiciones extremadamente lluviosas como sequías severas. Estos extremos climáticos se asocian con los fenómenos climáticos conocidos como "El Niño" y "La Niña".

La predicción de los cambios en el escenario de precipitación se formuló siguiendo las recomendaciones del IDEAM. Este enfoque proyecta variaciones que oscilan entre una disminución del 20% y un aumento del 30% en la precipitación media anual en las áreas de influencia de las estaciones de medición de precipitación. Estos cálculos se basan en el escenario RCP 8.5.

Figura 63

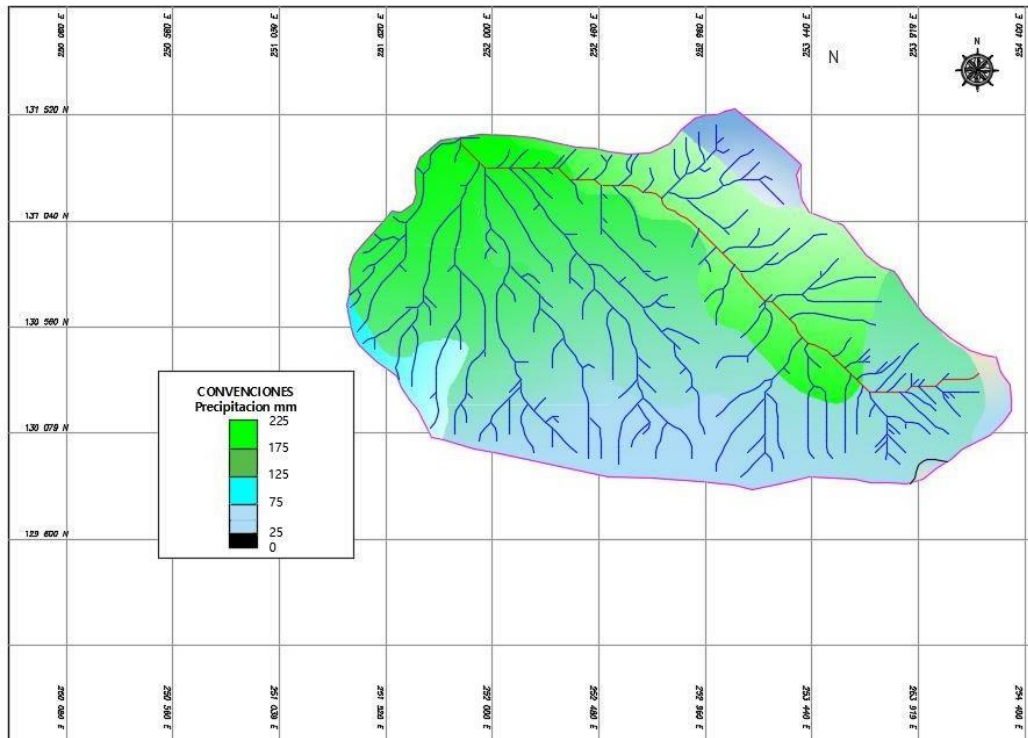
Escenario de variabilidad de precipitación



En la modelación del cambio de precipitación en la microcuenca, se predice un cambio en el escenario según los datos proporcionados por el IDEAM. Durante el período comprendido entre 2021 y 2042, se proyecta un cambio en la precipitación media anual en el área andina que varía entre un 20% y un 40%, según esta información, el cambio de precipitación se sitúa en un 12.6%, lo que resulta en una precipitación media anual estimada de 1301.45 mm.

Figura 64

Isoyetas área microcuenca Dolores

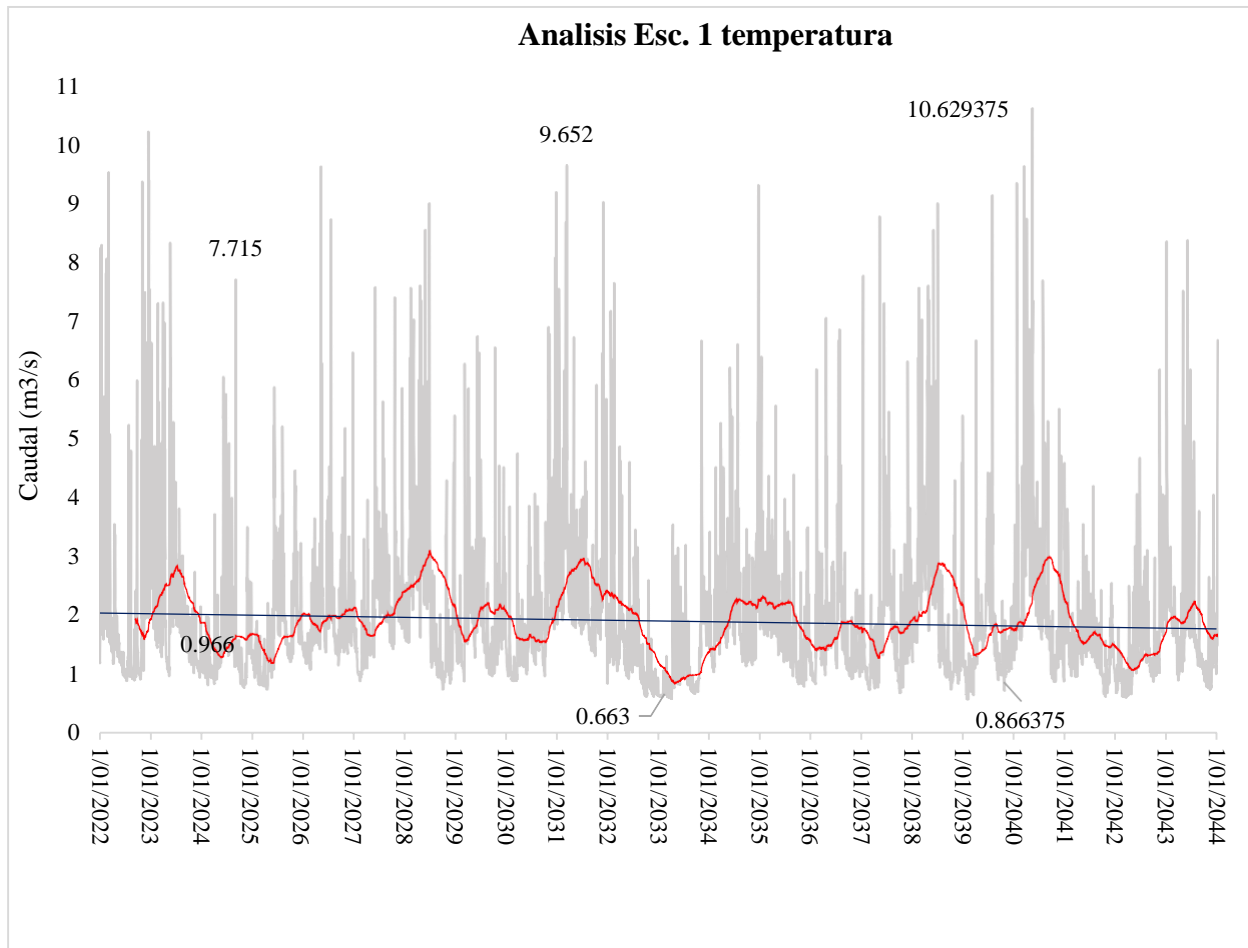


2.2.3.3. Estimación oferta hídrica. En el contexto de la modelación hidrológica de la microcuenca Dolores, se lleva a cabo un análisis a lo largo de períodos de veinticinco años para evaluar el escenario de variabilidad climática, durante el período de calibración y validación, los parámetros del modelo se mantienen constantes; sin embargo, estos parámetros se ajustan en respuesta a los escenarios propuestos de variabilidad de temperatura y precipitación entorno a los fenómenos climáticos “El Niño” y “La Niña”.

En el análisis de los resultados en el escenario 1 (ESC.1 - Temperatura), que corresponde al cambio en la temperatura, se observa una disminución del 1.2% en la oferta hídrica durante el periodo 2022-2032, esta disminución se incrementa al 1.8% para el periodo 2032-2042 en comparación con el caudal base, estos datos indican una reducción aproximada del 1.5% en el caudal de la microcuenca hidrológica durante un período de veintidós años.

Figura 65

Análisis oferta hídrica Esc. 1 Temperatura



En el escenario 2 (ESC.2 - Precipitación), se observa un aumento en la proporción de escorrentía directa. Esta proporción se incrementa en un 4.74%, alcanzando su valor máximo, este aumento implica un caudal mayor en la microcuenca hidrológica, además, en el Escenario 2 se identifica un crecimiento considerable en el coeficiente de escurrimiento, los datos obtenidos indican que el aumento del flujo base es más significativo cuando las precipitaciones aumentan. Esta relación implica una disminución del flujo base a largo plazo, ya que el incremento es exponencial y constante.

Figura 66

Análisis oferta hídrica Esc. 2 Precipitación

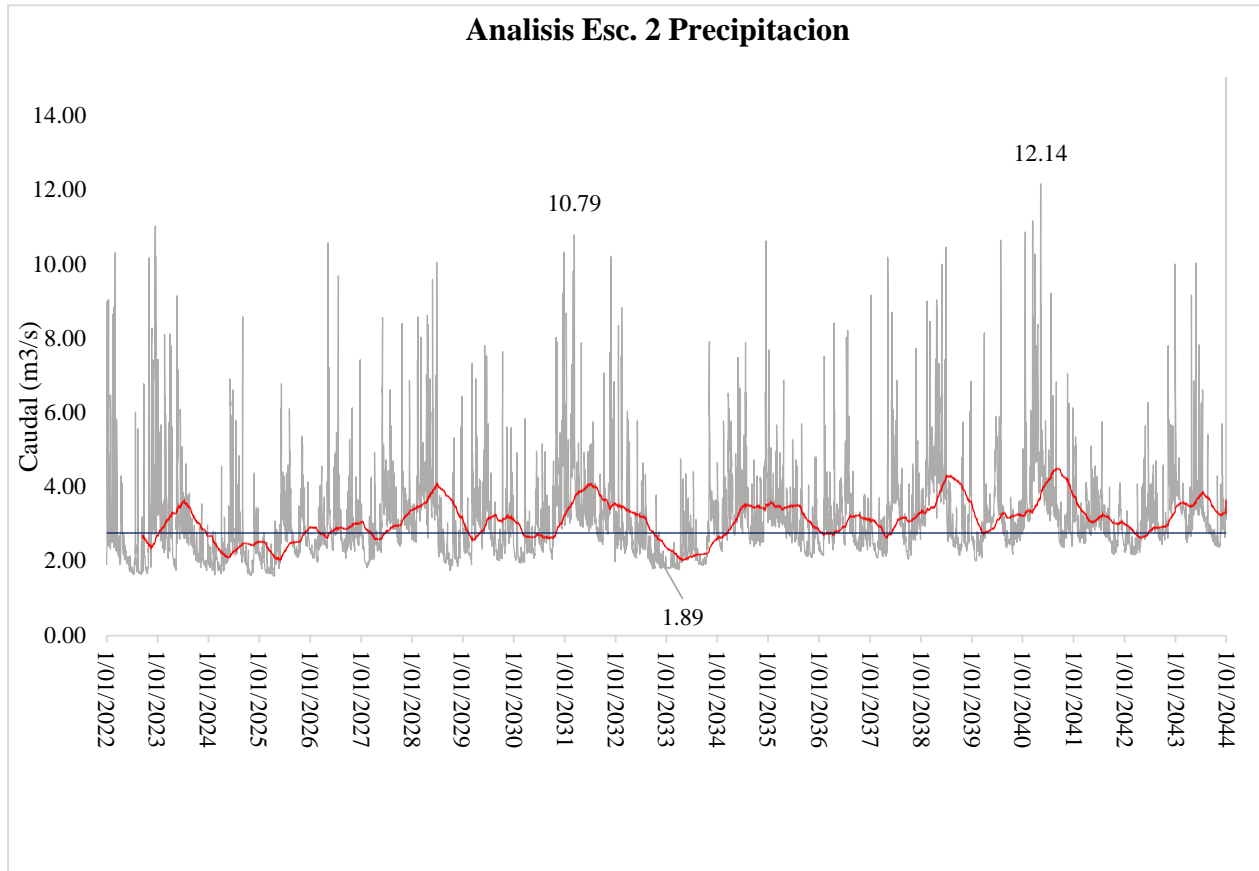


Tabla 52

Oferta hídrica bajo escenarios de variabilidad climática

Esc.	Referencia	Precip. (mm)	Variación (%)	Caudal medio (m³/s)	Coefficiente de esc. (%)
Base	1999-2021	11273.95	-	1.40	50
ESC.1	2022-2032	11138.66	-0.61	1.38	48.74
	2032-2042	11071.02		1.37	47.99
ESC.2	2022-2032	11527.61	+1.71	2.25	54.25
	2032-2042	11724.90		3.12	57.89

En los escenarios de variabilidad climática, tanto en el escenario 1 (Esc.1) como en el Escenario 2 (Esc.2), se han registrado picos de caudal más frecuentes, llegando a un máximo de 12.14 m³/s.

Sin embargo, es crucial destacar que estos picos muestran coherencia entre sí durante el período de modelación, especialmente en los picos de menor magnitud. Esto sugiere que, a pesar de los aumentos de temperatura registrados en ciertos períodos, el caudal no se ha visto significativamente afectado, ya que las reducciones son ligeras en comparación con el caudal base.

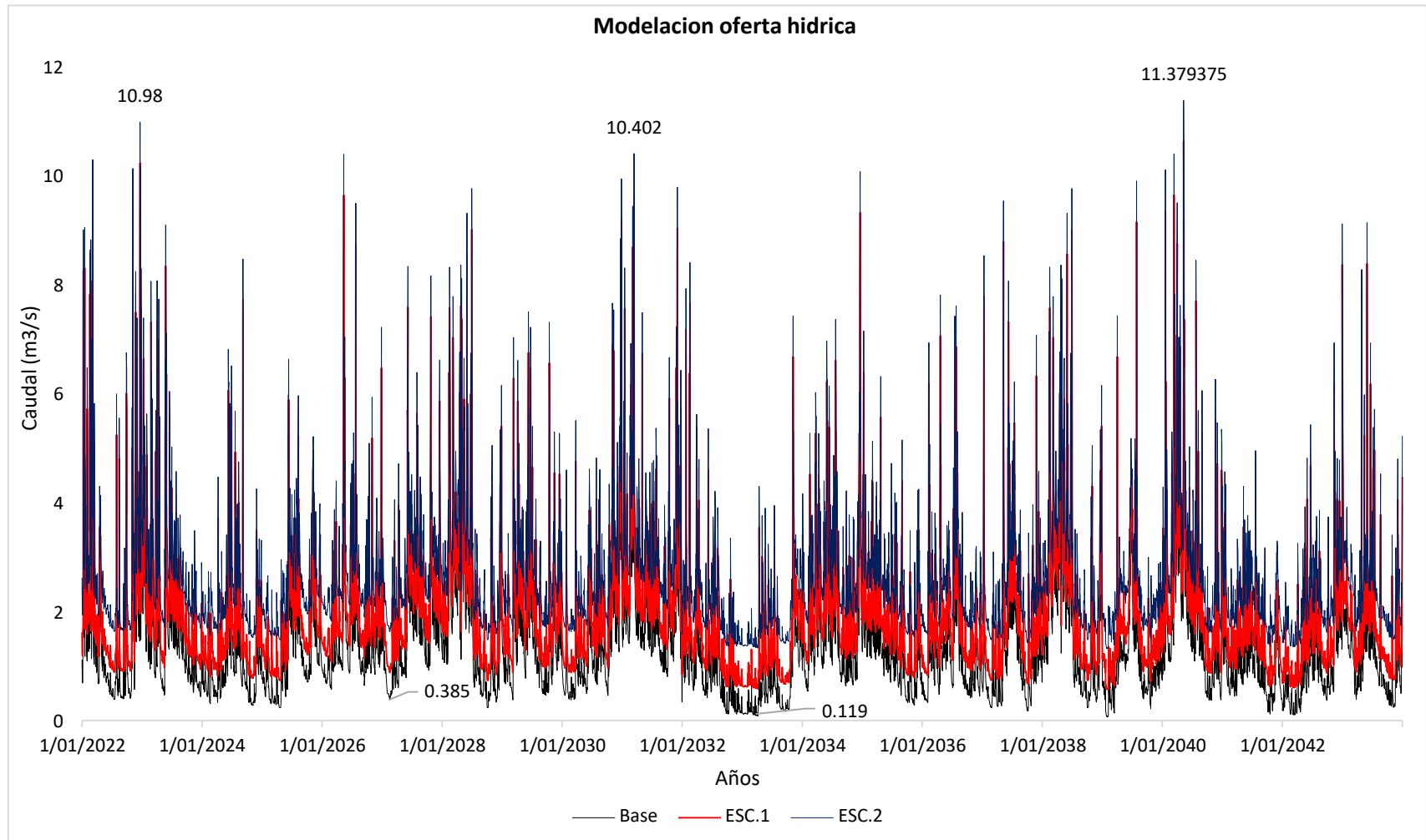
Esta coherencia en los patrones de caudal indica cierta estabilidad en el comportamiento hidrológico de la microcuenca, incluso en condiciones de variabilidad climática. Estos hallazgos son indicativos de una resistencia relativa del sistema hidrológico, lo que implica que la microcuenca puede manejar fluctuaciones climáticas dentro de ciertos límites sin experimentar cambios drásticos en los flujos de agua.

En el escenario 1 (Esc.1) durante el período de 2022-2032, la microcuenca experimentó una precipitación significativa de 11138.66 mm, que disminuyó ligeramente en un 0.61% en el período de 2032-2042, alcanzando 11071.02 mm. Por otro lado, en el escenario 2 (Esc.2) en el mismo período inicial, la microcuenca experimentó una precipitación más alta de 11527.61 mm, que aumentó en un 1.71% en el período de 2032-2042, llegando a 11724.90 mm en relación con la simulación base.

Este análisis evidencia una variabilidad notable en los patrones de precipitación entre los dos escenarios y a lo largo de las dos décadas analizadas, además, se observa una disminución en el caudal durante ambas décadas del Escenario 1 (Esc1), siendo de 1.38 m³/s en la primera y 1.37 m³/s en la segunda, lo que representa una reducción del 3% en comparación con el caudal base. Por otro lado, en el Escenario 2 (Esc.2) durante los períodos de 2022-2032 y 2032-2042, se registran caudales medios de 2.25 m³/s y 3.15 m³/s respectivamente, lo que indica un aumento considerable del caudal en el Escenario 2 de aproximadamente un 1.71%.

Figura 67

Modelación comparativa oferta hídrica



3. Conclusiones

A partir de los respectivos análisis y estudios, se extrajeron las siguientes conclusiones

En el ámbito social de la microcuenca hidrológica, se observa una problemática compleja que va más allá de la simple demanda actual del recurso hídrico, la interacción entre la comunidad y su entorno se ve directamente afectada por las prácticas económicas, especialmente la agricultura y la ganadería, que tienen un impacto significativo en la disponibilidad de agua en la microcuenca, las actividades agrícolas y el consumo de agua por el ganado pueden disminuir el flujo hídrico, agotando tanto las fuentes de agua superficiales como las subterráneas.

En la actualidad, el 20% del área de la microcuenca hidrológica, equivalente a 1.38 km², se destina a tierras cultivables, mientras que el 71%, correspondiente a 4.88 km², está cubierto por bosques, según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), se ha registrado un aumento del 2.18% en la expansión de la frontera agrícola en los últimos cinco años, hasta el año 2018, el 17.82% del área, es decir, 1.23 km², se utilizaba para la agricultura, esta expansión agrícola ha llevado a una pérdida significativa de la cobertura forestal, lo cual indica que el área del bosque ha disminuido en un 2.13%, pasando de 5.1 km² a 4.98 km².

Estas prácticas intensivas de uso del suelo son responsables del avance alarmante de la deforestación en la zona, como resultado, se han formado áreas de parches sin fines productivos, como se ha observado en el trabajo de campo, estas actividades pecuarias se concentran especialmente en la parte media de la microcuenca Dolores, agravando aún más la pérdida de cobertura forestal y afectando negativamente el equilibrio hídrico del área.

En cuanto a la caracterización hidrológica se determina que esta tiene un área de 6.85 km² y una longitud de cauce de 4.15 km, los parámetros físicos como el factor de forma (0.40), el índice de circularidad (0.72) y el índice de compacidad (1.17) proporcionan que el factor de forma relativamente bajo indica que la cuenca tiene una forma alargada, mientras que los valores de los índices de circularidad y compacidad sugieren cierta eficiencia en la disposición del flujo de agua dentro de la microcuenca., lo que indica que la cuenca genera flujos de agua de tamaño mediano

en condiciones normales, es decir es susceptible a inundaciones especialmente en la parte más baja de su relieve topográfico.

De acuerdo a su caracterización climática se establecen en el periodo de 1999- 2021 la precipitación media es de 97.66 mm y una temperatura media de 12.91 °C registrados por la estación Botana lo cual refleja las condiciones climáticas en el área, de la microcuenca.

El análisis del escurrimiento superficial en el cauce principal de la microcuenca indica un flujo de agua actual de 0.339 m³/s, esta cifra refleja la cantidad de agua que fluye por la superficie de la microcuenca, siendo el resultado de las precipitaciones y la limitada absorción del agua en el suelo. Este dato es esencial para compararlo con las proyecciones climáticas futuras. Además, se ha registrado un caudal máximo de 8.9 m³/s en un período de veintidós años, indicando episodios de precipitaciones intensas que pueden resultar en inundaciones en la zona de estudio.

Durante el proceso de calibración y validación del modelo en la microcuenca Dolores, se obtuvieron valores de coeficiente de determinación R² de 0.52 y 0.68 respectivamente, en comparación, el estudio titulado "Modelación hidrológica de la microcuenca Quebrada de Mijitayo" logró R² de 0.72 y 0.71, lo cual se considera satisfactorio y aceptable para la validación estadística que evalúa el comportamiento hidrológico en la microcuenca, en las simulaciones, los datos calibrados y validados mostraron similitudes con los datos históricos, indicando que el modelo es adecuado para prever escenarios hidrológicos con precisión.

Un análisis detenido de los escenarios de variabilidad climática en la microcuenca revela patrones notables en los caudales y las precipitaciones, a pesar de la presencia de picos de caudal que alcanzan un máximo de 10.62 m³/s en el Escenario 1 y 12.14 m³/s en el Escenario 2, se ha observado una coherencia sorprendente en estos picos, esto sugiere cierta estabilidad en el comportamiento hidrológico de la microcuenca, incluso ante variaciones climáticas significativas, este fenómeno indica una relativa resistencia del sistema hidrológico, lo que implica que la microcuenca tiene la capacidad de tolerar cambios climáticos moderados sin experimentar alteraciones drásticas en los flujos de agua.

En relación a los escenarios simulados, el Escenario 1 de variabilidad de temperatura proyecta un aumento del 1.5% en la temperatura media durante el período de 2020 a 2043, indicando esta variación con respecto a la media registrada por IDEAM. Por otro lado, en el Escenario 2 de variabilidad de precipitación se pronostica un aumento del 25% en la precipitación media, considerando el comportamiento variable del clima relacionado con los fenómenos de El Niño y La Niña. Estos factores han generado una variación en el caudal base de la microcuenca hidrológica en el modelo hidrológico durante un período de veintidós años, que oscila entre el 1.71% y el 3%, dependiendo del fenómeno climático presente.

A lo largo de esta investigación, se han llevado a cabo exhaustivos análisis de los escenarios de variabilidad climática en la microcuenca, con un enfoque especial en los caudales y las precipitaciones, los resultados obtenidos revelan patrones notables en el comportamiento hidrológico de la microcuenca, destacando una coherencia sorprendente en los picos de caudal a pesar de las variaciones climáticas significativas, esta consistencia sugiere una relativa resistencia del sistema hidrológico, indicando que la microcuenca tiene la capacidad de tolerar cambios climáticos moderados sin sufrir alteraciones drásticas en los flujos de agua.

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que la microcuenca muestra cierta capacidad para adaptarse a los cambios climáticos moderados, como se evidencia en la relativa estabilidad en los caudales incluso ante variaciones climáticas significativas, sin embargo, la hipótesis inicial se cumple parcialmente, ya que la oferta hídrica no disminuye drásticamente, sino que experimenta variaciones moderadas en respuesta a los escenarios de variabilidad climática analizados.

4. Recomendaciones

Las recomendaciones para este trabajo de grado:

En primer lugar, promover prácticas agrícolas sostenibles que mitiguen la disminución del flujo hídrico, implicando la adopción de técnicas de agricultura de conservación, un riego eficiente y medidas para reducir la erosión del suelo, controlar la expansión agrícola emerge como otra recomendación vital; políticas que regulen esta expansión y fomenten la reforestación en áreas deforestadas son esenciales para preservar la integridad ecológica de la microcuenca.

La elaboración de un plan de gestión integral del agua el cual implique estrategias para conservar y mejorar la calidad del agua, así como políticas que controlen el consumo excesivo de agua por parte de las actividades agrícolas y ganaderas, en un contexto de variabilidad climática, el monitoreo continuo de variables clave como el caudal del cauce principal y las precipitaciones y temperatura se vuelve imperativo, estos datos en tiempo real son esenciales para una planificación efectiva y una respuesta adecuada ante eventos climáticos extremos.

Adicionalmente, la promoción de la investigación continua es esencial para entender mejor las complejidades del sistema, los modelos hidrológicos avanzados deben ser objeto de investigación constante para mejorar su precisión y comprender a fondo la respuesta hidrológica ante fenómenos climáticos.

Se subraya la necesidad de la educación y concientización, la comunidad de Mocondino y los agricultores desempeñan un papel crucial en la conservación del agua y la protección del medio ambiente, elaborar programas educativos que informen sobre prácticas sostenibles y la importancia de conservar los recursos hídricos son esenciales para crear una conciencia colectiva sobre la importancia de la gestión responsable de la microcuenca hidrológica, de acuerdo a lo anterior, la capacitación e implementación con un enfoque participativo y educativo se puede generar talleres y sesiones con la población para abordar el tema de la conservación y uso eficiente ante la adaptación a fenómenos de variabilidad climática.

Por último, para investigaciones similares en el campo del análisis de la oferta hídrica ante escenarios de variabilidad climática en cuencas hidrográficas, se recomienda ampliar el alcance geográfico y temporal de los estudios, con el fin de extender el período de estudio es crucial para discernir tendencias a largo plazo, brindando una visión más completa de la dinámica climática y su impacto en los recursos hídricos, es esencial integrar modelos climáticos e hidrológicos avanzados en la investigación, estos modelos proporcionan herramientas poderosas para prever escenarios futuros, permitiendo a los investigadores anticipar cómo el cambio climático podría influir en la disponibilidad de agua en el futuro. Además, se recomienda incorporar aspectos sociales y económicos en el estudio con el fin de comprender cómo las comunidades locales son afectadas por la variabilidad climática y cómo gestionan sus recursos hídricos en respuesta a estos desafíos brinda una perspectiva completa y contextualizada, esta comprensión más profunda puede dar una perspectiva más amplia sobre el manejo sostenible del recurso hídrico.

5. Glosario

- **ARCGIS:** Sistema de Información Geográfica, utilizado para el análisis y visualización de datos espaciales.
- **CLC:** Códigos de Modelación, utilizados para representar distintas características en modelos hidrológicos y ambientales.
- **DANE:** Departamento Administrativo Nacional de Estadística, entidad encargada de las estadísticas en Colombia.
- **DEM:** Modelo Digital del Terreno, representación digital tridimensional de la superficie terrestre.
- **ESO:** Escenario, representa una serie de condiciones hipotéticas o proyectadas para el análisis de datos.
- **IDF:** Curva Intensidad Duración Frecuencia, utilizada en hidrología para estudiar eventos de lluvia.
- **IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, entidad gubernamental encargada del monitoreo ambiental y climático en Colombia.
- **IPCC:** Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, organismo científico encargado de evaluar el cambio climático.
- **NSE:** Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe, utilizado para evaluar la precisión de modelos hidrológicos.
- **ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible, metas globales establecidas por las Naciones Unidas para abordar los desafíos ambientales, sociales y económicos.
- **OHTS:** Sistema de Observación Hidro-Terrestre, utilizado para el monitoreo de recursos hídricos y terrestres.
- **OMM:** Organización Meteorológica Mundial, organismo internacional encargado de la cooperación en meteorología, climatología, hidrología y campos relacionados.
- **PBIAS:** Sesgo de Precipitación, diferencia entre la precipitación observada y la simulada en un modelo hidrológico.
- **R2:** Coeficiente de Determinación, utilizado para evaluar la calidad de ajuste de un modelo estadístico.
- **RCP:** Rutas de Concentración Concentrada, escenarios de emisiones futuras utilizados en modelos climáticos.

- RCP 4.5: Escenario de RCP con concentración de CO₂ de 4.5 vatios por metro cuadrado, indicando un futuro menos intensivo en carbono.
- RCP 8.5: Escenario de RCP con concentración de CO₂ de 8.5 vatios por metro cuadrado, indicando un futuro más intensivo en carbono.
- SWAT: Herramienta de Evaluación de Cuencas Hidrográficas (Soil and Water Assessment Tool), utilizado para modelar procesos hidrológicos y de contaminación en cuencas.
- UTM: Coordenadas Universales Transversales de Mercator, sistema de coordenadas utilizado para ubicar puntos en la Tierra.
- WEAP: Water Evaluation and Planning System, software utilizado para la planificación y gestión del agua.

Referencias bibliográficas

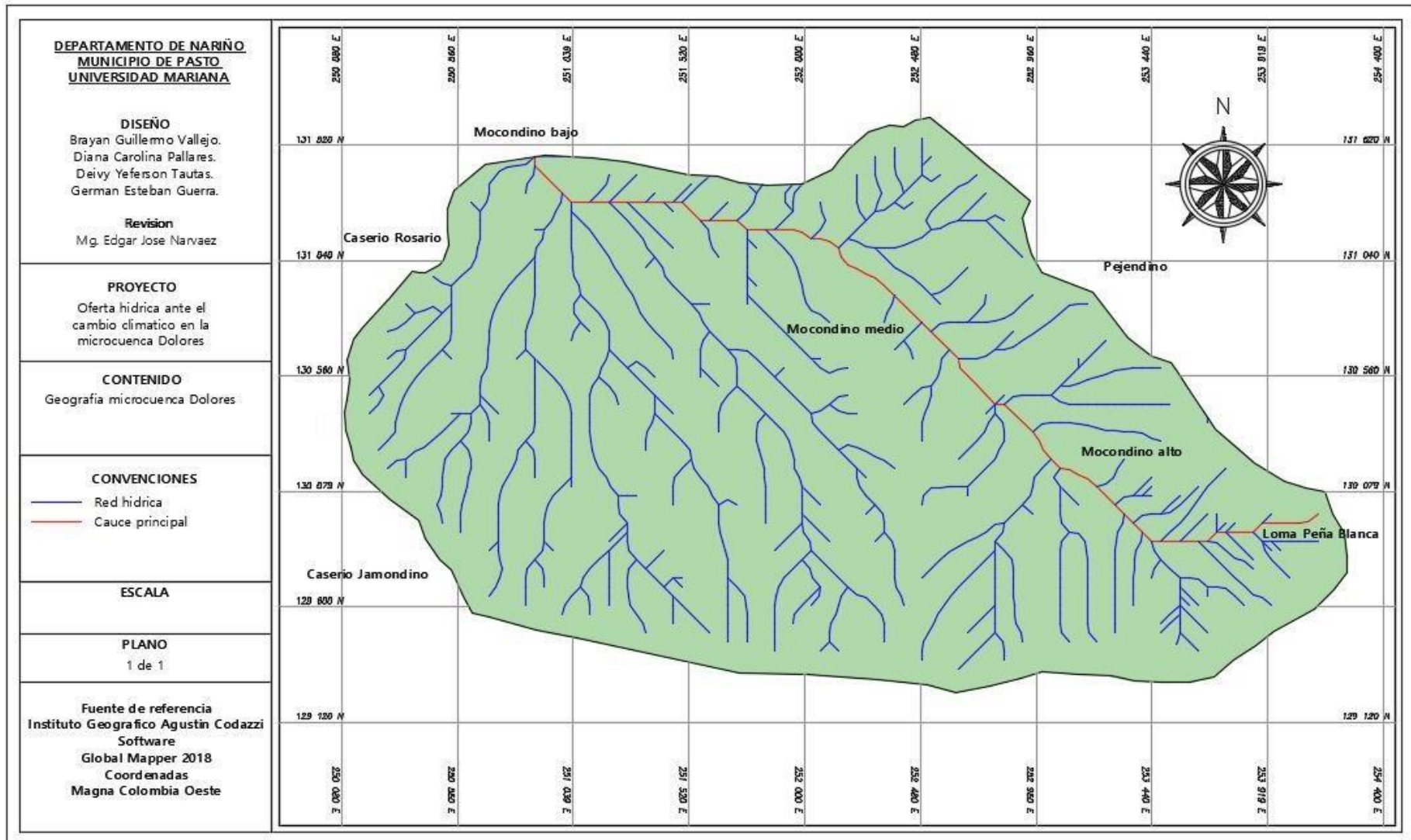
- Aguirre, N. (2007). Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas. Universidad Nacional de Loja.
- Alvarado, A., Lizárraga-Mendiola, L., & Valdez, M. (2019). Hydrological modeling of the San Pedro River basin under different climate scenarios. *Water*, 11(11), 2370.
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2013). The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology*, 486, 351-364.
- Barros, V. (2004). Cambio climático global. Libros del zorzal.
- Bejean, M. V. (2004). Gestión Sostenible de Cuencas Hidrológicas: Un Enfoque Integrado. Editorial Acqua.
- Béjar, M. V. (2004). Hidrología. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Bürger, G., & Shrestha, D. L. (2018). Integrated hydrological modeling to assess impacts of climate change on the hydrology of a Himalayan river basin. *Water*, 10(4), 427.
- Castillo García, C. L., & Carvajal González, V. M. (2023). Modelación hidrológica de la cuenca urbana del río Bélico en la ciudad de Santa Clara, Cuba.
- Castañeda Morales, Y. (2017). Modelación del efecto del cambio de uso del Suelo en la cuenca del Río Coello, bajo escenario de Cambio Climático, a través de la aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool).
- Cherkauer, K. A., & Bowling, L. C. (2001). Hydrologic impacts of projected future climate change in the Lake Michigan region. *Journal of Great Lakes Research*, 27(3), 361-375.
- CLIMATICO, S. E. C. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Collischonn, W., & Tucci, C. E. (2001). Daily hydrological modeling in the Amazon basin using basin-scale evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 245(1-4), 78-92.

- De Miguel, Á., Lado, J. J., Martínez, V., Leal, M., & García, R. (2009). El ciclo hidrológico: Experiencias prácticas para su comprensión. The water cycle: Practical experiences for its comprehension. Enseñanzas de la tierra.
- Diaz Polania, L. F., Diaz Rojas, L. M., & Patarroyo Hernandez, L. M. (2017). Impactos ambientales asociados al cambio climático en los recursos hídricos de la región andina colombiana, durante el periodo 2010–2016.
- Domínguez, E. A. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2013). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. AUGM DOMUS.
- García, M. C., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F. A., & Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. Revista de Ingeniería, (36). Universidad de los Andes. Bogotá D.C.
- Handbook of Applied Hydrology. (2002). Maidment, D. R. McGraw-Hill Education.
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., ... & Wada, Y. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (2010). Estudio Nacional del Agua. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (2012). Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo. Bogotá: Autor.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (2013a). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (2013b). Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM, Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C., 2015. 496 páginas.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - Universidad Nacional sede Medellín. (2012b). Zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:100.000 para el territorio nacional. Medellín.

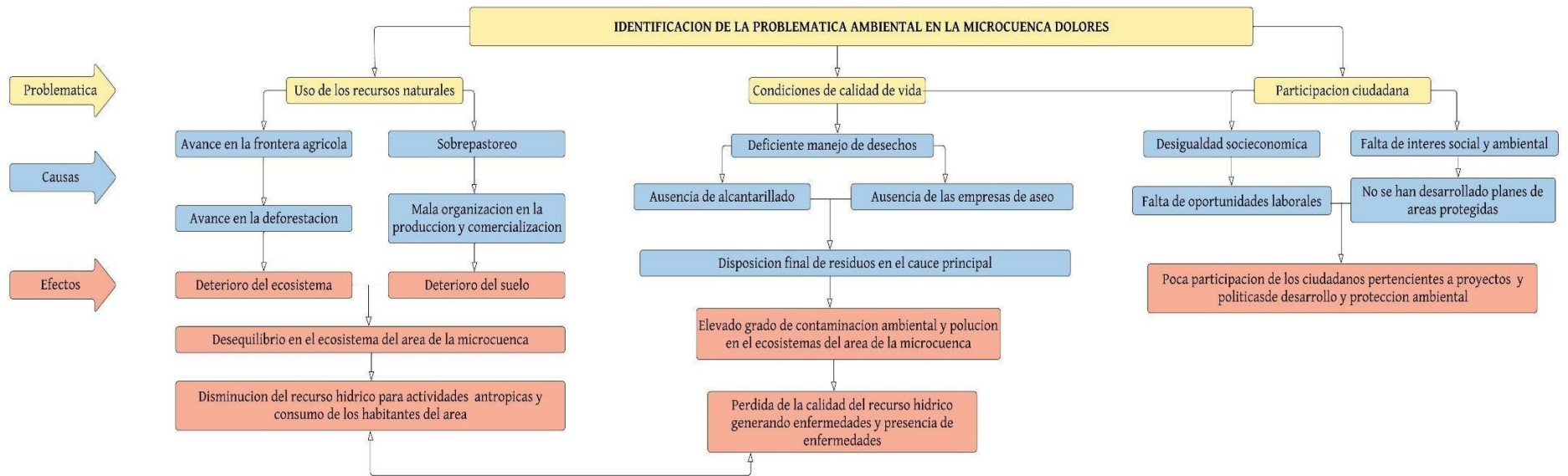
- IDEAM, I. (2015). Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales. Documento Síntesis.
- IPCC. (2014b). Informe Especial sobre Cambio Climático y Eventos Extremos. En Evaluación de los Impactos del Cambio Climático. IPCC.
- Johnson, A., Smith, B., & García, C. (2018). Parámetros de forma en cuencas hidrográficas: una revisión integral. *Revista de Hidrología*.
- López Cadenas de Llano F & Mintegui Aguirre JA. 1987. Hidrología de superficie. Editorial Salazar. Escuela de Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid, España.
- Nelson, P., René, W., Antonio, T. L. L., & Villa, G. (2019). Modelación hidrológica en la cuenca del río Chambo (sector cebadas) aplicando los modelos de simulación ARCGIS E HYDRO-BID (Bachelor's thesis, Universidad Nacional de Chimborazo, 2019).
- Ortega-gaucin, D. (2012). Hidrometría básica aplicada a la operación de distritos y unidades de riego. INSTITUTO DEL AGUA DE NL.
- Patton P. 1998. Drainage basin morphometry and floods. P 51-64 En: Baker V, Kochel C & P Patton (eds) Flood geomorphology. John Wiley & Sons.
- Ramakrishna, K. (1997). Clima, Relieve y Cuenca Hidrográfica: Interacciones y Desafíos. Editorial HydroPress.
- Racca JMG. 2007. Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología. Rosario, Argentina.
- Rodríguez, M. A. (2015). Metodología de la Investigación Socioeconómica: Enfoques y Técnicas. Editorial Académica.
- Smith, J. (2010). Geomorfología de Cuencas Hidrológicas. Editorial Académica.
- Smith, A., & Johnson, B. (2017). Aplicaciones del modelo hidrológico WEAP en la gestión del agua. *Revista de Recursos Hídricos*, 42(3), 215-230.
- Savenije, H. H., & Van der Zaag, P. (2008). Integrated water resources management: Concepts and issues. *Physics and Chemistry of the Earth*.
- Strahler, A. N. (1989). Dinámica Fluvial y Formación de Cuencas: Un Análisis Geomorfológico.
- Maidment, D. R. (2002). Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill Education.

ANEXOS

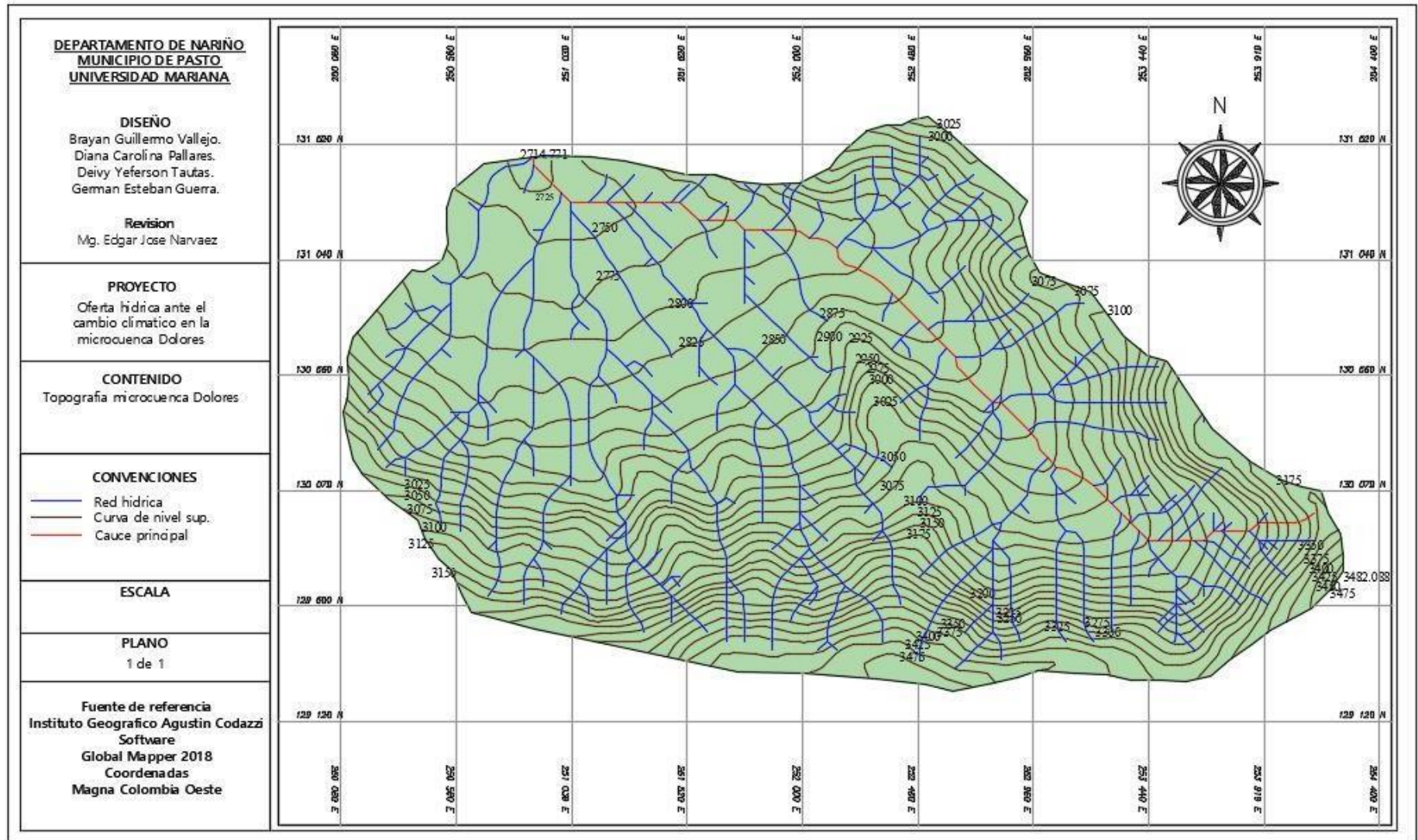
Anexo A. Ubicación y límites geográficos microcuenca Dolores

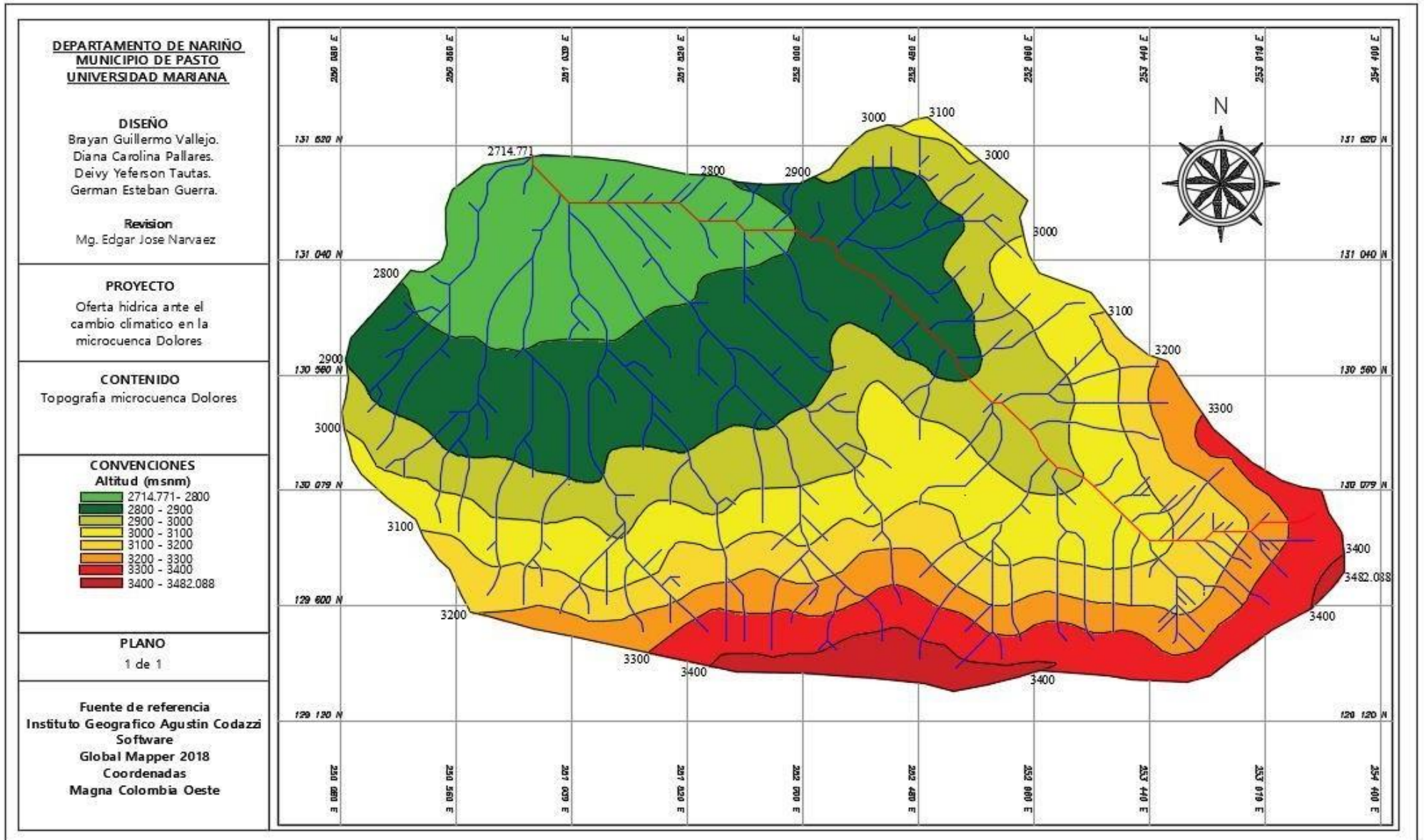


Anexo B. Mapa conceptual sobre la problemática ambiental

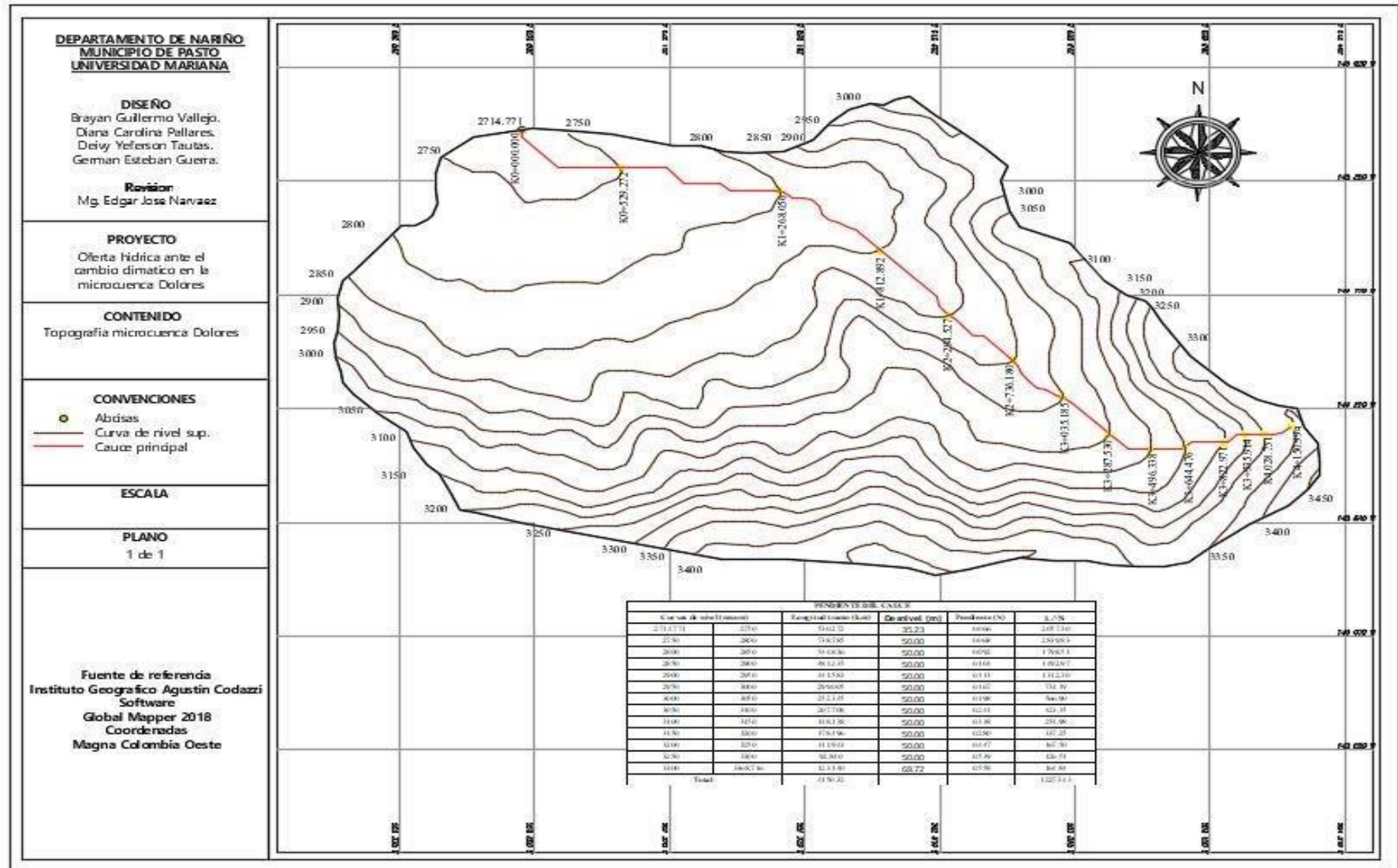


Anexo C. Mapa topográfico microcuenca Dolores.

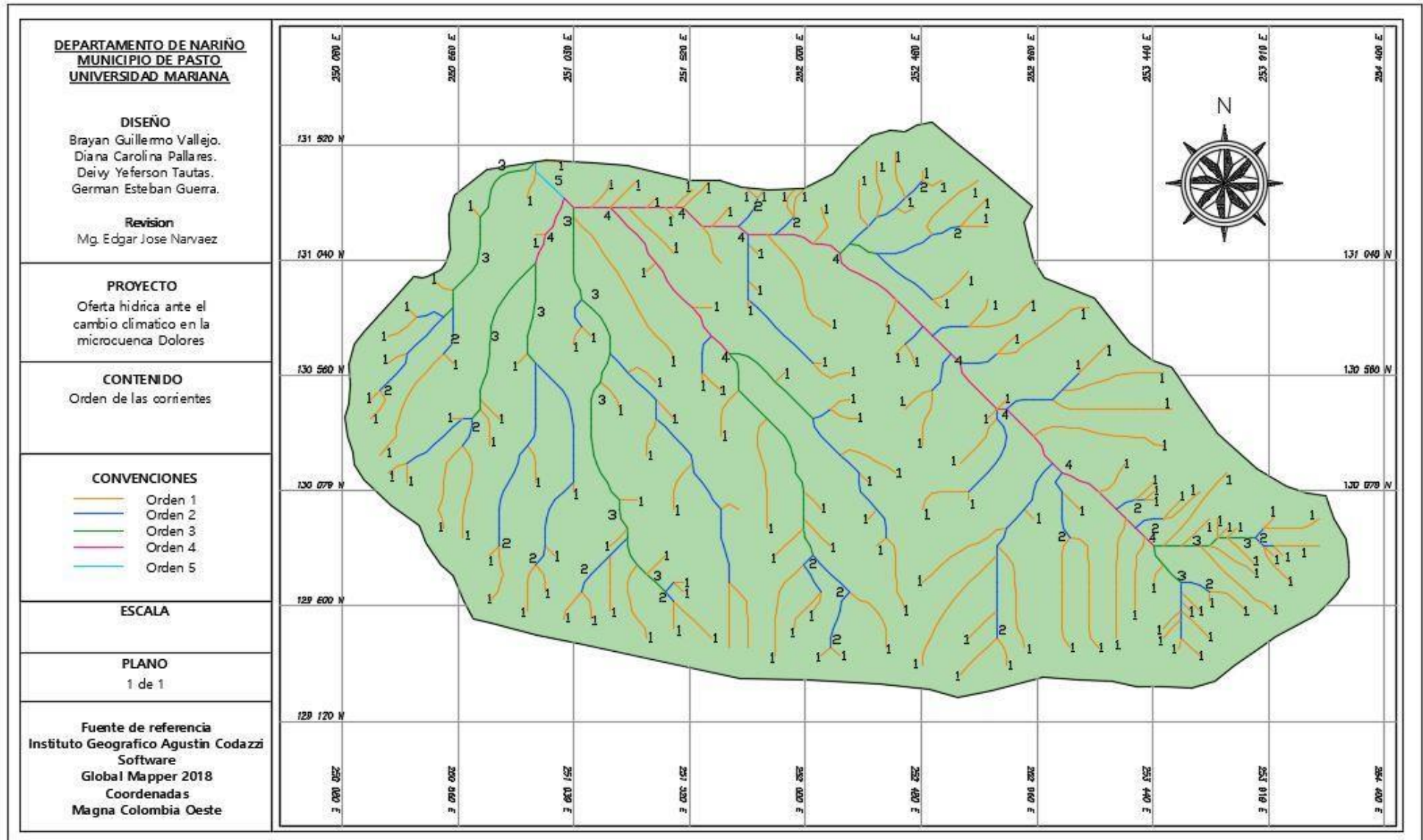




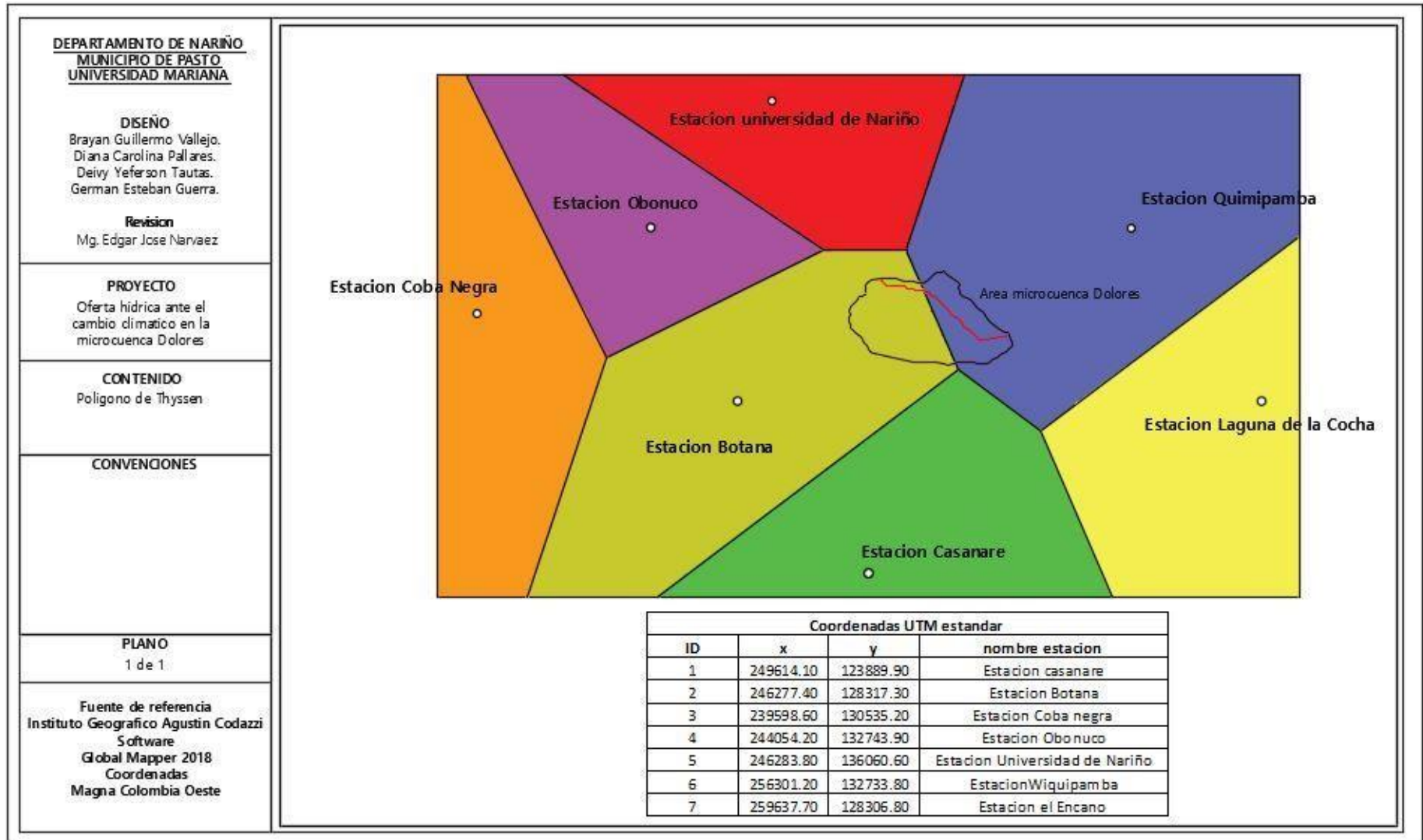
Anexo D. Pendiente del cauce principal



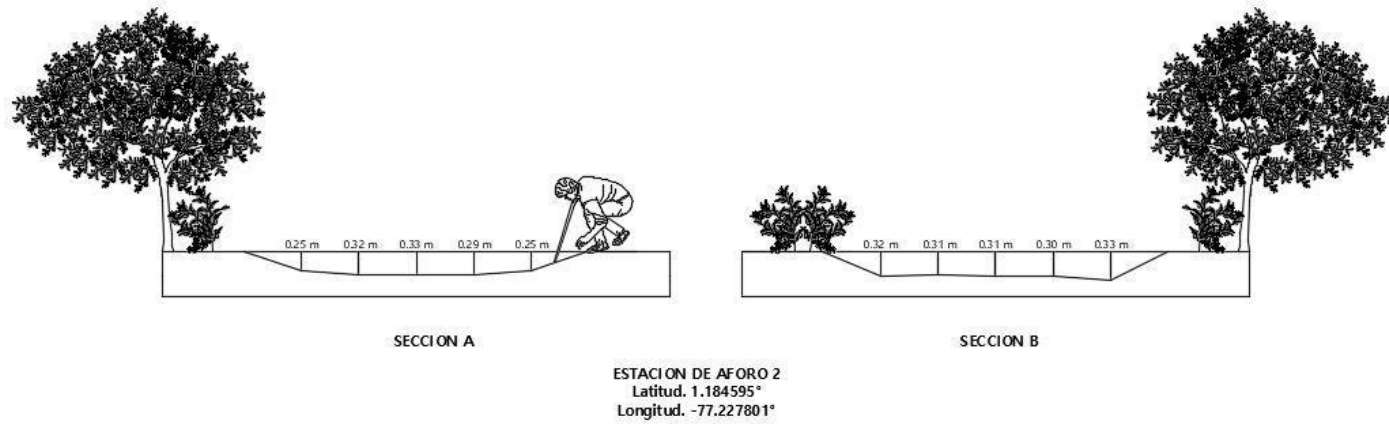
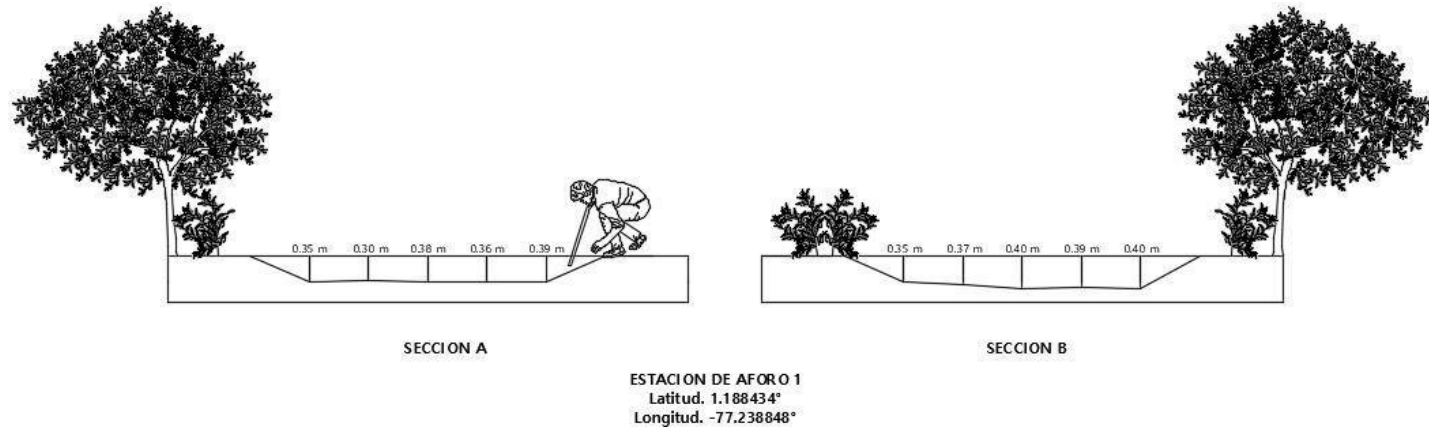
Anexo E. Orden de las corrientes hidrológicas microcuenca Dolores.

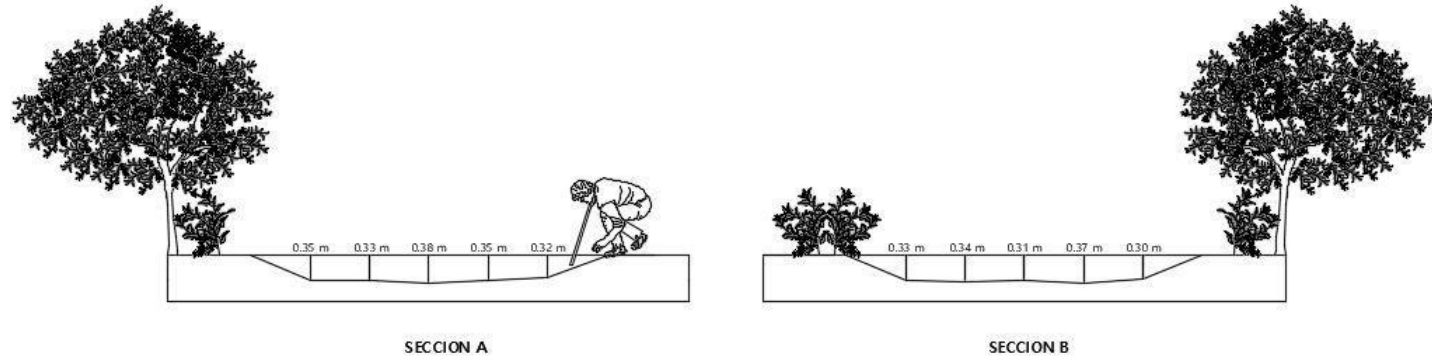


Anexo F. Polígono de Thyssen Estación Botana



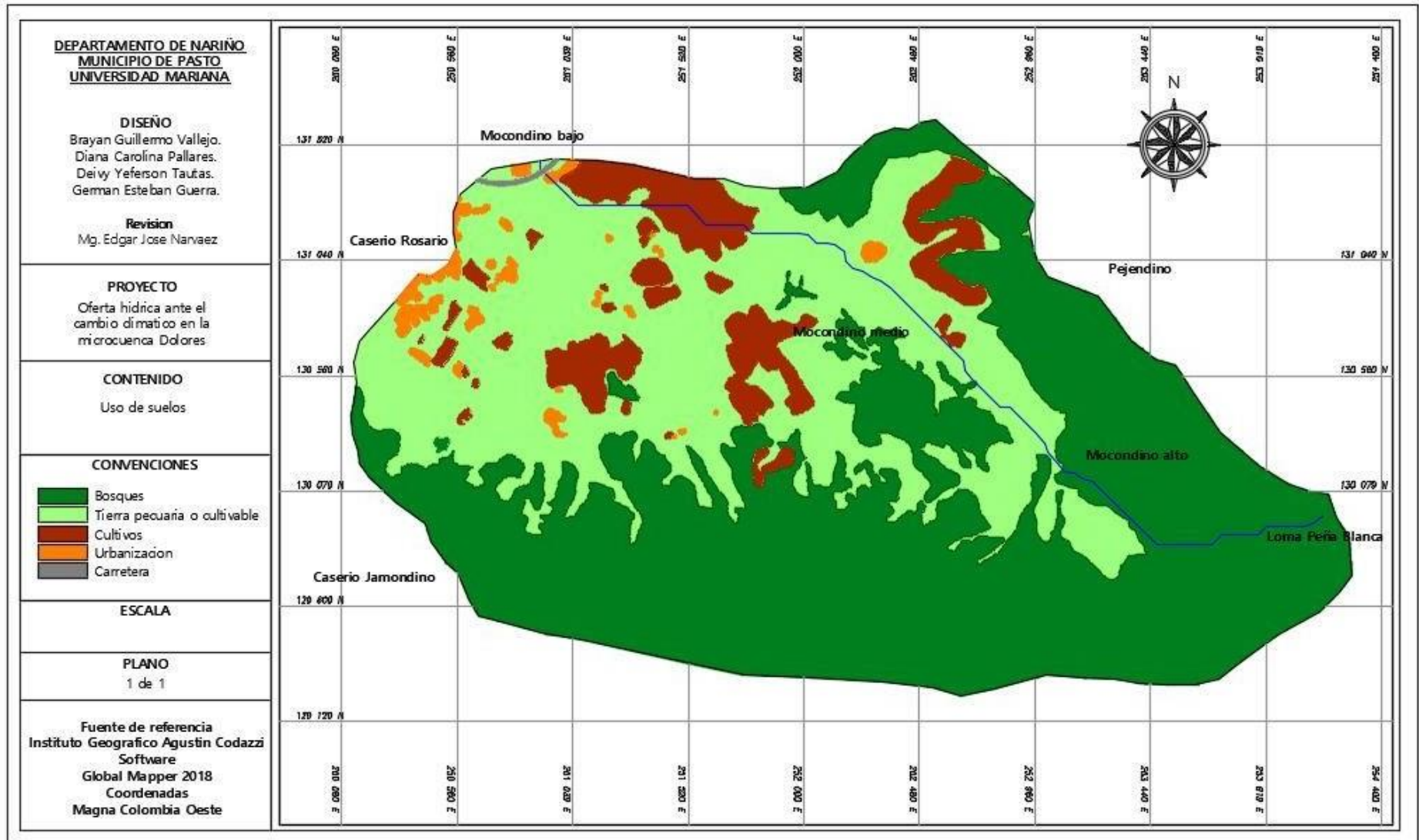
Anexo G. Perfil transversal de las estaciones de aforo



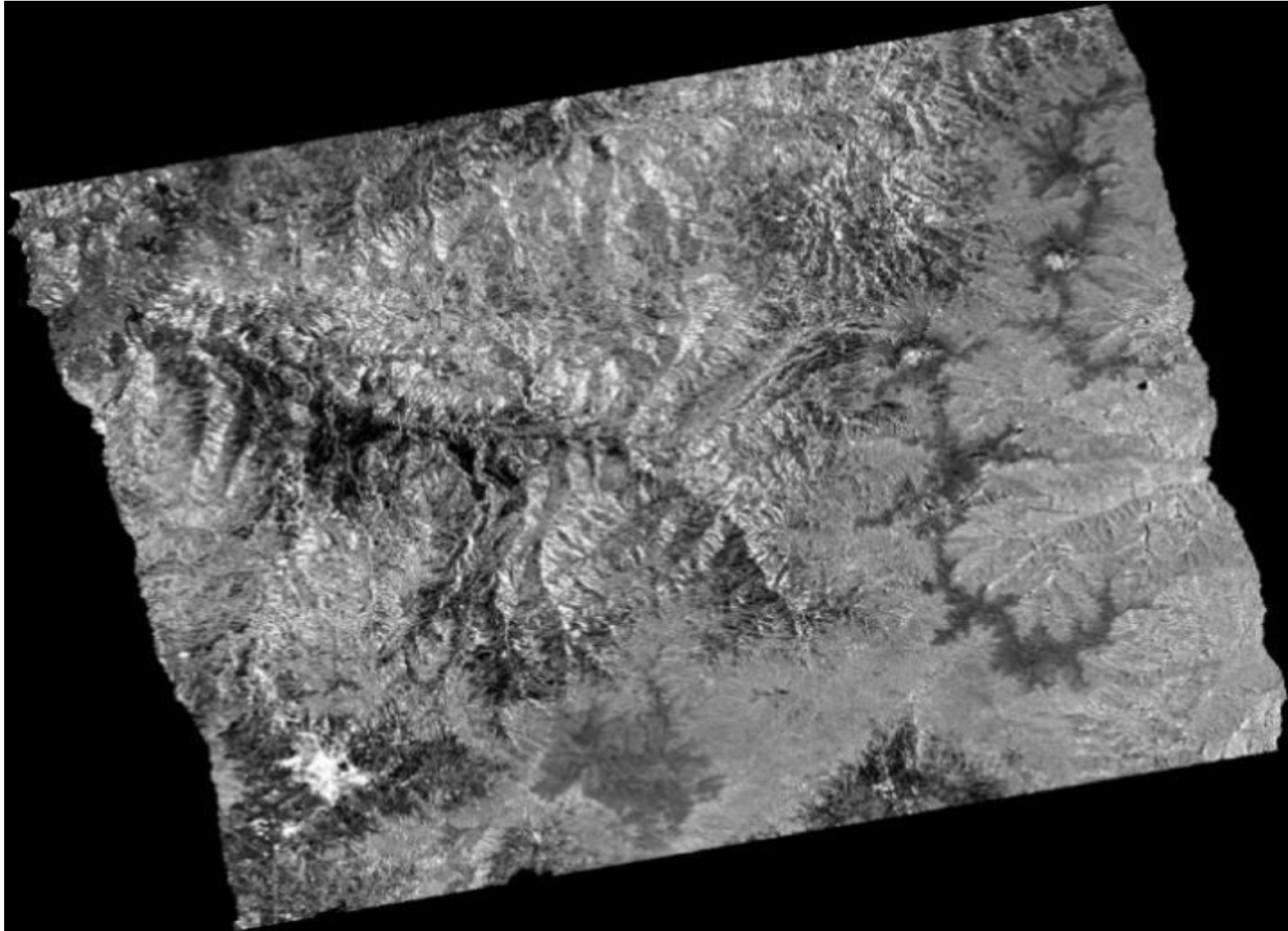


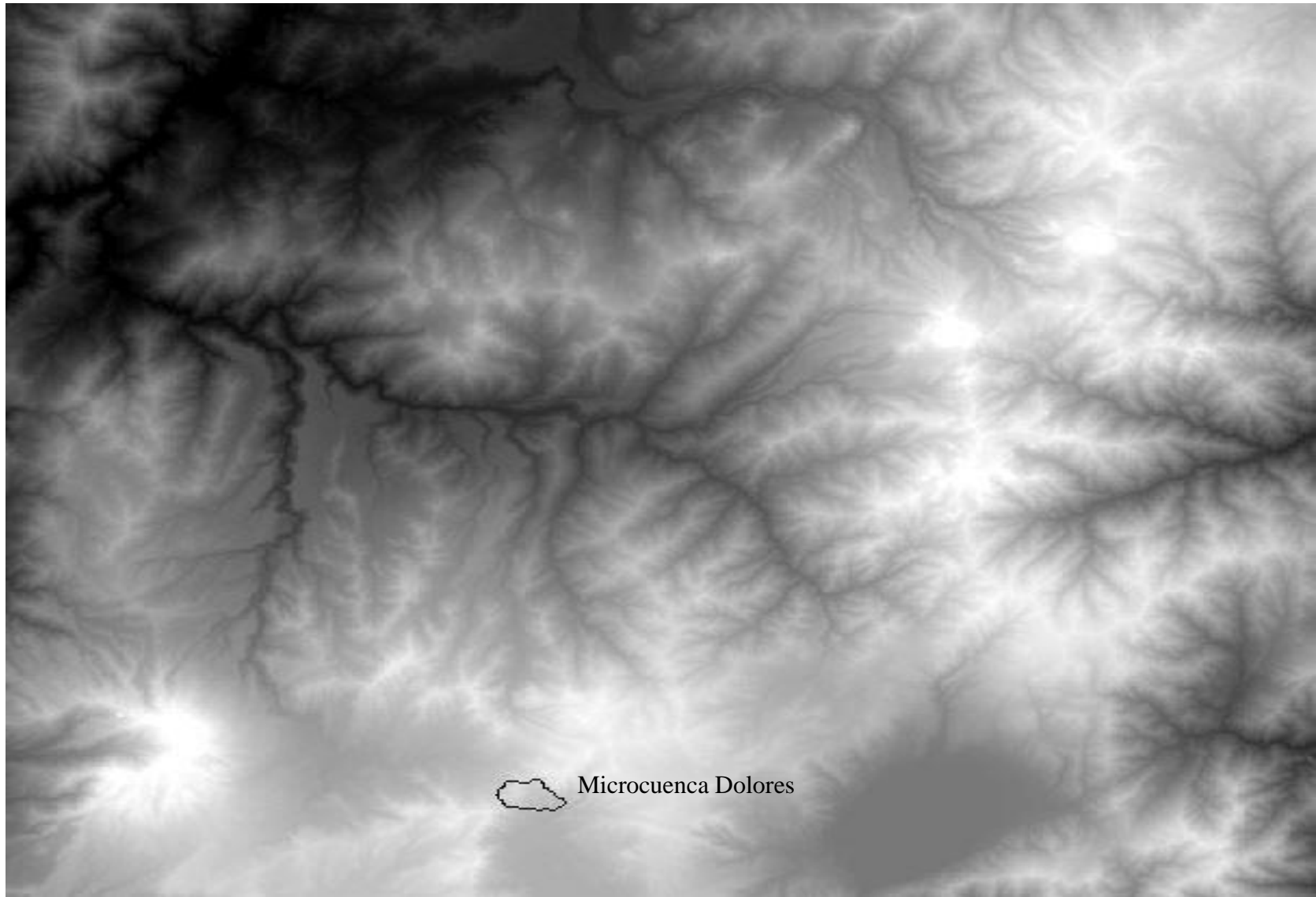
ESTACION DE AFORO 3
Latitud. 1.179284°
Longitud. -77.228678°

Anexo H. Uso de suelos área microcuenca



Anexo I. Imagen satelital Shp. Microcuenca Dolores





Anexo J. Modelo climático ArcGIS

