

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil


### **Análisis comparativo de los factores determinantes en la susceptibilidad geodinámica de dos microcuencas en el sector Marianza**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil


#### **Autores:**


José Luis Chaca Cordero  
Juan Alexander Rea Avila

#### **Director:**

Vladimiro Alexis Tobar Solano  
ORCID:  0000-0003-0541-0095

#### **Codirectores:**

Aleksandr Khachatryan  
ORCID:  0000-0001-8819-7095

Marco Tulio Ramírez Matamoros  
ORCID:  0000-0002-2253-456X

**Cuenca, Ecuador**

2023-08-04

## Resumen

En marzo de 2022 un flujo de detritos en la parroquia Sayausí-Cuenca causó daños en infraestructuras y pérdida de vidas humanas. Este evento evidenció la necesidad de comprender los factores que contribuyeron a su ocurrencia. Esta investigación se centró en determinar estos factores y evaluar la susceptibilidad de dos microcuencas frente a la ocurrencia de flujos de detritos en el sector Marianza. Se realizaron actividades de caracterización geológica, geomorfológica, clasificación de suelos, análisis de precipitaciones, modelación lluvia-escorrentía y mapeo de susceptibilidad de flujos de detritos utilizando la metodología RES. Los resultados revelaron la acumulación de material compuesto por grava, arena y limo arcilloso en las partes superiores de las microcuencas con alta capacidad de flujo en estado saturado. También se identificó la existencia de un manto superficial rocoso con baja permeabilidad y superficies cóncavas en las partes altas. Además, se observó la pérdida de cobertura vegetal y expansión de la frontera agrícola. Marzo de 2022 fue el mes más lluvioso en 19 años, con una intensidad máxima de 42 mm/h y un periodo de retorno de 30 años. Los modelos de lluvia-escorrentía indicaron caudales superiores a los 250 L/s en las partes altas de las microcuencas. Este estudio proporcionó información sobre los factores determinantes en la ocurrencia de flujos de detritos y la susceptibilidad de las microcuencas en el sector Marianza, que puede ser útil para la implementación de medidas de prevención y gestión de riesgos en el futuro. Las discusiones y conclusiones detalladas se presentan en secciones posteriores de este trabajo de investigación.

*Palabras clave:* flujo de detritos, microcuencas, vulnerabilidad, modelación hidrológica, riesgos naturales



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

In March 2022, a debris flow in the Sayausí-Cuenca parish caused damage to infrastructure and loss of human lives. This event highlighted the need to understand the contributing factors to its occurrence. This research focused on determining these factors and assessing the susceptibility of two micro-watersheds to debris flow in the Marianza sector. Activities included geological and geomorphological characterization, soil classification, analysis of precipitation, rainfall-runoff modeling, and mapping of debris flow susceptibility using the RES methodology. The results revealed the accumulation of material composed of gravel, sand, and clayey silt in the upper parts of the micro-watersheds with a high capacity to flow in a saturated state. The presence of a shallow rocky layer with low permeability and concave surfaces in the upper areas was also identified. Furthermore, there was evidence of loss of vegetative cover and expansion of agricultural activities. March 2022 was the rainiest month in 19 years, with a maximum intensity of 42 mm/h and a return period of 30 years. Rainfall-runoff models indicated flow rates exceeding 250 L/s in the upper parts of the micro-watersheds. This study provided valuable information on the determining factors for debris flow occurrence and the susceptibility of micro-watersheds in the Marianza sector, which could aid in the implementation of prevention and risk management measures in the future. Detailed discussions and conclusions are presented in subsequent sections of this research work.

*Key Words:* debris flow, watersheds, vulnerability, hydrological modeling, natural hazards.



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

**Acrónimos**

ASTM American Society of Testing Materials

ESQ Expert-Semi Quantitative

GIS Sistemas de información geográfica

HSG Grupo hidrológico del suelo

MTOP Ministerio de Transporte y Obras Públicas

NRCS National Resources Conservation Service

RES Rock Engineering Systems

SCS Soil Conservation Service

VANT Vehículo aéreo no tripulado

## Símbolos

$a_i$	Parámetro de contribución al desencadenamiento de flujos de detritos
$A$	Área de la cuenca en Km <sup>2</sup>
$C$	Causa metodología RES
$CN$	Número de curva
$D_i$	Precipitación registrada en una estación
$D_n$	Máxima distancia entre dos funciones de distribución acumulada
$D_{n,\alpha}$	Estadístico Test Kolmogórov-Smirnov
$DfPI$	Índice de propensión a flujo de detritos
$E$	Efecto metodología RES
$F_a$	Abstracción continuada
$F_f$	Factor de forma
$F(x)$	Probabilidad de no excedencia
$H$	Relieve relativo
$I$	Datos de caudal de entrada
$I_a$	Abstracciones iniciales antes el encharcamiento
$IL$	Índice líquido
$IMA$	Índice de actividad aproximado
$IP$	Índice plástico
$I_p$	Índice de pendiente
$K$	Factor de proporcionalidad
$K_c$	Índice de compacidad
$L$	Longitud del cauce principal
$LL$	Límite líquido
$L_{mayor}$	Lado mayor del rectángulo Equivalente

$L_{menor}$	Lado menor del rectángulo equivalente
$LP$	Límite plástico
$Lu$	Longitud total de arroyos
$m$	Posición de un valor en una lista ordenada de magnitud decreciente
$n$	Número total de valores de la muestra
$Nu$	Número de arroyos
$P$	Perímetro de la cuenca en Km
$P_e$	Cantidad de escorrentía directa
$P_i$	Distancia entre la estación y el punto no pluviométrico
$P_{ik}$	Peso asignado a un factor predisponente a la ocurrencia de flujo de detritos
$q_p$	Caudal hidrograma unitario sintético del SCS
$Q$	Datos de Caudal de salida
$R$	Precipitación para un punto no pluviométrico
$R_c$	Índice de circularidad
$R_e$	Índice de Elongación
$s$	Pendiente promedio de una cuenca
$S$	Retención potencial
$S_a$	Volumen de almacenamiento total
$T$	Periodo de retorno
$T_c$	Tiempo de concentración
$T_p$	Tiempo de retardo
$t_p$	Lag-time
$u$	Orden jerárquico de la red hídrica
$w$	Humedad natural
$X$	Factor de ponderación

- $x$  Variable aleatoria
- $\mu$  Ubicación o media de la distribución
- $\bar{x}$  Media aritmética muestral

## Índice de contenido

<b>Resumen.....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>Índice de contenidos .....</b>	<b>8</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>13</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>18</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>20</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>22</b>
<b>Capítulo 1 Introducción .....</b>	<b>23</b>
1.1    Antecedentes .....	23
1.2    Problemática y justificación.....	26
1.3    Preguntas de Investigación.....	27
1.4    Objetivos .....	28
1.4.1    Objetivo General.....	28
1.4.2    Objetivos Específicos.....	28
1.5    Organización de los capítulos.....	28
<b>Capítulo 2 Marco Teórico .....</b>	<b>30</b>
2.1    Parroquia Sayausí .....	30
2.1.1    Clima e hidrología.....	30
2.1.2    Cobertura vegetal y actividades antrópicas.....	30
2.1.3    Actividad de movimientos geodinámicos .....	31
2.2    Caracterización Geológica .....	32
2.3    Caracterización Geomorfológica .....	32
2.3.1    Procesos geomórficos.....	33
2.3.2    Relieve del terreno.....	33
2.3.3    Morfometría .....	34
2.3.4    Generación geomórfica.....	35
2.4    Caracterización de Suelo .....	36
2.4.1    Humedad Natural .....	36
2.4.2    Granulometría y Límites de Atterberg .....	36
2.4.3    Clasificación de Suelos .....	37
2.5    Análisis de eventos extremos.....	38
2.5.1    Períodos de Retorno.....	38



2.5.2	Distribución Gumbel.....	39
2.5.3	Distribución Pearson tipo III.....	40
2.5.4	Distribución Log-Pearson tipo III.....	41
2.5.5	Frecuencia teórica o posición de graficación observada .....	41
2.5.6	Test de bondad de ajuste Kolmogórov-Smirnov.....	42
2.6	Validación y ajuste de datos de precipitación.....	42
2.6.1	Curva doble masa.....	42
2.6.2	Datos faltantes.....	43
2.7	Modelación hidrológica lluvia-escorrentía .....	44
2.7.1	Exceso de precipitación y escorrentía directa .....	44
2.7.1	Transformación exceso de precipitación - escorrentía Hidrograma Adimensional SCS.....	45
2.7.2	Abstracciones Método SCS número de curva.....	46
2.7.3	Precipitación.....	52
2.7.4	Flujo Base .....	54
2.7.5	Modelo de tránsito hidrológico de ríos .....	54
2.7.6	Tiempo de Concentración ( $T_c$ ).....	55
2.7.7	Modelación mediante HEC-HMS.....	55
2.8	Mapeo de susceptibilidad de flujo de detritos mediante el método Rock Engineering Systems (RES).....	57
2.4	Resumen.....	61
<b>Capítulo 3 Materiales y Métodos .....</b>		<b>62</b>
3.1	Área de estudio .....	62
3.2	Información disponible .....	62
3.2.1	Datos de lluvia.....	63
3.2.2	Modelo Digital de Elevación (MDE) .....	64
3.2.3	Información Geológica .....	65
3.2.4	Información de cobertura vegetal y uso de suelo .....	66
3.2.5	Información de Imágenes Satelitales .....	67
3.3	Procesamiento de información en software GIS .....	67
3.4	Caracterización Geológica .....	68
3.5	Caracterización Geomorfológica .....	68
3.6	Clasificación de suelos y ensayos de Laboratorio .....	69
3.6.1	Muestreo ASTM D4220.....	69

3.6.2	Humedad Natural ASTM D-2216.....	71
3.6.3	Granulometría ASTM D422.....	71
3.6.4	Límites de Atterberg ASTM D4318.....	72
3.6.5	Clasificación de Suelos ASTM D2487.....	73
3.7	Análisis de Lluvias.....	73
3.7.1	Procesamiento de Lluvias.....	73
3.7.2	Validación de datos.....	73
3.7.3	Ajuste de Datos.....	74
3.7.4	Curva de Variación Estacional.....	75
3.7.5	Determinación de eventos extremos.....	75
3.8	Ajuste de valores extremos a funciones de distribución de probabilidad.....	76
3.9	Modelación hidrológica lluvia-escorrentía.....	76
3.9.1	Clasificación hidrológica de suelos.....	76
3.9.2	Número de Curva.....	76
3.9.3	Condiciones Antecedentes de Humedad.....	77
3.9.4	Precipitación.....	77
3.9.5	Flujo Base.....	78
3.9.6	Método de Muskingum.....	78
3.9.7	Modelamiento mediante HEC-HMS.....	79
3.10	Mapeo de susceptibilidad de flujo de detritos mediante el método Rock Engineering Systems (RES).....	80
3.11	Resumen.....	83
<b>Capítulo 4 Resultados y Discusiones.....</b>		<b>84</b>
4.1	Caracterización Geológica.....	84
4.1.1	Geología.....	84
4.1.2	Litología Superficial.....	86
4.2	Caracterización Geomorfológica.....	87
4.2.1	Procesos geomórficos.....	87
4.2.2	Relieve del terreno.....	88
4.2.3	Generación morfológica.....	88
4.2.4	Morfometría.....	89
4.2.5	Parámetros geomorfológicos obtenidos mediante SIG.....	90
4.3	Ensayos en laboratorios de suelos.....	93
4.3.1	Distribución de matriz de suelo.....	93

4.3.2	Clasificación granulométrica.....	94
4.3.3	Clasificación SUCS de suelos, límites de Atterberg, humedad natural, índice de actividad.....	95
4.4	Precipitación en el sector Marianza.....	96
4.4.1	Validación de datos.....	96
4.4.2	Hietograma Mensual del Periodo de Registro.....	99
4.4.3	Hietograma de mes de marzo 2022.....	101
4.4.4	Curva de variación estacional.....	104
4.4.5	Eventos extremos.....	106
4.5	Ajuste de lluvia extrema a funciones de distribución de probabilidad.....	108
4.6	Modelación lluvia-escorrentía de dos microcuencas.....	111
4.6.1	Grupo hidrológico del suelo y número de curva.....	111
4.6.2	Subdivisión de microcuencas.....	113
4.6.3	Condiciones antecedentes de humedad (AMC).....	113
4.6.4	Modelo de Cuenca Hidrográfica.....	114
4.6.5	Modelo meteorológico, series de tiempo y especificaciones de control.....	117
4.6.6	Hidrogramas y caudales pico.....	118
4.7	Aplicación de la metodología RES en dos microcuencas de montaña.....	125
4.8	Discusión y comparación de resultados.....	129
4.8.1	Geología.....	129
4.8.2	Geomorfología.....	132
4.8.3	Ensayos de Laboratorio.....	134
4.8.4	Precipitación.....	136
4.8.5	Lluvia extrema en el sector Marianza.....	138
4.8.6	Modelación lluvia - escorrentía.....	139
4.8.7	Cobertura vegetal y actividades antrópicas.....	141
4.8.8	Metodología RES (Mapa de susceptibilidad ante flujo de detritos).....	142
4.8.9	Descripción evento de flujo de detritos 27 de marzo del 2022.....	144
4.9	Resumen.....	146
<b>Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones.....</b>		<b>147</b>
5.1	Cumplimiento de objetivos de la investigación.....	147
5.2	Resumen de los principales hallazgos.....	147
5.3	Respuesta a la pregunta de investigación.....	149
5.4	Contribuciones, limitaciones y posibles aplicaciones de los hallazgos del	

trabajo de investigación.....149

5.5 Futuras Líneas de Investigación.....150

**Referencias Bibliográficas .....152**

### Índice de figuras

Figura 1-1. Flujo de detritos en el sector Marianza. Fuente: (Primicias 2022).....	23
Figura 1-2. Características de flujos de detritos: Fuente: (Winter et al. 2005).....	25
Figura 1-3. Movimientos Geodinámicos Identificados. Fuente: Elaboración Propia.....	26
Figura 2-1. Carta de plasticidad de Casagrande. Fuente: (Das 2019).....	38
Figura 2-2. Hidrograma de caudal durante una tormenta. Fuente:(Chow 1988).....	44
Figura 2-3. Hidrogramas unitarios sintéticos del SCS. a) Hidrograma adimensional, b) hidrograma unitario triangular. Fuente: (Chow 1988).....	46
Figura 2-4. Método SCS: P: precipitación total, la abstracciones iniciales, Fa: abstracción continuada, Pe: exceso de precipitación. Fuente: (Chow 1988).....	47
Figura 2-5. Triángulo de texturas del suelo del USDA adoptado en el conjunto de datos SoilGrids250m y el conjunto reducido de grupos hidrológicos del suelo utilizado en este estudio (Sa = arena; Lo = marga; Cl = arcilla; Si = limo). Fuente: (Wang and Feddema 2020).....	48
Figura 2-6. Curvas profundidad - área para reducir precipitación puntual para valores promedio de área. Fuente: (U. S. Weather Bureau 1958).....	53
Figura 2-7. Esquema de almacenamiento por prisma y cuña en un tramo de canal. Fuente: (Chow 1988).....	54
Figura 2-8. Parámetros principales de la matriz. Fuente: (Santander 2019).....	58
Figura 2-9. Interacción de los parámetros. Fuente: (Santander 2019).....	58
Figura 2-10. Diagrama de flujo metodología RES. Fuente: (Bonetto et al. 2021).....	59
Figura 2-11. Curvatura tangencial. A) superficie convexa, B) superficie cóncava, C) superficie plana. Fuente: (Buckley 2010).....	61
Figura 3-1. Área de estudio sector Marianza, parroquia Sayausí. WGS 84/Zona 17 S. Fuente: Elaboración Propia.....	62
Figura 3-2. Ubicación estaciones pluviométricas PROMAS parroquia Sayausí, sector Marianza. WGS 84/ Zona 17S. Fuente: Elaboración Propia.....	63
Figura 3-3. Modelo Digital Elevaciones parroquia Sayausí, sector Marianza. WGS 84/Zona 17 S. Fuente: Elaboración Propia.....	65
Figura 3-4. Mapa cobertura vegetal y uso de suelo sector Marianza, parroquia Sayausí. WGS 84/Zona 17 S. Fuente: Red Hidrometeorológica ETAPA.....	66
Figura 3-5. Interface de la Sentinel-Hub/EO Browser. Fuente: (EO Browser 2023)....	67
Figura 3-6. Interface del software QGIS (Firenze 3.28).....	68
Figura 3-7. Ubicación de las muestras de suelo tomadas en el sector Marianza, parroquia Sayausí. WGA84/Zona 17S. Fuente: Elaboración Propia.....	70

Figura 3-8. Análisis de curva doble masa para valores acumulados mensuales. Periodo Mayo/2004 – Marzo/2023. Fuente: Elaboración Propia.....	74
Figura 3-9. Influencia de la distancia de la red de drenaje en el sector Marianza, parroquia Sayausí, RES. WGS84/Zona 17S. Fuente. Elaboración Propia .....	82
Figura 4-1. Mapa geológico hoja 53 Cuenca (versión actual): Fuente: (IGM 2002) ....	84
Figura 4-2. a) Visitas y mediciones en la microcuenca Marianza. b) Afloramientos rocosos y diaclasas (diciembre 2022). Fuente: Elaboración Propia .....	85
Figura 4-3. Geología/Litología en el sector Marianza, parroquia Sayausí. WGA84/Zona 17S. Fuente: (SIGTIERRAS 2015).....	87
Figura 4-4. Valle fluvioglacial sector Marianza. Foto: Chaca, J & Rea, J. (2023) .....	88
Figura 4-5. Geomorfología microcuencas sector Marianza. Foto: Chaca, J & Rea, J. (2023) .....	89
Figura 4-6. Parámetros geomorfológicos obtenidos mediante QGIS en el sector Marianza, parroquia Sayausí. WGS84/17S.: A: Curvatura Tangencial, B Pendiente, C Clasificación Geomorfológica, D Pendiente Aspect (Orientación). Fuente: Elaboración Propia .....	91
Figura 4-7. Curva hipsométrica e histograma de altimetría de frecuencias. Izquierda: Microcuenca Marianza, Derecha: Microcuenca Marianza Aledaña. Fuente: Elaboración Propia .....	92
Figura 4-8. Perfil red del cauce principal microcuencas de análisis con base en el MDE del SIGTIERRAS (2015). Fuente: Elaboración Propia.....	92
Figura 4-9. Muestras de suelos en la microcuenca Marianza. a) Muestra 1 (Parte Baja), b) Muestra 2 (Parte Media), c) Muestra 3 (Parte Alta). Fuente: Elaboración Propia ....	93
Figura 4-10. Muestras de suelos en la microcuenca Marianza Aledaña. a) Muestra 1 (Parte baja), b) Muestra 2 (Parte Media), c) Muestra 3 (Parte Alta). Fuente: Elaboración Propia.....	93
Figura 4-11. Curva granulométrica muestras de suelo. Izquierda: Microcuenca Marianza. Derecha: Microcuenca Marianza Aledaña. Fuente: Elaboración Propia ....	94
Figura 4-12. Clasificación de suelos en la carta de plasticidad para las muestra. a) Microcuenca Marianza, b) Microcuenca Marianza Aledaña. Fuente: Elaboración Propia .....	95
Figura 4-13. Análisis de curva doble masa para valores acumulados mensuales (Periodo Mayo/2004 – Marzo/2023). Fuente: Elaboración Propia .....	97
Figura 4-14. Resultado de curva doble masa para datos corregidos. Fuente: Elaboración Propia.....	99

Figura 4-15. Precipitación incremental y acumulada estación Marianza bajo. Fuente: Elaboración Propia.....	100
Figura 4-16. Precipitación incremental y acumulada estación Marianza Alto. Fuente: Elaboración Propia.....	100
Figura 4-17. Precipitación incremental y acumulada estación Marianza Pinos. Fuente: Elaboración Propia.....	101
Figura 4-18. Precipitación incremental y acumulada marzo 2022 Estación Marianza Alto. Fuente: Elaboración Propia .....	101
Figura 4-19. Precipitación incremental y acumulada marzo 2022 Estación Marianza Bajo. Fuente: Elaboración Propia .....	102
Figura 4-20. Precipitación incremental y acumulada marzo 2022 Estación Marianza Pinos. Fuente: Elaboración Propia.....	103
Figura 4-21. Precipitación acumulada para el mes de marzo de 2022 en las estaciones de registro. Fuente: Elaboración Propia .....	104
Figura 4-22. Análisis de estacionalidad Estación Marianza Alto. Fuente: Elaboración Propia .....	105
Figura 4-23. Análisis de estacionalidad Estación Marianza Bajo. Fuente: Elaboración Propia .....	105
Figura 4-24. Análisis de estacionalidad Estación Marianza Pinos. Fuente: Elaboración Propia .....	106
Figura 4-25. Resultados de valores extremos para un periodo de 3 horas entre los años de 2004 hasta 2023. Fuente: Elaboración Propia.....	107
Figura 4-26. Resultados de valores extremos para un periodo de 24 horas entre los años de 2004 hasta 2023. Fuente: Elaboración Propia.....	107
Figura 4-27. Ajuste de precipitación extrema estación Marianza Bajo a funciones de distribución de probabilidad. Fuente: Elaboración Propia.....	109
Figura 4-28. Ajuste de precipitación extrema estación Marianza Alto a funciones de distribución de probabilidad. Fuente: Elaboración Propia.....	109
Figura 4-29. Ajuste de precipitación extrema estación Marianza Pinos a funciones de distribución de probabilidad. Fuente: Elaboración Propia.....	110
Figura 4-30. Ajuste de precipitación máxima en 3h sector Marianza. Fuente: Elaboración Propia.....	110
Figura 4-31. Ajuste de precipitación máxima en 24 h sector Marianza. Fuente: Elaboración Propia.....	111
Figura 4-32. Grupo hidrológico de suelo. Parroquia Sayausí, WGS84/Zona 17S. Fuente. Elaboración Propia .....	112

Figura 4-33. Número de Curva (AMC II). Parroquia Sayausí, WGS84/Zona 17S. Fuente. Elaboración Propia .....	112
Figura 4-34. Divisiones de microcuenca empleando HEC-HMS. Parroquia Sayausí, WGS84/Zona 17S Fuente: Elaboración Propia .....	113
Figura 4-35. Esquema de elementos hidrológicos a) Microcuenca Marianza Aledaña. B) Microcuenca Marianza. Fuente: Elaboración Propia.....	115
Figura 4-36. Hietograma de diseño del sector Marianza para el 27 de marzo del 2022 definido para modelación lluvia-escorrentía. Fuente: Elaboración Propia .....	117
Figura 4-37 Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico junction (Caso 1). Fuente: Elaboración Propia .....	119
Figura 4-38. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico sink (Caso 1). Fuente: Elaboración Propia .....	119
Figura 4-39. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico junction (Caso 1) .....	120
Figura 4-40 Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico sink (Caso 1) .....	121
Figura 4-41. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico junction (Caso 2) .....	122
Figura 4-42. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico sink (Caso 2) .....	123
Figura 4-43. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico junction (Caso 2) .....	124
Figura 4-44. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico sink (Caso 2) .....	124
Figura 4-45. Diagrama causa vs efecto de los factores condicionantes de la matriz de interacción del procedimiento RES. Fuente: Elaboración Propia .....	126
Figura 4-46. Mapas de susceptibilidad a flujos de detritos obtenidos con el método RES. La cuenca delimitada por líneas negras continuas se refiere a las microcuencas estudiadas. Los números negros son los DfPI globales evaluados para las microcuencas en el sector Marianza. WGS 84/Zona 17S. Fuente: Elaboración Propia .....	128
Figura 4-47. Rango de susceptibilidad ante flujo de detritos en microcuencas en el sector Marianza. Fuente: Elaboración Propia .....	129
Figura 4-48. Suelo con superficie de base de manto rocoso. Fuente (Suarez 1998)	130
Figura 4-49. Microcuencas en el sector Marianza, parroquia Sayausí (abril 2023). Fuente: Elaboración Propia .....	131



Figura 4-50. a) Material transporta y rocas luego del evento del 27 de marzo del 2022. Fuente: (El Universo 2022), b) Roca caída en una vivienda en el sector Marianza. Fuente: (Orellana 2023).....	132
Figura 4-51. Comparaciones curvas hipsométricas microcuenca Marianza vs microcuenca Marianza Aledaña .....	133
Figura 4-52. Esquema general de cárcava de erosión. Fuente: (Suarez 1998).....	134
Figura 4-53. Clasificación de coluviones según su estructura de soporte: a) Clastos soportado, b) intermedio, c) matriz soportado. Fuente: (Suárez 1998) .....	135
Figura 4-54. Relación entre el contenido de agua saturada del suelo in situ o inalterado y el límite líquido de Atterberg para suelos que se movilizaron como flujos de detritos durante el temporal de 1982 en la bahía de San Francisco. Fuente: (Ellen and Fleming 1987) .....	136
Figura 4-55. Histograma de intensidad de interactividad. Fuente: Elaboración Propia. .....	142
Figura 4-56. Susceptibilidad ante flujo de detritos en el sector Marianza mediante RES. Fuente: Elaboración Propia .....	144

### Índice de tablas

Tabla 2-1. Parámetros morfométricos para cuencas de montaña. Fuente: (Mahala 2020) .....	35
Tabla 2-2. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). Fuente: (Das 2019)	37
Tabla 2-3. Grupo hidrológico del suelo. Fuente: (NRCS 2007).....	49
Tabla 2-4. Condición antecedentes de humedad (AMC) para el método SCS. Fuente: (SCS 1972) .....	50
Tabla 2-5. Número de curva (CN) para otros tipos de suelos agrícolas. Condiciones antecedentes de humedad tipo II. Fuente: (USDA 1986).....	52
Tabla 3-1. Ficha estaciones pluviométricas PROMAS en el sector Marianza.....	64
Tabla 3-2. Ubicación de las muestras de suelo tomadas en el sector Marianza, parroquia Sayausí. WGA84/Zona 17S.....	71
Tabla 3-3. Factores condicionantes para la ocurrencia de flujo de detritos .....	83
Tabla 4-1. Geología/Litología en el sector Marianza, parroquia Sayausí. Fuente: SIGTIERRAS .....	86
Tabla 4-2. Características fisiográficas microcuencas de análisis .....	90
Tabla 4-3. Parámetros morfométricos microcuencas de análisis. Fuente: Elaboración Propia .....	90
Tabla 4-4. Distribución de roca y matriz de suelo en microcuencas en el sector Marianza. Fuente: Elaboración Propia.....	94
Tabla 4-5. Límites de Atterberg, Humedad y Clasificación de Suelos SUCS en el sector Marianza.....	95
Tabla 4-6. Resumen de periodos con datos faltantes para las estaciones de registro. Fuente: Elaboración Propia .....	97
Tabla 4-7. Pendientes para corrección de datos faltantes para cada estación. Fuente: Elaboración Propia .....	98
Tabla 4-8. Profundidad e intensidad máxima para las estaciones durante el evento del 27 de marzo de 2022. Fuente: Elaboración Propia .....	103
Tabla 4-9. Test Kolmogórov-Smirnov ajuste de funciones de distribución de probabilidad a precipitación máxima en 3h y 24 h. Fuente: Elaboración Propia .....	108
Tabla 4-10. Distancia euclidiana entre las estaciones pluviométricas y el centroide de las microcuencas de análisis .....	114
Tabla 4-11. Características de las microcuencas de análisis .....	115
Tabla 4-12. Parámetros para el cálculo de pérdidas en las microcuencas de Marianza y Aledaña caso 1.....	116

Tabla 4-13. Parámetros para el cálculo de pérdidas en las microcuencas de Marianza y Aledaña caso 2.....	116
Tabla 4-14. Tiempo de retardo para las subcuencas de análisis.....	117
Tabla 4-15 Parámetros para modelación con método de Muskingum .....	117
Tabla 4-16. Resumen de resultados microcuenca de Marianza (Caso 1) .....	118
Tabla 4-17. Resumen de resultados microcuenca aledaña (Caso 1).....	120
Tabla 4-18 Caudal específico en las microcuencas de análisis (Caso 1) .....	121
Tabla 4-19. Resumen de resultados microcuenca de Marianza (Caso 2) .....	122
Tabla 4-20. Caudal específico en las microcuencas de análisis (Caso 2) .....	125
Tabla 4- 21. Resumen de caudales obtenidos mediante modelación lluvia-escorrentía .....	125
Tabla 4-22. Matriz de interacción metodología RES sector Marianza. Fuente: Elaboración propia .....	126
Tabla 4-23. Clasificación y puntuación de los factores condicionantes considerados en la matriz de interacción para aplicar la metodología RES.....	127

**Dedicatoria**

Dedico este trabajo a todas las personas que confiaron en mí y me acompañaron a lo largo del camino. Sus palabras y apoyo me han dado un impulso para conseguir mis metas.

***José Luis Chaca Cordero***

### Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi amada madre, Janeth. Su amor incondicional, apoyo inquebrantable y constante motivación han sido la fuerza impulsora detrás de mi dedicación y perseverancia en la realización de esta tesis. Su sacrificio y creencia en mí me han inspirado a superar los desafíos y alcanzar mis metas académicas. Gracias, mamá, por ser mi mayor fuente de inspiración y por enseñarme el valor del esfuerzo, determinación y confianza en Dios. Este trabajo está dedicado a ti con profundo amor y gratitud.

*Juan Rea Ávila*

### Agradecimientos

Queremos agradecer al Ingeniero Vladimiro Tobar, por su valiosa orientación, apoyo y paciencia durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A nuestros codirectores, el Geólogo Aleksandr Khachatryan y el Ingeniero Marco Ramírez. Sus aportes y discusiones enriquecieron nuestro trabajo y contribuyeron a su calidad.

Expresamos nuestro reconocimiento al personal del laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca, quienes nos brindaron acceso a recursos y equipos necesarios para llevar a cabo esta investigación

El aporte de las instituciones públicas y su personal para la dotación de datos. PROMAS, Ministerio de Transporte y Obras públicas, y la Red hidrometeorológica de la ciudad de Cuenca, nuestro profundo agradecimiento.

A la planta docente de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca quienes han contribuido en nuestra formación académica.

De forma especial, a nuestras familias que nos han acompañado en cada paso de nuestras vidas y nos han brindado sus enseñanzas y apoyo incondicional.

Por último, queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a nuestros amigos, por su amistad, intercambio de ideas, discusiones y vivencias juntos.

***José Luis Chaca Cordero y Juan Rea Ávila***

## Capítulo 1

### Introducción

#### 1.1 Antecedentes

El 27 de marzo del año 2022 en el sector occidental de la ciudad de Cuenca se registraron cuatro eventos de flujo de detritos en cuatro microcuencas de montaña tributarias del río Tomebamba durante un corto periodo de tiempo (Primicias 2022). Las comunas de El Lirio, Marianza, Gulag y Zorrocucho pertenecientes a la parroquia Sayausí se vieron afectadas, siendo Marianza el sector más perjudicado, con una mayor acumulación de material según se observa en la Figura 1-1(Clavijo 2022).



**Figura 1-1.** Flujo de detritos en el sector Marianza. Fuente: (Primicias 2022)

El evento suscitado dejó pérdidas económicas y materiales significativas (SNGRE 2022). Según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP), se depositaron 18.000m<sup>3</sup> de lodo, agua y roca a lo largo de 5.5 kilómetros de la red estatal Cuenca-Molleturo-El Empalme, vía que conecta las provincias de Azuay y Guayas (MTOP 2022a). El acontecimiento dejó un saldo de 4 personas fallecidas, 5 personas heridas, 209 habitantes evacuados y 27 viviendas afectadas por el ingreso de agua y lodo. Además, se registró la destrucción total de 9 viviendas y una Unidad Educativa en el sector (SNGRE 2022). En la ciudad de Cuenca el acontecimiento provocó la interrupción

del 40% del servicio de agua potable dejando 250.000 usuarios desabastecidos (Beltrán, 2022). El Consejo de Operaciones y Emergencias Cantonal declaró la zona en estado de emergencia y su disposición de intervención inmediata. El MTOP ejecutó trabajos de desalojo de material, estabilización de terreno y reparación de la vía. Estos trabajos que requirieron seis meses en completarse, contaron con una inversión aproximada de USD 900.000 (MTOP 2022b).

Según su definición los flujos de detritos son un proceso controlado por la gravedad que involucra el desprendimiento y transporte de sedimentos con una gran variedad de diámetros de partículas en una matriz de agua a través de un flujo continuo, viscoso y saturado (Ortigao and Sayao 2004; Sepúlveda 1998; Suárez 1998). La amenaza generada por este fenómeno puede variar de moderada a alta, en gran medida debido a sus características catastróficas, como su imprevisibilidad, la movilización de grandes volúmenes de material y su capacidad de producir cambios importantes en la topografía (Sepúlveda 1998; Suárez 1998). Además, se presentan en zonas montañosas donde se propician condiciones para la convergencia de características relevantes como la topografía, lluvias intensas y meteorización (Comunidad Andina 2009; Suárez 1998).

Existen agentes que condicionan la ocurrencia de estos eventos incluyendo la geología, morfología, las condiciones climáticas y la cobertura vegetal de la zona. A su vez mecanismos como la precipitación, erosión y la intervención antropogénica que actúan como factores desencadenantes (ver. Figura 1-2) (Ortigao and Sayao 2004). Este último mecanismo convierte a estos eventos en un fenómeno socio natural ya que acciones antropogénicas aumentan la susceptibilidad ante flujos de detritos sobre todo para poblaciones localizadas a orillas de laderas y ríos (Comunidad Andina 2009).

En el transcurso de las últimas décadas se ha realizado avances en la evaluación y el análisis de susceptibilidad de eventos geodinámicos en distintas partes del mundo (Ntelis et al. 2019; Regmi et al. 2010b; Zêzere 2002). A su vez, los análisis han mostrado que si bien predecir la ocurrencia de estos eventos presenta una alta complejidad, es posible analizar y generar estrategias de mitigación enfocadas en dos escalas: de manera puntual en laderas específicas o de manera regional mediante la identificación de zonas de riesgo (Keefer and Larsen 2007).



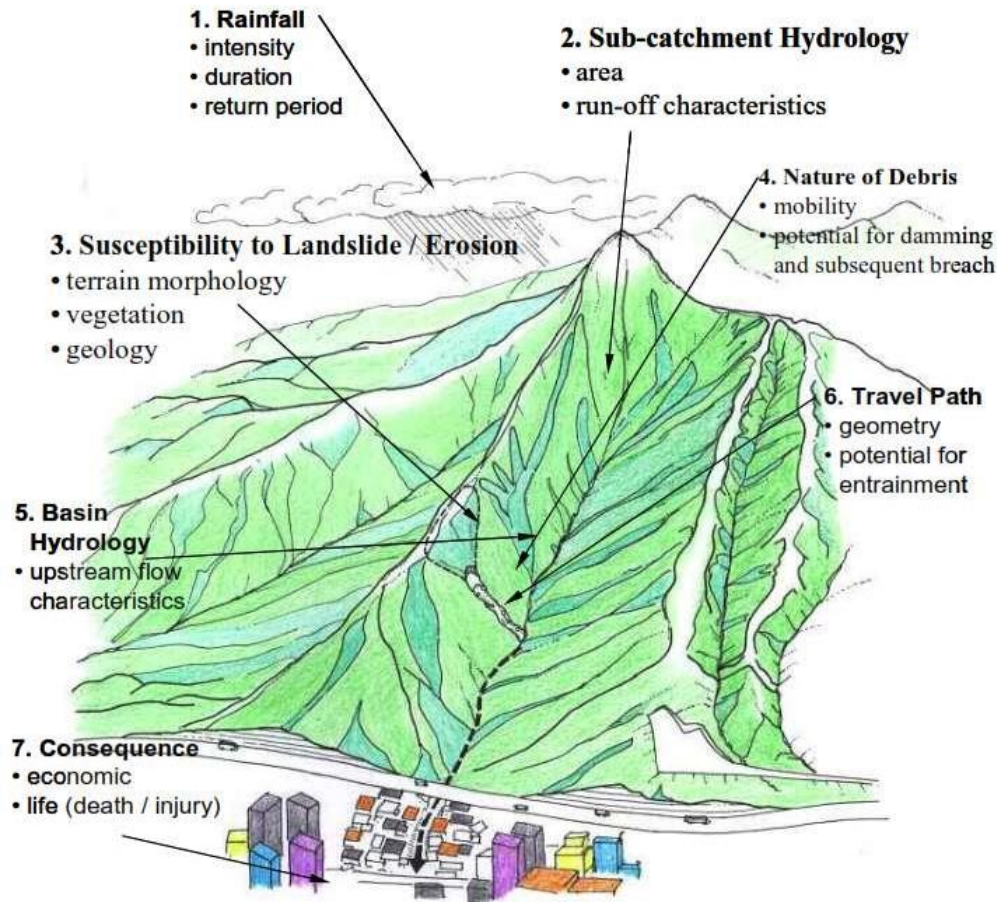


Figura 1-2. Características de flujos de detritos: Fuente: (Winter et al. 2005)

Con base en estos enfoques se han desarrollado metodologías específicas para el análisis de flujo de detritos, como la aplicada por Zhao et al. (2021), la cual presenta una aproximación mediante una aplicación conjunta de Machine Learning, métodos estadísticos y teledetección determinando que la litología, la pendiente y la frecuencia media anual de precipitaciones diarias son factores relevantes.

Del mismo modo Stancanelli et al. (2017) propone un enfoque práctico para la obtención de mapas de susceptibilidad que se basa en el uso integrado de modelos hidrológicos y de estabilidad proporcionando una simulación más precisa del fenómeno de flujo de detritos. Finalmente Vianello et al. (2022) aplica un enfoque novedoso basado en el método Rock Engineering Systems (RES) partiendo de parámetros relacionados con la geología, morfología e hidrología permitiendo identificar sectores susceptibles a flujo de detritos.

A nivel de la ciudad de Cuenca, se han llevado a cabo estudios de mapeo de deslizamientos para identificar zonas con alta susceptibilidad a movimientos geodinámicos aplicando redes neuronales (Bravo-López et al. 2022a). De igual manera se han realizado intentos para monitorear cambios en la superficie de terrenos en el

área urbana mediante imágenes satelitales, técnicas de interferometría InSAR (Carpio Moreta 2020) y mediante técnicas DInSar basadas en la medición de ondas electromagnéticas reflejadas en la superficie del terreno (Sellers et al. 2021). Sin embargo, hasta la fecha no se ha llevado a cabo un estudio integrador de los factores determinantes de movimientos geodinámicos, especialmente de los flujos de detritos, en la cuenca del río Tomebamba ni en sus microcuencas en el sector Marianza a pesar de la importancia que la arteria vial constituye para la comunicación y el comercio en la región austral del país.

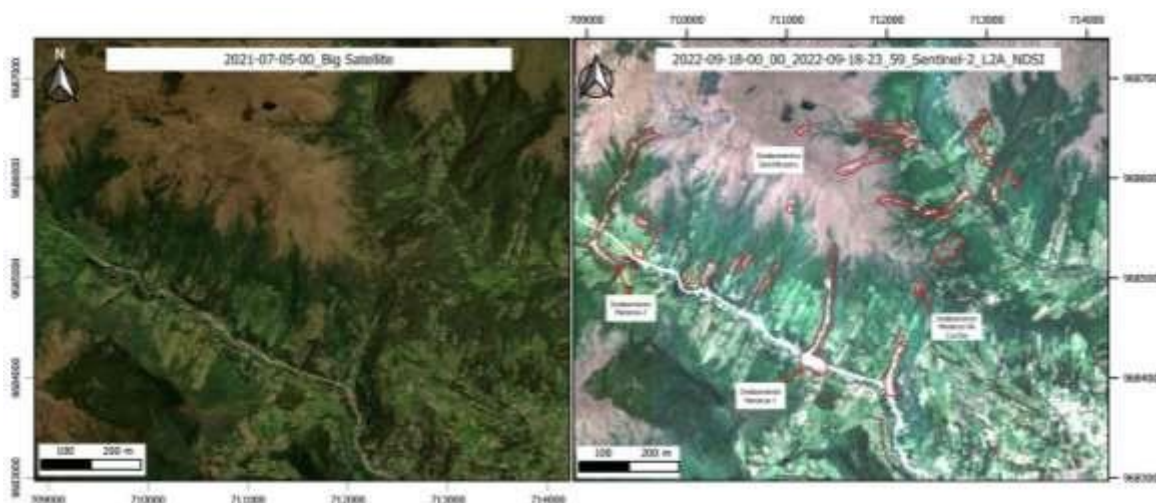


Figura 1-3. Movimientos Geodinámicos Identificados. Fuente: Elaboración Propia

## 1.2 Problemática y justificación

El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia Sayausí (2015) señala la necesidad de tomar medidas inmediatas en relación con la seguridad en las comunidades de Gulag, El Lirio y Marianza. Estas comunidades se encuentran en zonas montañosas, caracterizadas por un alta pendiente y la presencia significativa de asentamientos urbanos. Según se observa en la Figura 1-3 obtenida de imágenes satelitales, durante los últimos años en la parte noroccidental de la parroquia Sayausí han sucedido varios movimientos geodinámicos, entre ellos el evento suscitado el 27 de marzo del 2022.

Estudiar la susceptibilidad ante desastres naturales y entender el comportamiento de microcuencas de montaña del sector es importante debido a la influencia directa en ecosistemas ubicados aguas abajo y a su vez en actividades humanas como la agricultura, industrias y comercio (Martínez Bravo et al. 2017). Además, por medio de investigaciones se puede tomar acciones para la prevención de desastres naturales,

permitiendo la evaluación del riesgo y la planificación de medidas de protección (Regmi et al. 2010a).

En base a lo acontecido, y los hechos mencionados surge la necesidad de dar una respuesta sobre los factores determinantes que provocaron los flujos de detritos en marzo del 2022, puesto que condiciones similares en zonas aledañas podrían ocasionar otros movimientos geodinámicos que incluso podrían provocar mayores daños a la zona si no se conoce su amenaza y no se toman acciones para mitigarlas (Bravo-López et al. 2022b).

El presente trabajo de titulación busca identificar los posibles factores determinantes en la ocurrencia del flujo de detritos en el sector Marianza en marzo del 2022. Se pretende estudiar los ámbitos de: geología, geomorfología, geotecnia, hidrología, cobertura vegetal, uso de suelo y ocurrencia de lluvias. Además, estudiar la prevalencia de condiciones en una microcuenca de montaña aledaña y evaluar su susceptibilidad ante la ocurrencia de este tipo de eventos geodinámicos.

El enfoque de la investigación se basará en el análisis detallado de las características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas del sector Marianza. Se utilizarán técnicas y herramientas para recopilar datos, constatar información y corroboración de los hallazgos por medio de visitas de campo y ensayos en laboratorio. De modo que el desarrollo de esta investigación profundice en el conocimiento de factores que desencadenan un flujo de detritos y proporcione conocimiento sobre el comportamiento de microcuencas de montaña en el sector Marianza. Además, se espera que los resultados de esta investigación no solo contribuirán al conocimiento científico sobre flujo de detritos, sino que también genere importantes implicaciones prácticas que sirva para que las autoridades locales, planificadores urbanos y comunidades afectadas desarrollen estrategias de prevención y gestión de riesgos más efectivas.

### **1.3 Preguntas de Investigación**

- ¿Es posible identificar los factores o combinaciones de factores que desencadenaron el deslizamiento de tierra en el sector Marianza en marzo del 2022?
- ¿Cómo se relacionan la morfometría y el tipo de suelo con la precipitación, para generar eventos de escorrentía y movimientos geodinámicos?

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Identificar la relación de factores geomorfológicos e hidrológicos que desencadenaron el movimiento geodinámico del sector Marianza en marzo del 2022 y proyectar esta relación en una microcuenca colindante de montaña como un modelo heurístico de susceptibilidad geodinámica.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

1. Realizar la caracterización geomorfológica en dos microcuencas en el sector Marianza.
2. Realizar la caracterización geológica y clasificación de suelos en dos microcuencas en el sector Marianza.
3. Generar un modelo de lluvia-escorrentía.
4. Analizar la combinación de factores en la ocurrencia del deslizamiento de tierra en el sector Marianza.
5. Realizar la proyección de la combinación de factores desencadenantes en la ocurrencia de movimientos geodinámicos en una microcuenca colindante de montaña.

## 1.5 Organización de los capítulos

El trabajo de titulación está organizado en 5 capítulos que se distribuyen de la siguiente manera:

Capítulo 1 Introducción: se enmarcan los antecedentes de la investigación, así como la descripción de la problemática y la importancia del desarrollo del trabajo de titulación. A su vez se establece la justificación y los objetivos que se plantean cumplir.

Capítulo 2 Marco Teórico: presenta información detallada y resume la teoría necesaria para el entendimiento de flujos de detritos, modelación lluvia escorrentía y mapeo de susceptibilidad ante flujo de detritos.

Capítulo 3 Materiales y Métodos: se indicará el tipo, calidad y procedencia de los recursos que serán utilizados para el desarrollo de la investigación. Además, se detallarán las metodologías para la caracterización geomorfológica, geológica, análisis de lluvias y modelo caudal-escorrentía. Se explicará el método aplicado para la evaluación de susceptibilidad de flujo de detritos en microcuencas.

Capítulo 4 Resultados y Discusión: en esta sección se expondrán los resultados obtenidos y se discutirán los hallazgos en función de los objetivos, hipótesis planteadas y referencias bibliográficas.

Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones: en esta sección se hará un resumen de las conclusiones importantes y sus implicaciones en el área de investigación. De modo que se tenga una descripción de los objetivos principales, el rigor metodológico, los resultados y la discusión. Además de recomendaciones que promuevan la prevención y gestión del riesgo en áreas susceptibles a flujo de detritos.

## Capítulo 2

### Marco Teórico

#### 2.1 Parroquia Sayausí

##### 2.1.1 Clima e hidrología

La comunidad de Marianza se extiende longitudinalmente en dirección noroeste-sureste y se encuentra sometida a una variabilidad de temperaturas que oscilan entre 4°C y 14°C. Su clima se clasifica como ecuatorial mesotérmico semihúmedo con temperaturas irregulares, en donde los meses de marzo y septiembre presentan temperaturas más elevadas, mientras que los meses de junio, julio y agosto registran temperaturas más frías (GADP Sayausí 2018).

En la zona de estudio se registran lluvias intensas durante todo el año presentándose dos estaciones lluviosas de febrero a mayo y de octubre a noviembre. La primera estación seca se extiende desde junio a septiembre, mientras que la segunda es menos acentuada y abarca los meses de diciembre a enero. La precipitación media anual es de 1100mm, con una precipitación mensual promedio de 92mm. Los registros indican que el pico máximo de precipitación se da en los meses de abril a junio con 130.5mm (GADP Sayausí 2015).

Las microcuencas del área de estudio son unidades hidrológicas compuestas por quebradas que se originan en las montañas y reciben agua de infiltración y escurrimiento de áreas de páramo en la parte superior. Estas microcuencas forman parte de la red hidrológica que alimenta la subcuenca del río Tomebamba, el recurso hídrico más importante que abastece a la ciudad de Cuenca. En la comunidad de Marianza, los sistemas de captación de agua de la quebrada son convencionales y han sido utilizados históricamente para regadío de cultivos y cría de animales. Además, se realizan entubaciones para llevar el agua desde las partes superiores a cada caserío o propiedad (GADP Sayausí 2015).

##### 2.1.2 Cobertura vegetal y actividades antrópicas

En el área de estudio, se han identificado tres zonas distintas de cobertura vegetal y uso del suelo, las cuales están directamente relacionadas con la elevación topográfica. La primera zona corresponde a la parte baja del área de estudio, adyacente a la vía Cuenca-Molleturo-El Empalme y al río Matadero, donde predominan áreas urbanizadas y terrenos agrícolas, con presencia en menor medida de bosques de Eucalipto, Pinos y pastizales en amplias extensiones (GADP Sayausí 2018).

En la zona de elevación media, los bosques, las plantaciones forestales y la vegetación no arbustiva son dominantes, habiéndose observado un aumento reciente de los pastizales. Por otro lado, la zona de elevación más alta está principalmente compuesta por pajonales en un ecosistema de páramo, sin asentamientos humanos presentes (GADP Sayausí 2015).

Generalmente, las zonas de elevación media han sido las más afectadas por la actividad humana. En la parroquia Sayausí, se ha registrado uno de los cambios más significativos en la cobertura vegetal en los últimos 13 años. La intervención humana ha aumentado del 5.97% al 10.41%, mientras que la cobertura de bosques ha disminuido del 7.53% al 5.85%. También se ha observado una reducción del 2.6% en los páramos y del 8.18% en los cuerpos de agua. Además, se ha evidenciado una disminución importante de la vegetación arbustiva y herbácea debido al incremento de la frontera agrícola en la zona (GADP Sayausí 2015).

En cuanto al sector de poblaciones, la actividad productiva se enfoca en la cría de animales y cultivos, mientras que en la parte media se utilizan terrenos para ganadería y cultivo. El bosque nativo ha sido reemplazado por pastos, cultivos y bosques de Eucalipto y Pino, lo cual representa una amenaza a estos ecosistemas que son inapropiados para cultivo y solo son aptos para fines forestales (GADP Sayausí 2015).

### **2.1.3 Actividad de movimientos geodinámicos**

En el área de estudio del sector Marianza, la comunidad posee un riesgo muy alto a actividades geodinámicas (GADP Sayausí 2015). Según el reporte PRECUPA, terrenos en el sector presentan riesgos de inestabilidad y movimientos geodinámicos, por lo que se recomienda que no sean urbanizables (Basabe et al. 1998). A pesar de esto, se ha observado un aumento en la población en la zona baja del área de estudio, especialmente a lo largo de la red estatal Cuenca-Molleturo-EI Empalme (GADP Sayausí 2015).

En el PDOT del área de estudio se ha identificado que existen pendientes con una inclinación mayor al 100%, suelos no consolidados y rocas fracturadas y meteorizadas, factores vinculados a actividades antrópicas. Además, las condiciones estacionales de altas precipitaciones convierten al área en zonas propensas a movimientos geodinámicos, específicamente a flujos de detritos (GADP Sayausí 2018). Hasta la fecha de realización de este trabajo de investigación no existe un reporte detallado de los movimientos geodinámicos ocurridos en el sector Marianza.

## 2.2 Caracterización Geológica

La caracterización geológica se refiere al proceso de estudiar y describir las características y propiedades geológicas de una determinada área o región. Involucra la identificación y análisis de los distintos tipos de rocas, minerales, estructuras y procesos geológicos que han dado forma al terreno. La caracterización geológica se realiza a través de la recopilación de datos de campo, muestreo de rocas y su posterior análisis en laboratorio, interpretación de imágenes y mapas geológicos, entre otras técnicas. El objetivo principal de la caracterización geológica es comprender la historia geológica de un área y su potencial geológico para diferentes aplicaciones, como la exploración de recursos naturales, la evaluación de riesgos geológicos o la planificación del uso del suelo (Argles et al. 2010; Houlding 1994).

Formaciones geológicas: corresponden a la unidad de división litoestratigráfica de roca distintivas y reconocible que comparten características similares y se encuentran en una secuencia estratigráfica específica. Se forman a través de procesos geológicos como la deposición de sedimentos, actividad volcánica, deformación tectónica o erosión. Cada formación tiene una composición, estructura y edad única, lo que permite su identificación y correlación en diferentes áreas geográficas. Son importantes para estudiar la historia geológica, proporcionando información sobre eventos y procesos pasados (Suarez 1998).

Unidades Litológicas: Se refieren a estratos o capas de roca que comparten características similares en composición y textura. Son importantes en geología para comprender la historia geológica de una región y los procesos que han dado forma a la Tierra. Estas unidades se definen según la naturaleza y composición de las rocas. Su estudio proporciona información sobre la interacción con el agua, los minerales presentes, la resistencia a la erosión y otros aspectos geológicos y geotécnicos (Suarez 1998).

## 2.3 Caracterización Geomorfológica

La geomorfología se centra en el estudio de la evolución y configuración del paisaje, analizando su dinámica y los procesos que influyen en su formación. En este contexto, se observa un equilibrio dinámico entre la capacidad del flujo de agua para erosionar la superficie terrestre y el lecho de los arroyos, y la capacidad de resistencia de estas superficies frente a la erosión. Este equilibrio refleja la compleja interacción entre factores hidrológicos, geológicos, climáticos y bióticos que dan forma al paisaje a lo largo del tiempo (Maidment 1993).



En la clasificación geomorfológica, se identifican cuatro componentes clave: proceso geomórfico, forma del terreno, generación geomórfica y morfometría. Las cuales se describirán a continuación:

### **2.3.1 Procesos geomórficos**

En este aspecto el proceso geomórfico corresponde a la fuerza geológica dominante ya sea interna o externa que ha interactuado en el marco estructural geológico existente para dar forma a la superficie del terreno (Donald et al. 1998). Este proceso posee dos elementos correspondientes: Tipo de proceso geomórfico y el Subproceso Geomórfico.

**Tipo de Proceso Geomórfico:** Se refiere a las categorías generales de los procesos que actúan en la configuración del paisaje. Estos procesos representan las fuerzas principales que dan forma y modifican la superficie terrestre a lo largo del tiempo. Algunos ejemplos comunes de tipos de procesos geomórficos incluyen la erosión fluvial, la acción glaciaria, la meteorización química y la actividad volcánica (Donald et al. 1998).

**Subproceso Geomórfico:** se refiere a las variantes o subdivisiones más específicas de los procesos geomórficos generales. Representan las manifestaciones particulares y los mecanismos específicos dentro de cada tipo de proceso geomórfico. Por ejemplo, dentro del tipo de proceso geomórfico de la erosión fluvial, los subprocesos geomórficos podrían incluir la erosión lateral de los ríos, la erosión vertical en forma de cascadas o rápidos, o la deposición de sedimentos en las llanuras de inundación (Donald et al. 1998).

### **2.3.2 Relieve del terreno**

El relieve se define como cualquier característica física en la superficie terrestre que exhibe una forma distintiva y reconocible, resultado de procesos naturales (Bates and Jackson 1987). Esta característica está estrechamente vinculada al componente del proceso geomórfico mencionado previamente por Donald et al. (1998).

La clasificación relacionada con la forma del relieve consta de dos elementos principales: el relieve del terreno y el elemento de relieve del terreno. A continuación, se proporciona una definición de cada uno de ellos:

**Relieve/ Forma terrestre:** Forma terrestre que existe dentro de un único tipo de proceso geomórfico y que puede delimitarse a escalas iguales o superiores al nivel de unidad terrestre (tipo de terreno y fase de tipo de terreno). Por ejemplo, en el subproceso de deposición preglaciaria, los accidentes geográficos incluyen la llanura de afloramiento, el

abanico de afloramiento, la terraza de afloramiento, el tren de valles y la llanura de inundación (Donald et al. 1998).

Elemento del relieve del terreno: Componente espacial de una forma del terreno en el nivel inmediatamente inferior y jerárquico a la forma del terreno, que puede delimitarse a escalas iguales o superiores al nivel de unidad del terreno (tipo de terreno y fase del tipo de terreno). Una cresta de playa es una subdivisión de una playa y una zona de pie es una subdivisión de un flujo de tierra. (Donald et al. 1998).

### 2.3.3 Morfometría

La morfometría se puede definir como el proceso de medir y analizar matemáticamente la configuración de la superficie terrestre, así como la forma y dimensiones de sus características geomorfológicas (Bates and Jackson 1987). En su mayoría, se aplica a unidades cartográficas geomorfológicas con el objetivo de proporcionar una cuantificación precisa que permita una aplicación coherente en términos de cartografía, correlación e interpretación (Donald et al. 1998). Los índices morfométricos pueden clasificarse en tres categorías:

Red hidrográfica: Incluye todos los parámetros morfométricos de la red hidrográfica de la cuenca.

Aspecto de superficie: Incluye los parámetros que cambian con la elevación de una cuenca.

Aspecto de relieve: Incluye los parámetros que cambian con la distancia aérea de una cuenca.

La Tabla 2-1 resume algunos parámetros morfométricos importantes que son empleados para la caracterización geomorfológica de cuencas de montaña.

Aspecto Morfométrico	Parámetros	Fórmula	Referencia
Red hidrográfica	Orden de la cuenca (u)	Orden jerárquico	Strahler (1964)
	Número de arroyos ( $N_u$ )	$N_u$ = Número de arroyos de un orden particular "u"	Strahler (1964)
	Longitud del arroyo ( $L_u$ )	$L_u$ = longitud total de arroyos (km) de un orden en particular "u"	Horton (1945)
Aspecto de superficie	Factor de Forma ( $F_f$ )	$F_f=A/L^2$ ; donde, A= área de la cuenca ( $km^2$ ), L= longitud de la cuenca (km)	Horton (1945)

	Índice de Circularidad ( $R_c$ )	$R_c=4\pi A/P^2$ ; donde, A= área de la cuenca ( $\text{km}^2$ , P= perímetro de la cuenca de drenaje (km)	Strahler (1964)
	Índice de Elongación ( $R_e$ )	$R_e=P/\pi L$ ; donde, P= perímetro de la red de drenaje, L= longitud de la cuenca (km)	Strahler (1964)
	Índice de Compacidad ( $K_c$ )	$K_c=0.28 P/A^{0.5}$ ; donde, P= perímetro de la cuenca, A= área de la cuenca	Horton (1945)
	Rectángulo Equivalente ( $L_{\text{mayor}}$ )	$L_{\text{mayor}}=P/4+(P^2/16-A)^{0.5}$ ; donde, A= área de la cuenca, P= perímetro de la cuenca	Horton (1945)
	Rectángulo Equivalente ( $L_{\text{menor}}$ )	$L_{\text{menor}}=P/4-(P^2/16-A)^{0.5}$ ; donde, A= área de la cuenca, P= perímetro de la cuenca	Horton (1945)
<b>Aspecto de Relieve</b>	Relieve Relativo (H)	$H=R-r$ ; donde, R= máxima altura de la cuenca, r= mínima altura de la cuenca	Stchumm (1956)
	Índice de pendiente (IP)	$IP= ((\text{elevación al } 0.85L) - (\text{elevación al } 0.10L)) / 0.75L$	Maidment (1993)

Tabla 2-1. Parámetros morfométricos para cuencas de montaña. Fuente: (Mahala 2020)

### 2.3.4 Generación geomórfica

La generación geomórfica es una parte esencial de la clasificación que permite identificar y documentar la presencia de múltiples tipos geomórficos en una ubicación específica del terreno. Además, identifica la génesis de cada una de las formas del relieve, la relación entre las formas del relieve y el estado del proceso que formó o sigue formando las formas del relieve. La sobreimpresión ocurre cuando dos o más procesos geomórficos distintos han ocurrido en un área durante diferentes periodos de tiempo debido a influencias climáticas o tectónicas cambiantes (Donald et al. 1998).

**Activo:** Se refiere a la forma del relieve que continúa evolucionando debido a los procesos contemporáneos que la han creado. Estos procesos pueden incluir eventos tectónicos o climáticos que ocurren a lo largo de cientos de años y se espera que sigan ocurriendo (Donald et al. 1998).

**Dormido:** Se refiere a la forma del relieve que ha evolucionado o desarrollado bajo influencias geológicas y climáticas diferentes a las que ocurren en la actualidad. Estos procesos que dieron lugar a estas características geográficas podrían repetirse en el futuro, pero los ciclos asociados a ellos ocurren en escalas de tiempo de miles o decenas de miles de años (Donald et al. 1998).

Relicto: Se refiere a formaciones del relieve o restos de formaciones del relieve que se originaron en períodos geológicos anteriores y que aún son reconocibles mucho tiempo después de su formación, pero es poco probable que se vuelvan a desarrollar en las condiciones actuales (Donald et al. 1998).

## 2.4 Caracterización de Suelo

La caracterización de una muestra de suelo requiere de la ejecución de ensayos de humedad natural, granulometría y límites de Atterberg. Dichos ensayos permiten describir la distribución de los tamaños de partículas en el suelo, tipo de suelo en base a la clasificación SUCS y su plasticidad.

### 2.4.1 Humedad Natural

Según indica (Das 2019) el contenido de humedad se define como razón entre el peso de agua y el peso de la fracción sólida para un volumen definido de una muestra de suelo. Esta característica también se conoce como contenido de agua y está definida por la ecuación (2-1).

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2-1)$$

Donde:

$w$  = Humedad

$W_w$  = Peso del agua

$W_s$  = Peso de los sólidos

### 2.4.2 Granulometría y Límites de Atterberg

Los ensayos de granulometría y límites de Atterberg permiten evaluar el tamaño de las partículas que componen un suelo y la consistencia de la porción fina del suelo ante diferentes contenidos de humedad (Das 2019). Con base en lo indicado estos parámetros se definen de la siguiente manera:

Granulometría: Consiste en agitar una muestra de suelo a través de un conjunto de tamices con una abertura que se va reduciendo progresivamente.

Límite Líquido: corresponde al contenido de humedad necesario para cerrar la parte inferior de una ranura una distancia de 12.7 mm después de 25 golpes empleando la cuchara de Casagrande.

Límite Plástico: corresponde al contenido de humedad en una porción de suelo al enrollarse en hilos de 3.2 mm de diámetro y desmoronarse.

Índice de Plasticidad: es la diferencia entre el límite líquido y límite plástico de una muestra de suelo.

Índice de Liquidez: es la consistencia relativa de un suelo cohesivo en estado natural y está definida por la ecuación (2-2).

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL} \tag{2-2}$$

Donde:

w = Humedad Natural

PL = Limite plástico del suelo

LL = Limite liquido del suelo

### 2.4.3 Clasificación de Suelos

El sistema de clasificación unificada de suelos (SUCS) presenta una clasificación precisa de suelos para propósitos de ingeniería basado en ensayos de laboratorio de tamaños de partículas y límites de Atterberg (Das 2019).

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo		
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas	Gravas limpias Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Menos de 5% finos <sup>a</sup>	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^f$ $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^f$	GW GP	
	Arenas	50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Gravas con finos	Más de 12% finos <sup>a,d</sup>	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GM GC
			Arenas limpias	Menos de 5% finos <sup>b</sup>	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^f$ $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^f$	SW SP
	Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Límite líquido menor que 50	Limos y arcillas	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) <sup>f</sup> $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) <sup>f</sup>	CL ML
Orgánico				Límite líquido: secado < 0.75; vea la figura 4.2; zona OL Límite líquido: no secado	OL	
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente; color oscuro y orgánico	Limos y arcillas	Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2) Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	CH MH	
			Orgánico	Límite líquido: secado < 0.75; vea la figura 4.2; zona OH Límite líquido: no secado	OH	

<sup>a</sup>Gravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

<sup>b</sup>Arenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

<sup>c</sup> $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ ;  $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$

<sup>d</sup>Si  $4 \leq PI \leq 7$  y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

<sup>f</sup>Si  $4 \leq PI \leq 7$  y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Tabla 2-2. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). Fuente: (Das 2019)

El sistema de clasificación permite identificar tres grandes grupos de suelos, estos son: suelos de grano grueso, suelos de grano fino y suelos orgánicos. Del mismo modo cada grupo esta subdividido obteniendo un total de 15 grupos básicos de suelo. Los resultados de ensayos de laboratorio permiten que un suelo sea catalogado de acuerdo

con uno de los grupos básicos de suelo en función de la distribución del tamaño de sus partículas y su plasticidad. Esto permite asignar al suelo un símbolo de grupo y nombre en base a la Tabla 2-2 y función de la carta de plasticidad según la Figura 2-1 (ASTM 2020).

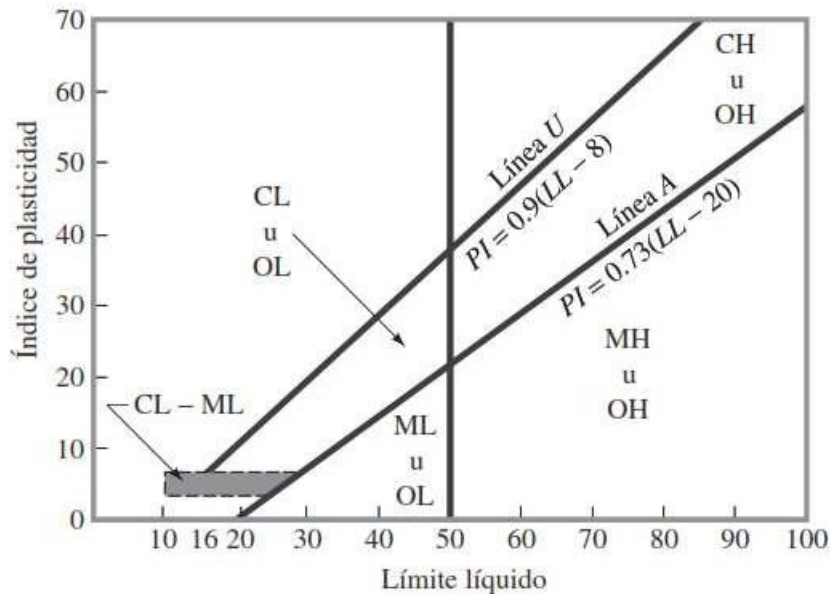


Figura 2-1. Carta de plasticidad de Casagrande. Fuente: (Das 2019)

## 2.5 Análisis de eventos extremos

Los eventos de precipitación extrema y desastres naturales resultantes, como inundaciones, deslizamientos de tierra y flujos de detritos ocasionan un gran número de víctimas y provocan daños económicos significativos (Maidment 1993). El objetivo del análisis de los eventos extremos hidrológicos consiste en establecer una relación entre la magnitud de estos eventos y su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad (Chow 1988). El estudio de eventos hidrológicos extremos implica la selección de una secuencia de observaciones máximas o mínimas agrupadas en intervalos de duración de tormentas, ya sean de 7 días, 24 horas u otros intervalos (Chow 1988). Para llevar a cabo este propósito, existen algunas familias de distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas en hidrología, como la familia Normal/Log-normal, la familia Gumbel/Weibull/valor extremo generalizado y la familia exponencial/Pearson/Log-Pearson Tipo 3 (Maidment 1993).

### 2.5.1 Períodos de Retorno

El periodo de retorno de un evento cualquiera puede entenderse como el tiempo promedio o esperado que transcurre hasta que dicho evento vuelva a ocurrir. La

ecuación (2-3) relaciona el periodo de retorno con su probabilidad de excedencia (Torres-Ramos and Roldan-Rodriguez 2019).

$$T(x) = \frac{1}{P(X > x)} \quad (2-3)$$

Donde  $T(x)$  es el periodo de retorno correspondiente a un evento de magnitud  $x$ , y  $P(X > x)$  es la probabilidad de que ocurra un evento de igual magnitud o superior a  $x$  que causaría los mismos o mayores daños. Se establece que la probabilidad de ocurrencia de un evento en una observación es el inverso del periodo de retorno (Chow 1988).

## 2.5.2 Distribución Gumbel

La distribución de probabilidad acumulada Gumbel o también conocida como la distribución de tipo I de Gumbel, es una distribución de probabilidad continua que se utiliza comúnmente para modelar máximos o mínimos de un conjunto de valores extremos. Esta distribución se utiliza en el campo de la hidrología, ingeniería y estadística de riesgo. La función de distribución de probabilidad de valor extremo tipo 1 de Gumbel (EV1) queda definida en la ecuación (2-4) (Chow 1988).

$$F(x) = \exp \left[ -\exp \left( -\frac{x - \mu}{\alpha} \right) \right] \quad -\infty \leq x \leq \infty \quad (2-4)$$

Una variable reducida  $y$  puede definirse como la presentada en la ecuación (2-5).

$$y = \frac{x - \mu}{\alpha} \quad (2-5)$$

Los parámetros se estiman como se muestran en las ecuaciones (2-6) y (2-7).

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}S_x}{\pi} \quad (2-6)$$

$$\mu = \bar{x} - 0.5722\alpha \quad (2-7)$$

La variable reducida de Gumbel se reduce a la ecuación (2-8).

$$y = -\text{Ln} \left[ \text{Ln} \left( \frac{1}{F(x)} \right) \right] \quad (2-8)$$

Donde:

$\mu$ : ubicación o media de la distribución

$\alpha$ : parámetro de escala o dispersión de la distribución

$S_x$ : desviación estándar muestral

$\bar{x}$ : media aritmética muestral

$x$ : variable aleatoria

$F(x)$ : probabilidad de no excedencia

### 2.5.3 Distribución Pearson tipo III

Al igual que la distribución anterior, la distribución Pearson tipo 3 también conocida como distribución gamma de tres parámetros es empleada en la hidrología para describir la distribución de probabilidad de picos de crecientes máximos anuales (Chow 1988). La magnitud de  $x_T$  de un evento extremo puede aproximarse como lo establecido en la ecuación(2-9).

$$x_T = \mu + K_T\sigma \quad (2-9)$$

Donde:

$\mu$ : media poblacional del conjunto de datos extremos

$\sigma$ : desviación estándar poblacional del conjunto de datos extremos

$K_T$ : factor de frecuencia

Se establece que la desviación con respecto a la media  $\bar{x}$  puede igualarse al producto de la desviación estándar  $S$  y el factor de frecuencia  $K_T$ . El valor del factor de frecuencia  $K_T$  es función del periodo de retorno y la distribución de probabilidad a utilizarse en el análisis. Finalmente, la magnitud de un evento  $x_T$ , puede aproximarse según la ecuación(2-10).

$$x_T = \bar{x} + K_T S \quad (2-10)$$

Para calcular valor correspondiente al factor de frecuencia  $K_T$ , se emplea la ecuación (2-13) donde el valor de  $z$  corresponde a una probabilidad de excedencia  $p$  ( $p = \frac{1}{T}$ ) y  $k = \frac{C_s}{6}$ . Según lo establecido en la ecuación (2-11), para calcular el valor de  $z$  se necesita calcular la variable inmediata  $w$ , la misma que queda definida en la ecuación (2-12).

$$z = w - \frac{2.515517 + 0.802853w - 0.010328w^2}{1 + 1.432788w + 0.189269w^2 + 0.001308w^3} \quad (2-11)$$



$$w = \left[ \text{Ln} \left( \frac{1}{p^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (0 < p \leq 0.5) \quad (2-12)$$

De modo que cuando  $p > 0.5$ ,  $1 - p$  es sustituido por  $p$  en la ecuación (2-12), y el valor de  $z$  se obtiene al utilizar la ecuación (2-11) y se le asigna un signo negativo. Además, el valor de frecuencia  $K_T$  para la distribución normal es igual a  $z$  cuando  $C_s = 0$ , caso contrario se calcula tal como se mencionó anteriormente. Finalmente, el valor  $K_T$  se calcula como lo establecido en la ecuación (2-13).

$$K_T = z + (z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 + zk^4 + \frac{1}{3}k^5 \quad (2-13)$$

#### 2.5.4 Distribución Log-Pearson tipo III

Si  $y = \text{Log}(x)$  sigue una distribución Pearson tipo III, hace referencia que la variable aleatoria  $x$  sigue una distribución Log-Pearson tipo III. Esta distribución de probabilidades, al igual que las mencionadas anteriormente, es ampliamente utilizada para modelar eventos extremos en hidrología, además se emplea para el análisis de frecuencias de crecientes máximas en los Estados Unidos (Chow 1988). Esta distribución ha convertido en una distribución de eventos hidrológicos más utilizada la recomendación del Water Resources Council (Singh 1998). Los parámetros utilizados como la media  $\bar{y}$ , desviación estándar  $S_y$  y coeficiente de asimetría  $C_{sy}$  deben ser calculados en base a la nueva variable  $y$ . Finalmente se aplica las estadísticas correspondientes empleando  $y_T = \bar{y} + K_T S_y$  y el valor requerido se encuentra encontrando el antilogaritmo  $x_T = 10^{y_T}$  (Maidment 1993).

#### 2.5.5 Frecuencia teórica o posición de graficación observada

En ingeniería, no siempre es posible realizar análisis de eventos considerando la población completa, por lo que se suele extraer una muestra para determinar la frecuencia de ocurrencia de eventos con observaciones independientes. Para evaluar la adecuación de una distribución, se lleva a cabo una evaluación gráfica que permite establecer el ajuste de los datos con una función de distribución teórica (Maidment 1993). La ecuación de Weibull es un método estadístico conveniente y justificado para este propósito (Chow 1988). Si los valores se distribuyen uniformemente entre 0 y 100% de probabilidad, se deben crear  $n + 1$  intervalos,  $n - 1$  entre los puntos de datos y 2 en los extremos. Este método gráfico simple se expresa mediante una ecuación (2-14) que indica la probabilidad de excedencia del  $m$ -ésimo valor,  $x_m$ .

$$P(X \geq x_m) = \frac{m}{n+1} \quad (2-14)$$

De modo que su inversa indica un periodo de retorno un año mayor que el periodo del registro máximo indicado según la ecuación (2-15).

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (2-15)$$

Donde:

$n$ : número total de valores de la muestra

$T$ : periodo de retorno

$m$ : es la posición de un valor en una lista ordenada por magnitud decreciente

### 2.5.6 Test de bondad de ajuste Kolmogórov-Smirnov

Esta prueba estadística se utiliza para determinar si un conjunto de datos sigue una distribución de probabilidad específica. Se basa en la comparación de la función de distribución acumulada de datos observados  $S_n(x)$  con la función de distribución teórica  $F(x)$ . En la prueba se calcula la máxima diferencia entre las dos funciones de distribución acumulada, lo que se conoce como estadístico  $D_n$  de Kolmogórov-Smirnov, según la ecuación (2-16).

$$D_n = \max_x |F(x) - S_n(x)| \quad (2-16)$$

Si la diferencia es menor al valor crítico  $D_{n,\alpha}$  entonces  $P(D_n \leq D_{n,\alpha}) = 1 - \alpha$  se puede utilizar la hipótesis nula de que la muestra proviene de una distribución teórica específica, y los datos se ajustan a  $F(x)$  (Berger and Zhou 2014). De igual manera en base a la definición dada anteriormente se deduce lo establecido en la ecuación (2-17).

$$P(|F(x) - S_n(x)| \leq D_{n,\alpha}, \forall x) \quad (2-17)$$

Por lo tanto  $S_n(x) \pm D_{n,\alpha}$  proporciona un intervalo de confianza para  $F(x)$ .

## 2.6 Validación y ajuste de datos de precipitación

### 2.6.1 Curva doble masa

El uso de la curva doble masa descrita en el manual de hidrología de (Searcy and Hardison 1960) permite revisar la consistencia de datos. Este proceso valida los datos para su aplicación en diferentes procesos siendo un punto de partida para el análisis de registros largos. Dicha validación se la realiza de forma gráfica representando los valores acumulados de lluvia a lo largo de un periodo definido de tiempo. Por lo tanto,

la curva doble masa consiste en graficar los valores acumulados de una variable con respecto a los valores acumulado de otra variable, siendo en este caso los registros procesados mensuales de las tres estaciones pluviométricas con las que se cuenta.

La teoría detrás del uso de la curva doble masa indica que una representación gráfica de una cantidad acumulada frente a otra durante un mismo periodo de tiempo dará como resultado una línea recta. Este resultado se obtendrá siempre y cuando los datos sean proporcionales siendo la pendiente de la recta la constante de proporcionalidad entre los datos de precipitación analizados. Una ruptura en la pendiente de la curva doble masa indica un cambio en la proporcionalidad en las variables o que esta no es constante (Searcy and Hardison 1960). El trazar las cantidades acumuladas de una variable, frente a las acumulaciones de un patrón compuestos por registros similares de la zona, permite obtener mejores resultados (Merriam 1937).

A lo largo de los años de registro las mediciones de un pluviómetro pueden variar gradualmente debido al crecimiento de árboles, la diferencia de altura y al verse sujetos a diferentes fenómenos meteorológicos (Searcy and Hardison 1960). De igual manera los registros pueden presentar rupturas debido a la carencia de datos o falencias en su procesamiento. Por tal motivo se debe considerar estos aspectos al momento de generar un patrón ya que se requiere la disponibilidad de varias estaciones que se encuentren en una zona lo suficientemente pequeña y en donde la influencia de las condiciones meteorológicas sean las mismas (Searcy and Hardison 1960).

### **2.6.2 Datos faltantes**

En caso de presentarse interrupciones en la pendiente de la curva doble masa para los datos de una estación estos podrán ser ajustados con base en otro conjunto de datos proveniente de una estación aledaña. Cabe recalcar que este ajuste solo será posible si se ha determinado la razón de la interrupción en los registros. El periodo de registro en el ajuste está en función del uso que se dará a los datos de precipitación y se recomienda ser conservador buscando preferiblemente ajustes insuficientes a uno excesivo (Searcy and Hardison 1960).

Si las interrupciones en la pendiente de la curva doble masa no es causada por factores meteorológicos sino a la ubicación, la exposición o los métodos de observación el ajuste se lo puede realizar a partir de coeficientes obtenidos con el uso de la curva doble masa (Searcy and Hardison 1960). La metodología de la curva doble masa no se recomienda para el ajuste de precipitaciones diarias o de tormenta pero si es factible su uso para la interpolación de datos mensuales faltantes aplicando datos de estaciones adyacentes

(Paulhus and Kohler 1952). El ajuste se lo realiza mediante el método de la razón normal la cual aplica la formulación indicada por la ecuación (2-18).

$$P_a = \frac{b_a}{b_o} P_o \quad (2-18)$$

Donde:

$P_a$  = Precipitación ajustada

$P_o$  = Precipitación registrada

$b_a$  = Pendiente del gráfico al que se ajustaran los datos

$b_o$  = Pendiente del gráfico de precipitación registrada

## 2.7 Modelación hidrológica lluvia-escorrentía

### 2.7.1 Exceso de precipitación y escorrentía directa

El exceso de precipitación, también conocido como precipitación efectiva, se refiere a la cantidad de lluvia que no se retiene en la superficie ni se infiltra en el suelo. En lugar de eso, fluye directamente sobre la superficie de la cuenca y se convierte en escorrentía en la salida de la cuenca (Chow 1988).

Para representar este flujo de escorrentía, se utiliza un hidrograma de caudal, el cual es una representación gráfica que muestra la tasa de flujo de agua en función del tiempo (ver. Figura 2-2). El hidrograma de caudal proporciona información sobre las características fisiográficas y climáticas que influyen en las relaciones entre la lluvia y la escorrentía en una cuenca de drenaje específica (Chow 1988).

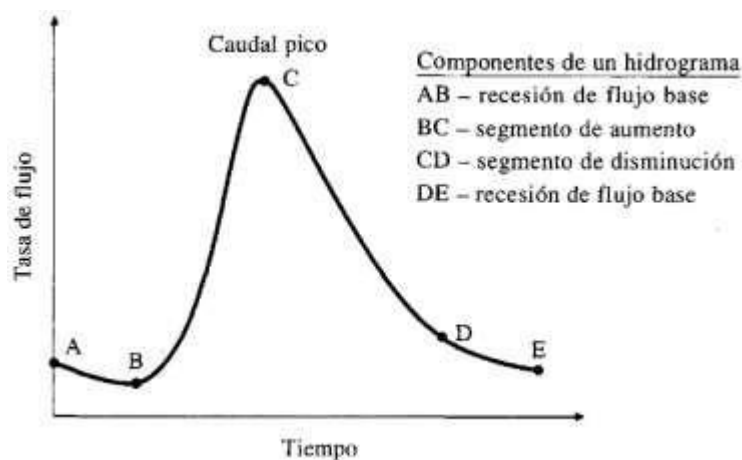


Figura 2-2. Hidrograma de caudal durante una tormenta. Fuente:(Chow 1988)

Obtener el hidrograma de escorrentía por medio de la modelación lluvia-escorrentía es una herramienta valiosa para el estudio y predicción de los flujos de detritos, como el lodo y los sedimentos transportados por el agua. Estos flujos se producen en áreas con pendientes pronunciadas durante eventos de lluvia intensa. Los modelos de lluvia-escorrentía permiten simular la interacción entre la lluvia, la topografía y las características del suelo, lo que facilita la predicción de la generación y el transporte de sedimentos para la ocurrencia del flujo de detritos (Gregoretti and Fontana 2008).

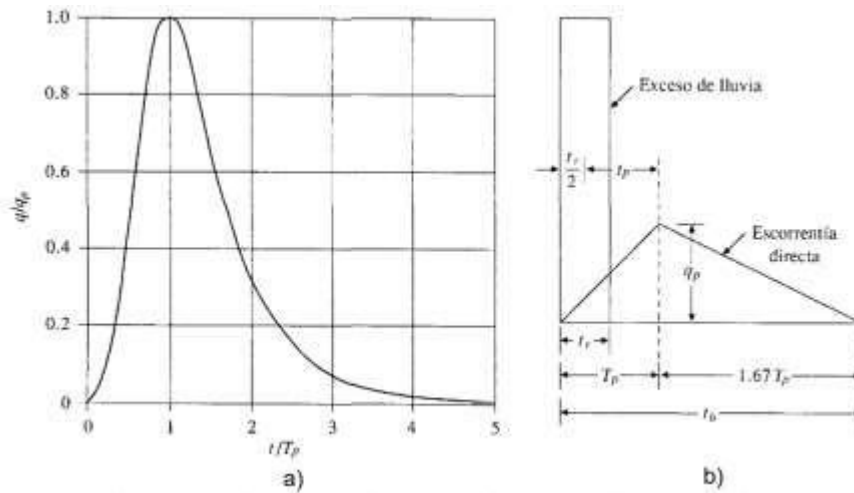
En la mayor parte de problemas hidrológicos, el hidrograma de caudal no se encuentra disponible como ocurre en las microcuencas de estudio en el sector de Marianza. En este caso el hidrograma de caudal de escorrentía se obtiene de la transformación del hietograma de exceso de precipitación. Este se obtiene mediante la diferencia entre el hietograma de lluvia total que se observa y el hietograma de exceso de precipitación se conoce como pérdidas o abstracciones. Las pérdidas son generalmente agua absorbida por infiltración con algo de intercepción y agua de almacenamiento superficial (Chow 1988).

Con esta representación se obtienen las descargas pico de hidrogramas de caudal de escorrentía y en base a investigaciones se puede relacionar la descarga crítica necesaria para movilizar sedimentos en un cauce (Gregoretti and Fontana 2008). Con lo que se puede entender la envergadura de los eventos de precipitación y su influencia en el transporte de sedimentos que conducen a flujos de detritos.

El caudal de escorrentía se convierte en un factor desencadenante en la ocurrencia de flujos de detritos en microcuencas de montaña. Su entendimiento contribuye a una mayor comprensión del comportamiento de las quebradas en estas microcuencas y a la gestión adecuada de las mismas, con el objetivo de reducir el daño y mejorar la planificación y gestión de áreas expuestas a riesgos asociados a estos fenómenos. (Pastorello et al. 2020).

### **2.7.1 Transformación exceso de precipitación - escorrentía Hidrograma Adimensional SCS**

El hidrograma adimensional del SCS es una representación gráfica en forma de hidrograma unitario sintético, en el cual el caudal  $q$  se expresa en relación al caudal pico  $q_p$  y el tiempo  $t$  se expresa en relación al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario  $T_p$  según se observa en la Figura 2-3a (Chow 1988). Este enfoque permite estandarizar y comparar la respuesta hidrológica de diferentes cuencas al normalizar los valores de caudal y tiempo en función de sus respectivos picos.



**Figura 2-3.** Hidrogramas unitarios sintéticos del SCS. a) Hidrograma adimensional, b) hidrograma unitario triangular. Fuente: (Chow 1988)

Los valores de  $q_p$  y  $T_p$  pueden estimarse empleando un modelo simplificado de un hidrograma unitario triangular (ver. Figura 2-3b), donde el tiempo esta dado en horas y el caudal en  $m^3/s$ . Con base a investigaciones el SCS sugiere que el tiempo de recesión puede aproximarse como  $1.67T_p$  (Chow 1988). Como el área bajo el hidrograma unitario debe ser igual a una escorrentía directa de 1 cm, esta consideración hace válida la ecuación (2-19).

$$q_p = \frac{2.08A}{T_p} \tag{2-19}$$

Donde:

A: área de drenaje de la unidad hidrográfica en  $Km^2$ .

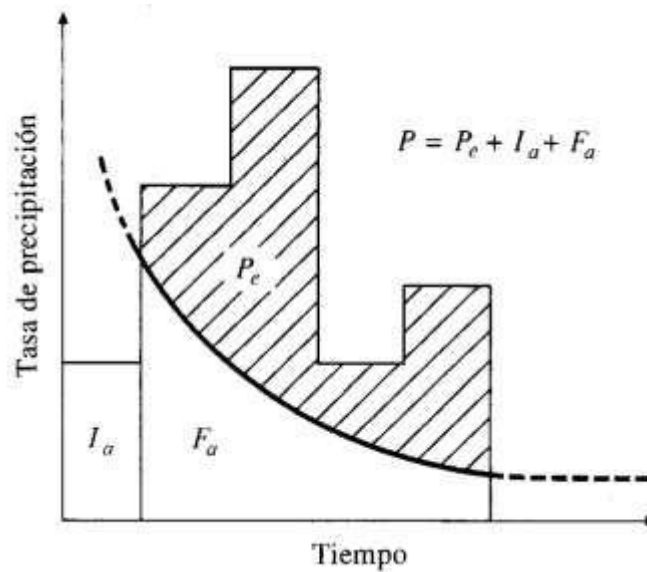
Adicionalmente, estudios de hidrogramas unitarios de muchas cuencas rurales grandes y pequeñas indica que el tiempo de retardo (Lag-time)  $t_p \approx 0.6T_c$  (Chow 1988). El tiempo de ocurrencia del pico  $T_p$  puede expresarse en términos del tiempo de retardo  $t_r$  y de la duración de la lluvia efectiva  $t_r$  cómo se establece en la ecuación (2-20).

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \tag{2-20}$$

### 2.7.2 Abstracciones Método SCS número de curva

El método desarrollado por el SCS calcula las abstracciones de precipitación durante una tormenta. Se basa en la hipótesis que la cantidad de escorrentía directa  $P_e$  es menor o igual a la cantidad de precipitación total  $P$ . De igual manera, después que la escorrentía inicia, la cantidad adicional de agua retenida en la cuenca es  $F_a$  la cual es

menor o igual a la retención potencial  $S$  (ver. Figura 2-4).  $I_a$  representa las abstracciones iniciales antes del encharcamiento correspondientes a las pérdidas por las cuales no ocurrirá escorrentía. Luego que se haya superado este umbral la escorrentía potencial corresponde a  $P - I_a$  (Chow 1988).



**Figura 2-4.** Método SCS: P: precipitación total, la abstracciones iniciales,  $F_a$ : abstracción continuada,  $P_e$ : exceso de precipitación. Fuente: (Chow 1988)

El método se basa en relacionar cantidades potenciales similares según lo establece la ecuación (2-21).

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (2-21)$$

Con el cual aplicando el principio de continuidad la precipitación total es equivalente a:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2-22)$$

Si se combinan las ecuaciones (2-21) y (2-22) se obtiene la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2-23)$$

A su vez, base a estudios empíricos para muchas cuencas pequeñas se desarrolló la ecuación empírica (2-24).

$$I_a = 0.2S \quad (2-24)$$

Finalmente reemplazando las ecuaciones (2-23) y (2-24) se obtiene:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \tag{2-25}$$

Para calcular el potencial de retención  $S$  se emplea la ecuación(2-26).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{2-26}$$

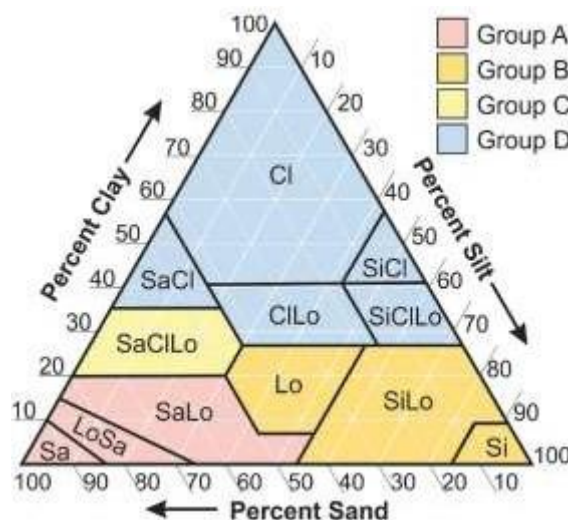
Donde:

$CN$ : Número de curva (Adimensional)

El valor del número de curva se encuentra en el rango de  $[0 - 100]$  permitiendo representar superficies impermeables o superficies de agua con  $CN = 100$  y superficies naturales con un  $CN < 100$  (Chow 1988). La elección del valor del  $CN$  depende de varios factores los mismos que se tratarán posteriormente.

### 2.7.2.1 Clasificación Grupo Hidrológico del Suelo HSG

La clasificación de suelos por grupo hidrológico cataloga los suelos según sus características relacionadas con el agua, como su capacidad de retención, drenaje y transporte. Se consideran factores como la textura, estructura, porosidad y permeabilidad del suelo (NRCS 2007). El sistema más común utilizado es el establecido por el Natural Resources Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (NRCS) anteriormente denominado SCS, que clasifica los suelos en cuatro grupos hidrológicos principales.



**Figura 2-5.** Triángulo de texturas del suelo del USDA adoptado en el conjunto de datos SoilGrids250m y el conjunto reducido de grupos hidrológicos del suelo utilizado en este estudio (Sa = arena; Lo = marga; Cl = arcilla; Si = limo). Fuente: (Wang and Feddema 2020)



Grupo A: Son suelos bien drenados con alta infiltración y baja retención de agua. Estos suelos tienen una textura más arenosa o franca, lo que permite un rápido movimiento del agua a través del perfil del suelo. Los suelos de este grupo tienen un bajo potencial cuando está completamente mojado. El agua se transmite libremente a través del suelo, generalmente corresponden a suelos profundos, arena profunda, depositados por el viento, limos agregados (NRCS 2007).

Grupo B: Suelos moderadamente drenados con una capacidad de infiltración y retención de agua moderada. Estos suelos suelen tener una textura más franca o arcillosa, lo que resulta en una infiltración y drenaje más lentos. Generalmente corresponden a suelos pocos profundos depositados por el viento, marga arenosa (NRCS 2007).

Grupo C: Suelos mal drenados con una baja infiltración y alta retención de agua. Estos suelos suelen tener una textura más arcillosa o limosa, lo que dificulta el movimiento del agua y puede resultar en encharcamientos o saturación del suelo. Corresponden a Margas arcillosas, margas arenosas poca profunda, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenido de arcilla (NRCS 2007).

Grupo D: Suelos muy mal drenados con una infiltración mínima y una alta retención de agua. Estos suelos suelen tener una alta proporción de arcilla y materia orgánica, lo que resulta en un movimiento extremadamente lento del agua y condiciones de saturación prolongadas. Corresponden a suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos (NRCS 2007).

La Tabla 2-3 proporciona una síntesis de las características de infiltración y textura definidas previamente por el (NRCS) para los diversos grupos hidrológicos de suelos. Que se empleó para la caracterización de los suelos en el sector Marianza. Además, la Figura 2-5 ilustra gráficamente estas características utilizando el triángulo de texturas como referencia.

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76mm/h	Arenoso, Franco-Arenoso, Arenoso-Limoso
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38mm/h	Franco, Franco-Limoso, Limoso
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13mm/h	Franco-Arcilloso-Arenoso
D	Muy Lenta	Baja capacidad de infiltración < 13 mm/h	Arcilloso-Arenoso Arcilloso Franco-Arcilloso, Arcilloso-Limoso Franco-Arcilloso-Limoso

**Tabla 2-3.** Grupo hidrológico del suelo. Fuente: (NRCS 2007)

### 2.7.2.2 Condiciones antecedentes de humedad (AMC)

La implementación del método SCS requiere una estimación de las condiciones antecedentes de humedad (AMC) tanto para la cubierta superficial de la cuenca como para los suelos. Sin embargo, establecer las AMC no es un proceso simple y la elección de los métodos a utilizar depende del propósito de la aplicación. Los enfoques pueden variar según si se están simulando eventos individuales o de diseño, y si se realiza un análisis con o sin datos de aforo. En el caso de la simulación de eventos individuales, el análisis calibrado es comúnmente utilizado, ya que las AMC se utilizan como parámetros ajustables para mejorar la concordancia entre el hidrograma observado y el hidrograma pronosticado (US. Army Corps of Engineers 1994).

Históricamente, se asumía que las curvas de número de curva (CN) superior e inferior estaban relacionadas con las condiciones húmedas (AMC III) y secas (AMC I) del suelo de la cuenca, mientras que la curva media se asociaba a condiciones de humedad del suelo promedio (AMC II). El CN se relacionaba entonces con la precipitación antecedente de 5 días (US. Army Corps of Engineers 1994). La clasificación de las condiciones antecedentes de humedad está definida en la Tabla 2-4.

Condición (AMC)	Lluvia total antecedente de 5 días.	
	En periodo Húmedo (Durante la dormancia)	En periodo seco (Durante el crecimiento)
AMC I	Menos de 12.5 mm	Menos de 35.5 mm
AMC II	De 12.5 mm a 28 mm	De 35.5 mm a 53 mm
AMC III	Más de 28 mm	Más de 53 mm

Tabla 2-4. Condición antecedente de humedad (AMC) para el método SCS.  
Fuente: (SCS 1972)

### 2.7.2.3 Número de Curva (CN)

El número de curva (CN) de una cuenca puede estimarse en función del uso de suelo, el tipo de suelo y la humedad previa de la cuenca, utilizando las tablas publicadas por el SCS. Para una cuenca que consiste en varios tipos de suelo y usos de la tierra. Un CN compuesto se calcula en base a la expresión de la ecuación (2-27).

$$CN_{compuesta} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (2-27)$$

Donde:

$CN_{compuesta}$ : número de curva compuesta empleada para el cálculo del volumen de escorrentía.

$i$ : índice de subdivisiones de cuencas hidrográficas de uso del suelo y tipo de suelo uniformes.

$CN_i$ : número de curva para una subdivisión  $i$  de una cuenca hidrográfica

$A_i$ : área de drenaje para una subdivisión  $i$  de una cuenca hidrográfica

A continuación, se adjunta la Tabla 2-5 extraída del informe Urban Hydrology for Small Watersheds (Hidrología urbana para cuencas pequeñas) del SCS ahora (NRCS) donde se proporciona estimaciones del número de curva en función del grupo hidrológico de suelo (HSG), el tipo de cubierta, tratamiento, condición de escorrentía y condiciones antecedentes de humedad.

Descripción de cobertura		Número de curva para distintos grupos hidrológicos de suelo			
		A	B	C	D
Tipo de cobertura	Condición Hidrológica				
Pastos, praderas o pastizales continuos, forraje para pastoreo. <sup>2</sup>	Mala	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Praderas: hierba continua, protegida del pastoreo y generalmente segado para heno. <sup>3</sup>	-	30	58	71	78
Mezcla de matorral, maleza y hierba con matorral como elemento principal. <sup>4</sup>	Mala	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Buena	30	48	65	73
Combinación bosque-hierba (huerto o explotación forestal). <sup>5</sup>	Mala	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques. <sup>6</sup>	Mala	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	30	55	70	77
Fincas-edificios, caminos, calzadas y lotes circundantes.	-	59	74	82	86
Carreteras de tierra	-	72	82	87	89
Carreteras pavimentadas	-	74	84	90	92
1	Condiciones de escorrentía promedio, y $I_a=0.2S$				
2	<b>Mala:</b>	<50% cubierta vegetal o muy pastoreada sin mantillo			
	<b>Regular:</b>	50 a 75% de cubierta vegetal y poco pastoreo.			

	<b>Buena:</b>	> 75% Cubierta vegetal y pastoreo ligero u ocasional.
3	<b>Mala:</b>	<50% de cobertura del suelo.
	<b>Regular:</b>	50 a 75% de cobertura del suelo.
	<b>Buena:</b>	>70% de cobertura del suelo.
4	El número de curva real es inferior a 30; utilice CN = 30 para los cálculos de escorrentía.	
5	Los CN indicados se han calculado para zonas con una cubierta forestal del 50% y una cubierta herbácea (pastos) del 50%. Pueden calcularse otras combinaciones de condiciones	
6	<b>Mala:</b>	La hojarasca, los árboles pequeños y la maleza son destruidos por el pastoreo intenso o las quemadas periódicas.
	<b>Regular:</b>	Los bosques son pastoreados, pero no quemados, y algo de hojarasca cubre el suelo.
	<b>Buena:</b>	Los bosques están protegidos del pastoreo, y la hojarasca y la maleza cubren adecuadamente el suelo.

**Tabla 2-5.** Número de curva (CN) para otros tipos de suelos agrícolas. Condiciones antecedentes de humedad tipo II. Fuente: (USDA 1986)

Los números de curva que se muestran en la Tabla 2-5 corresponden condiciones antecedentes de humedad (AMC II) normales. Para condiciones secas (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curva se calculan en base a las ecuaciones (2-28) y (2-29) según lo establecido por (Chow 1988).

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (2-28)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (2-29)$$

### 2.7.3 Precipitación

La precipitación es el punto de partida para el diseño de un sistema hidrológico por lo que es fundamental seleccionar una tormenta de diseño ya que esta conforma la entrada del sistema. La tormenta de diseño corresponde a un patrón de precipitación definido a utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico y está definida mediante un valor de profundidad de precipitación puntual (Chow 1988). La distribución temporal de la precipitación durante una tormenta se indica mediante el uso de un hietograma de diseño obtenido a partir de los registros disponibles. La tormenta de diseño puede determinarse con base en el registro histórico de precipitaciones en una zona o su vez construirse a partir de características generales de precipitación en regiones adyacentes (Chow 1988). Para el cálculo de precipitación en la microcuenca de Marianza es necesario considerar la distancia desde las estaciones de registro y la distribución de precipitación promedio en un área.

La influencia en la distancia se la consideró mediante el método del inverso de la distancia permitiendo calcular la precipitación puntual en las microcuencas de análisis al ponderar los registros de las diferentes estaciones. Esto se consigue puesto que la influencia de la precipitación en una estación está relacionada con el inverso de la distancia de estaciones cercanas (Chow 1988). La ecuación (2-30) muestra la formulación del método.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{D_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^2}} \tag{2-30}$$

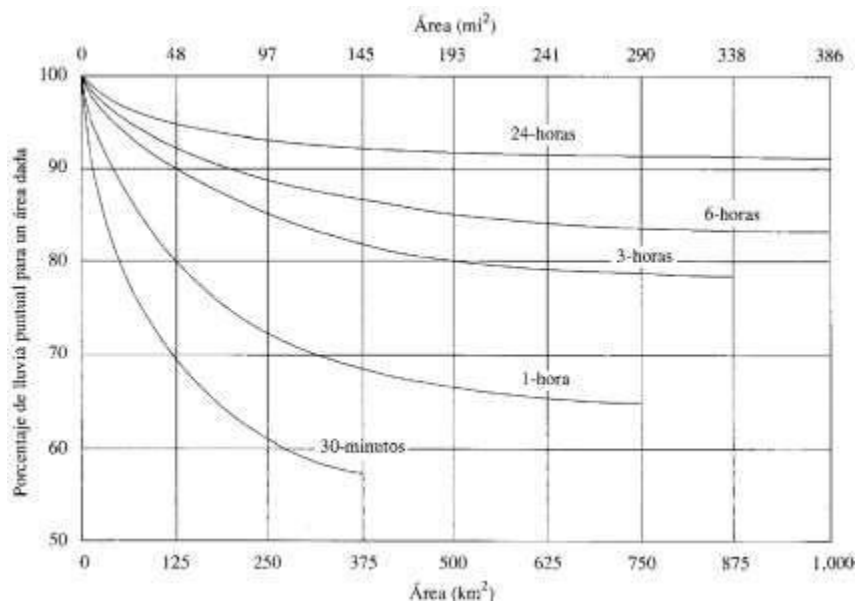
En donde:

$R$  = Valor de precipitación obtenido para el punto no pluviométrico

$P_i$  = Precipitación registrada en la estación

$D_i$  = Distancia entre la estación y el punto no pluviométrico

Del mismo modo y con la finalidad de estimar la profundidad promedio de precipitación sobre un área se han aplicado estimativos de precipitación puntual debido a la carencia de información sobre la distribución de probabilidad para precipitación sobre áreas (Chow 1988). Con base a la Figura 2-6 la cual indica un porcentaje de reducción según el área de la cuenca analizada para una cierta duración, se ha definido un porcentaje de reducción para la precipitación puntual calculada con el método del inverso de la distancia.



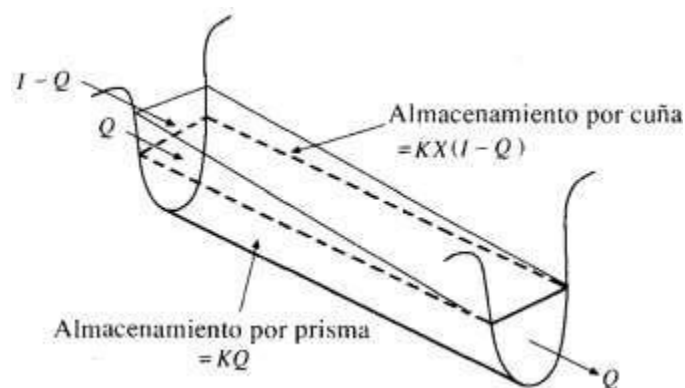
**Figura 2-6.** Curvas profundidad - área para reducir precipitación puntual para valores promedio de área. Fuente: (U. S. Weather Bureau 1958)

### 2.7.4 Flujo Base

Se conoce como flujo base al flujo de escorrentía existente que presenta pocas variaciones en los periodos sin precipitaciones. Cuando existe un flujo continuo, este representa la mayor parte de la capacidad de la cuenca indicando que una gran porción de la precipitación en la cuenca se infiltra y posteriormente llega al cauce como flujo subsuperficial (Chow 1988).

### 2.7.5 Modelo de tránsito hidrológico de ríos

El tránsito hidrológico en ríos presenta varios métodos de análisis, uno de estos es el método de Muskingum el cual permite modelar el almacenamiento volumétrico de creciente en un canal mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma (Chow 1988) tal como se muestra en el esquema de la Figura 2-7.



**Figura 2-7.** Esquema de almacenamiento por prisma y cuña en un tramo de canal.  
Fuente: (Chow 1988)

Al suponer que el área de la sección transversal del flujo de creciente es directamente proporcional al caudal de la sección se tiene que el volumen de almacenamiento del prisma corresponde a  $KQ$  (Chow 1988). Mientras que el volumen de almacenamiento por cuña es igual a  $KX(I - Q)$ , en donde el  $X$  puede tomar valores dentro de un rango de entre 0 y 0.5  $KX(I - Q)$ . Por lo tanto, el almacenamiento total corresponde a la suma de estos dos componentes como lo indica la ecuación (2-31).

$$S_a = KQ + KX(I - Q) \quad (2-31)$$

En donde:

$S_a$  = Volumen de almacenamiento total

$X$  = Factor de ponderación

$K$  = Factor de proporcionalidad

$I$  = Datos de caudal de entrada

$Q$  = Datos de caudal de salida

Para corrientes naturales el valor del factor de ponderación  $X$  esta entre 0 y 0.2, con un valor medio de aproximadamente 0.2. Cabe recalcar que la determinación de  $X$  no requiere de precisión ya que el resultado es relativamente insensible a este factor (Chow 1988). Por otra lado el factor de proporcionalidad  $K$  corresponde al tiempo de tránsito de una onda de creciente a través de tramo de canal (Chow 1988).

### 2.7.6 Tiempo de Concentración ( $T_c$ )

El tiempo de concentración ( $T_c$ ) se define como el intervalo de tiempo necesario para que la esorrentía viaje desde el punto más lejano hidráulicamente de una cuenca hasta su desembocadura. También representa el momento en el cual toda la cuenca comienza a contribuir con flujo de esorrentía. Este parámetro está influenciado por la forma, pendiente y longitud del cauce principal de la cuenca (US. Army Corps of Engineers 1994).

Existen numerosos métodos disponibles para calcular este parámetro, y uno de los más utilizados es el método de Kirpich, desarrollado en 1940. Este método, originalmente desarrollado para cuencas hidrográficas pequeñas con superficies de 0.0051-0.433 km<sup>2</sup> y calibrado con seis cuencas en Tennessee, Estados Unidos (Chow 1988). Esta formulación resulta adecuada para su aplicación en microcuencas en el sector de Marianza. La ecuación (2-32) establece los parámetros de cálculo para el  $T_c$  expresado en minutos.

$$T_c = 0.0195L^{0.77}s^{-0.385} \quad (2-32)$$

Donde:

$L$ : longitud del cauce principal expresada en Km

$s$ : pendiente promedio de la cuenca expresada en m/m

### 2.7.7 Modelación mediante HEC-HMS

El Sistema de Modelación Hidrológico (HMS) es un programa desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de Estados Unidos que permite simular los procesos de lluvia-esorrentía para cuencas detríticas. El software permite modelar tanto eventos independientes como eventos continuos (Timbe et al. 2019) y abarca la resolución de una amplia gama de problemas en diversas zonas geográficas con diferentes características. Entre las aplicaciones del programa se encuentra la hidrología de grandes cuencas fluviales, así como la esorrentía para microcuencas naturales y

urbanas (Bartles et al. 2022). El programa obtiene hidrogramas los cuales pueden ser utilizados en conjunto para estudios relacionados con el manejo de recursos hídricos.

#### **2.7.7.1 Datos de Terreno**

El programa HEC-HMS cuenta con un componente que permite gestionar la información de elevación y superficie necesaria para delinear la cuenca hidrográfica y generar su modelo. Esto se hace a partir de los datos de terreno los cuales se usan para visualizar el relieve de la cuenca hidrográfica y elaborar mapas base que facilitan la visualización y el entendimiento durante la modelación (Bartles et al. 2022). El programa también cuenta con herramientas para el manejo de información geográfica (GIS) en los modelos. Estas herramientas van ligadas al componente de datos de terreno ya que permiten incluir referencias espaciales a los elementos hidrológicos y delinear cuencas hidrográficas a partir de datos de modelos digitales de terreno.

#### **2.7.7.2 Modelo de Cuenca Hidrográfica**

El componente principal de un proyecto es el modelo de cuenca hidrográfica ya que cumple el objetivo de convertir las condiciones atmosféricas en caudales en puntos específicos de la cuenca de análisis. Este componente permite describir las propiedades físicas de la cuenca hidrográfica, así como la topología de su red de drenaje. La cuenca de análisis se gestiona a través de elementos hidrológicos los cuales permiten dividir a esta en piezas más manejables. Todos estos elementos se conectan con una red dendrítica que conforma la representación del sistema de flujo (Bartles et al. 2022). El mapa base obtenido con el componente de datos de terreno permite dar un contexto espacial a los elementos definidos.

Los elementos hidrológicos son los elementos básicos que constituyen el modelo de cuenca hidrográfica. Cada uno de estos representan los procesos físicos que forman parte de la respuesta total de la cuenca de análisis. El presente trabajo involucra los elementos conocidos como: subbasin, reach, junction y sink. Es en estos componentes donde se definen los parámetros que caracterizan los procesos que ocurren en la cuenca mediante métodos definidos previamente como el método SCS, Muskingum entre otros.

#### **2.7.7.3 Modelo Meteorológico**

El componente de modelo meteorológico describe las condiciones de contorno que actúan en la cuenca de análisis durante la simulación, es decir, corresponde al como la información meteorológica es ingresada en el modelo (Bartles et al. 2022). La información ingresada puede ser aplicada a uno o varios modelos de cuenca, así como



a sus subelementos. Es crucial especificar como la precipitación será aplicada a cada modelo y la fuente de los datos a ser utilizada. Dichos datos serán ingresados a través del gestor de datos de series temporales.

#### **2.7.7.4 Gestor de Datos de Series Temporales**

La simulación hidrológica requiere de una gran cantidad de datos ya sea de precipitación o caudal. Estos datos pueden ser utilizados con diferentes fines entre los cuales se destaca la estimación de la lluvia promedio en un área o la calibración de un modelo hidrológico para su optimización (Bartles et al. 2022). Además, los datos ingresados trabajan como condiciones iniciales, condiciones de contorno o parámetros. El gestor de datos administra el ingreso de series temporales con datos de diferente duración o tipo.

#### **2.7.7.5 Especificaciones de Control**

El componente de especificaciones de control es esencial al momento de realizar las simulaciones dentro del programa. Este componente como tal no contiene información acerca de los parámetros utilizados y la información ingresada. Sin embargo, su función es la de controlar cuando se da inicio y fin a las simulaciones, así como también el intervalo de tiempo de análisis en la simulación (Bartles et al. 2022). De igual forma integra los diferentes componentes previamente mencionados a ser utilizados en la obtención de resultados.

### **2.8 Mapeo de susceptibilidad de flujo de detritos mediante el método Rock Engineering Systems (RES)**

El concepto Rock Engineering Systems (RES) introducido por (Hudson and Harrison 1992) es un método para estructurar todas las formas en que los parámetros y variables de la mecánica de rocas pueden afectarse mutuamente (Faramarzi et al. 2013). En recientes investigaciones se aplicó RES para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos (Bonetto et al. 2021; Vianello et al. 2022). Para ello se crea una matriz de interacción que resume los parámetros geológicos, geotécnicos y geomorfológicos clave que influye en los flujos de detritos y cuantifica sus interacciones mutuas para evaluar la susceptibilidad a los flujos de detritos de una cuenca.

La matriz de interacción es la base para el enfoque RES, los parámetros seleccionados se distribuyen en términos de la diagonal principal  $P_i$  y sus interacciones se cuantifican fuera de la diagonal  $I_{ij}$ . El número de interacciones de los parámetros principales está dada por el número de filas multiplicado por el número de columnas, menos el número de parámetros (Santander 2019).

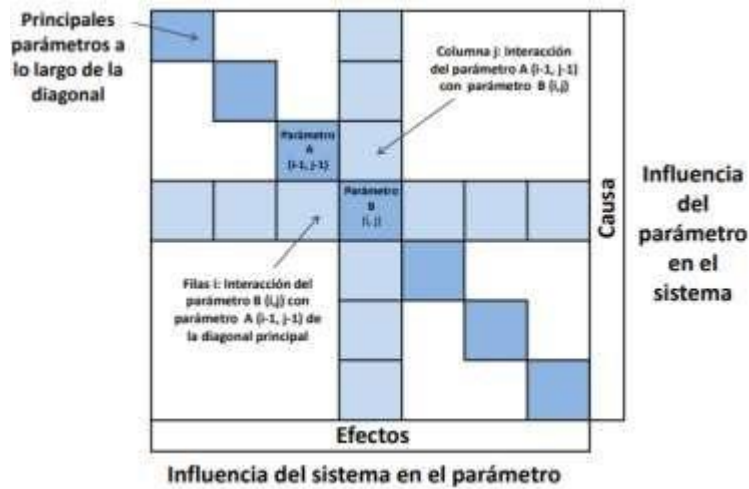


Figura 2-8. Parámetros principales de la matriz. Fuente: (Santander 2019)

En la Figura 2-8 el parámetro  $B_{i,j}$  de la matriz corresponde a uno de los parámetros principales de la diagonal. La fila que pasa por el parámetro  $B_{i,j}$  representa la influencia del parámetro  $B_{i,j}$  en los demás parámetros del sistema de la matriz, y su suma se denomina causa (C). Por el contrario, la columna que pasan a través del parámetro  $B_{i,j}$  representa la influencia de los demás parámetros del sistema de la matriz, en el parámetro  $B_{i,j}$  y su adición se denomina efecto (E) (Santander 2019). Es así que C representa la forma en la que  $P_i$  afecta al sistema y E representa el efecto que este sistema tiene sobre  $P_i$  (Bonetto et al. 2021).

En lo que respecta a la interacción de los parámetros principales de la matriz de interacción, se lo realiza en el sentido de las manecillas del reloj. Los resultados de interacción del parámetro  $A_{i-1,j-1}$  con parámetro  $B_{i,j}$ , no necesariamente puede ser iguales a los parámetros de interacción del parámetro  $B_{i,j}$  con el parámetro  $A_{i-1,j-1}$  (ver. Figura 2-9).

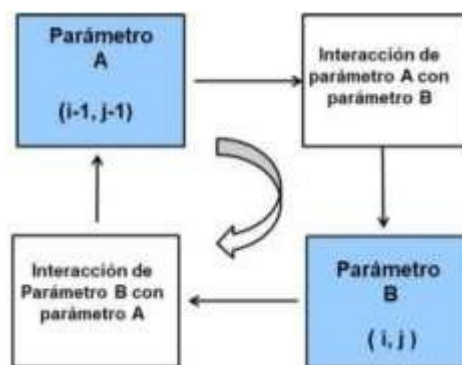


Figura 2-9. Interacción de los parámetros. Fuente: (Santander 2019)

Los términos fuera de la diagonal principal de la matriz de interacción son asignados en base a las investigaciones de Bonetto et al. (2021) donde se emplea el método

codificado Experto Semi-Cuantitativo (ESQ) para cuantificar los valores de interacciones entre los principales parámetros condicionantes. Este método emplea una escala de calificación del 0 al 4, donde 0 indica ninguna interacción, 1 indica interacción débil, 2 indica interacción media, 3 indica interacción fuerte, y 4 indica interacción crítica.

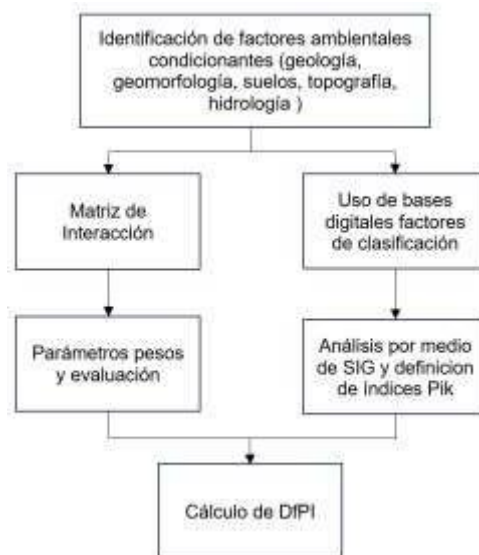
Una vez definidos C y E, el siguiente paso consiste en calcular el índice  $a_i$  el cual corresponde a la contribución de cada parámetro al desencadenamiento del flujo de detritos y se encuentra dado por la ecuación (2-33).

$$a_i = \frac{1}{4} \left[ \frac{C_i + E_i}{\sum_{i=1}^n C_i + \sum_{i=1}^n E_i} \right] \cdot 100 \tag{2-33}$$

El índice de susceptibilidad a flujo de detritos ( $DfPI$ ) es dada por la ecuación (2-34) :

$$DfPI = \sum_{i=1}^n a_i \cdot P_{ik} \tag{2-34}$$

Donde  $a_i$  es el coeficiente de ponderación calculado para cada parámetro utilizando la ecuación (2-33) y el valor  $P_{ik}$  describe el peso asignado a cada factor predisponente en función de su propensión a inducir inestabilidad (Mazzoccola and Hudson 1996; Rozos et al. 2008, 2011). El valor de  $P_{ik}$  corresponde a un valor específico entre 0 y 4 atribuido a cada clase de los factores predisponentes identificados. El valor 0 representa las condiciones más estables (menor susceptibilidad a los flujos de detritos), mientras que el valor 4 representa las condiciones más favorables para el desencadenamiento de flujos de detritos (Vianello et al. 2022).



**Figura 2-10.** Diagrama de flujo metodología RES. Fuente: (Bonetto et al. 2021)

Finalmente, el sub-índice  $i$  representan al parámetro condicionante en la ocurrencia de un flujo de detritos y el subíndice  $k$  corresponde al píxel analizado. En la Figura 2-10 se resume el flujo lógico y los pasos principales para evaluar el  $DfPI$ .

El  $DfPI$  basado en el SIG tiene un rango de valores de 0 a 100. Se definieron cinco clases de susceptibilidad: baja (0-20), media (20-40), alta (40-60), muy alta (60-80) y extrema (80-100) (Vianello et al. 2022). A continuación, se escriben los parámetros que intervienen en el análisis de susceptibilidad mediante la metodología RES.

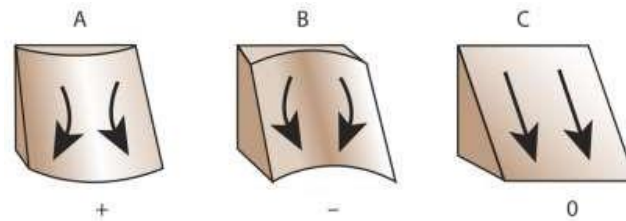
**Geología/Litología:** La litología es uno de los factores condicionantes más decisivos en la ocurrencia de movimientos geodinámicos (Rozos et al. 2008).

**Pendiente:** Es uno de los factores condicionantes capaces de ocasionar flujo de detritos, generalmente uno de los mayores factores al momento de realizar un análisis RES (Vianello et al. 2022).

**Tipo de suelo Hidrológico:** El contenido de arcilla y la permeabilidad en los suelos juega un papel importante en la ocurrencia de flujos de detritos. La arcilla tiene la capacidad de retener agua, lo que puede afectar la estabilidad de la pendiente y la resistencia al flujo (Suárez 1998). Existen estudios experimentales que confirman que el contenido de arcilla en los suelos se vinculan con los flujos de detritos (Chen et al. 2010).

**Distancia red de canal:** Los flujos de detritos son procesos geodinámicos en los cuales el material suelto se desplaza a través de un canal, provocando erosión en el lecho y las paredes de este. La influencia de estos flujos es más notable en las áreas adyacentes al canal, dentro de una distancia aproximada de 200 metros. A medida que esta distancia aumenta, la influencia disminuye debido a la dispersión de la energía del flujo y a la presencia de obstáculos naturales que restringen su alcance (Rozos et al. 2008).

**Curvatura:** Se refiere a la curvatura de una línea que se forma al intersecar un plano con la superficie del terreno. Desde un punto de vista operativo, el valor de la curvatura se define como el inverso del radio de curvatura de la línea (ver. Figura 2-11). En general, los flujos de escombros tienden a originarse en áreas donde la curvatura es cóncava (Suárez 1998) lo que puede dar lugar a la formación de cárcavas donde el flujo se canaliza.



**Figura 2-11.** Curvatura tangencial. A) superficie convexa, B) superficie cóncava, C) superficie plana.  
Fuente: **(Buckley 2010)**

Geomorfología: los flujos de detritos se ven influenciados por la configuración del terreno, el mismo que propicia en el material erosionado sea concentrado y acelerado aguas abajo (Remaître et al. 2011).

Cobertura vegetal y uso de suelo: son variables clave que influyen en la ocurrencia de flujos de detritos. La deforestación y la degradación de la cobertura vegetal aumentan el riesgo, mientras que una cobertura vegetal densa y saludable puede mitigar los efectos de estos eventos (Suárez 1998).

## 2.4 Resumen

En este capítulo se presentan los conceptos fundamentales y las formulaciones utilizadas en este trabajo de investigación. Se informa sobre la parroquia Sayausí y se explica la caracterización geológica y geomorfológica. Se explican los ensayos de laboratorio para la clasificación de suelos de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Además, se explica la metodología empleada para el análisis de lluvias extremas, la modelación utilizando el software HEC-HMS y la aplicación de la metodología RES.

## Capítulo 3

### Materiales y Métodos

#### 3.1 Área de estudio

El área de estudio abarcó una extensión de 300ha correspondientes a la zona UTM 17S con coordenadas 713033m – 7708535m Este y 9686426m – 9682117m Norte. Se seleccionaron dos microcuencas de estudio: la microcuenca Marianza, correspondiente a la microcuenca donde ocurrió el flujo de detritos el 27 de marzo del 2022 y la microcuenca Marianza Aledaña, una microcuenca colindante de montaña. Las dos microcuencas de estudio se sitúan en la comunidad Marianza pertenecientes a la parroquia rural Sayausí y se ubican en la parte noroeste del cantón Cuenca en la provincia del Azuay, Ecuador según se muestra en la Figura 3-1. La zona de estudio presenta un rango de elevación de 2800 – 3800msnm en formaciones montañosas del sur de la cordillera de los Andes que son atravesadas por la vía estatal Cuenca-Molleturo-El Empalme.

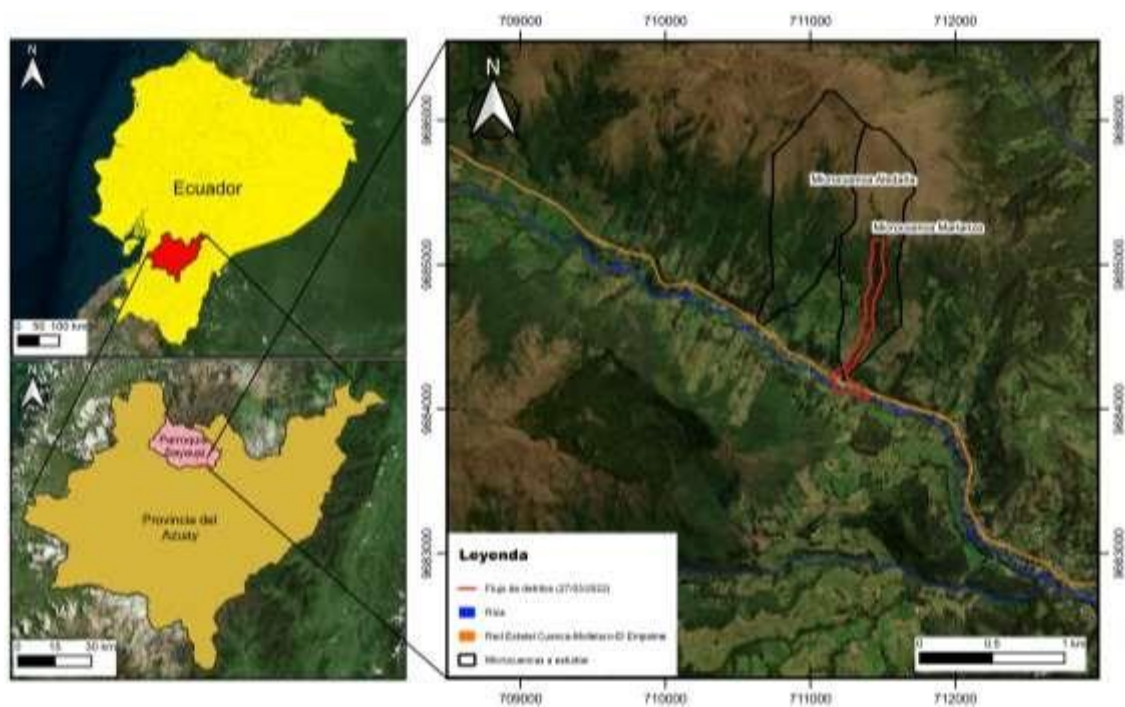


Figura 3-1. Área de estudio sector Marianza, parroquia Sayausí. WGS 84/Zona 17 S. Fuente: Elaboración Propia

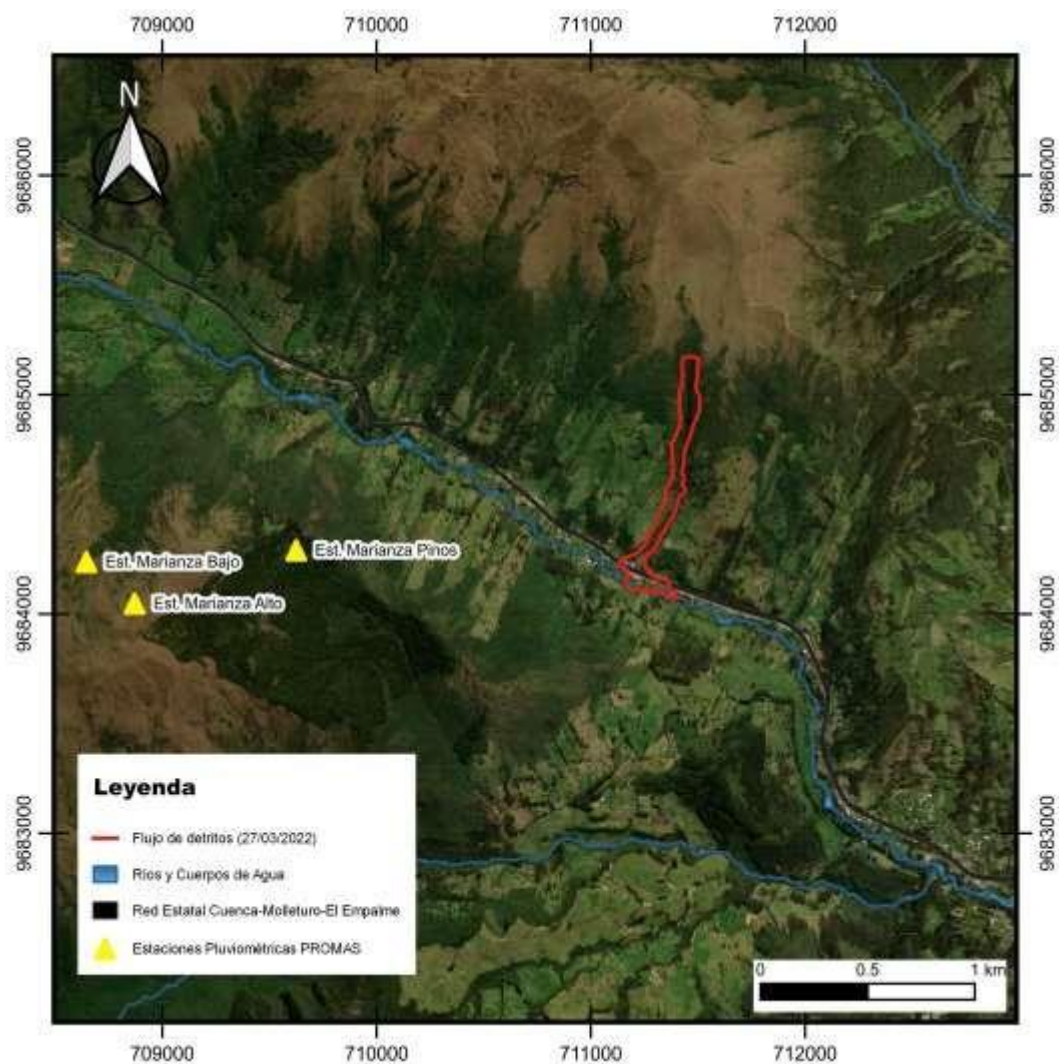
#### 3.2 Información disponible

La información y los datos utilizados para el desarrollo de este trabajo de investigación se recopilaron a través de portales gubernamentales de libre acceso, entidades

públicas, centros de investigación y motores de procesamiento de imágenes satelitales. La descripción de cada uno de ellos se establece a continuación:

### 3.2.1 Datos de lluvia

El Programa para el Manejo del Agua y el Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca dispone de un registro de precipitaciones para el sector Marianza. Dicho registro comprende datos de lluvia instantánea desde el 29 de mayo de 2004 hasta la actualidad. Estos registros se capturan mediante tres estaciones pluviométricas ubicadas en el sector de estudio. Las mismas se denominan: Marianza Alto, Marianza Bajo y Marianza Pinos. La Figura 3-2 muestra su localización, así como la Tabla 3-1 muestra sus especificaciones.



**Figura 3-2.** Ubicación estaciones pluviométricas PROMAS parroquia Sayausí, sector Marianza. WGS 84/ Zona 17S. Fuente: Elaboración Propia

Nombre	Código	Tipo	Serie	Fecha Instalación	X (m)	Y (m)	Z (m.s.n.m)	Estado
Estación Marianza Pinos	PRO-012-PG	RAIN COLLECTOR II DAVIS	750375	29-May-2004	709625	9684292	3363	Funcional
Estación Marianza Bajo	PRO-010-PG	RAIN COLLECTOR II DAVIS	750376	29-May-2004	708646	9684239	3454	Funcional
Estación Marianza Alto	PRO-011-PG	RAIN COLLECTOR II DAVIS	750377	29-May-2004	708871	9684049	3609	Funcional

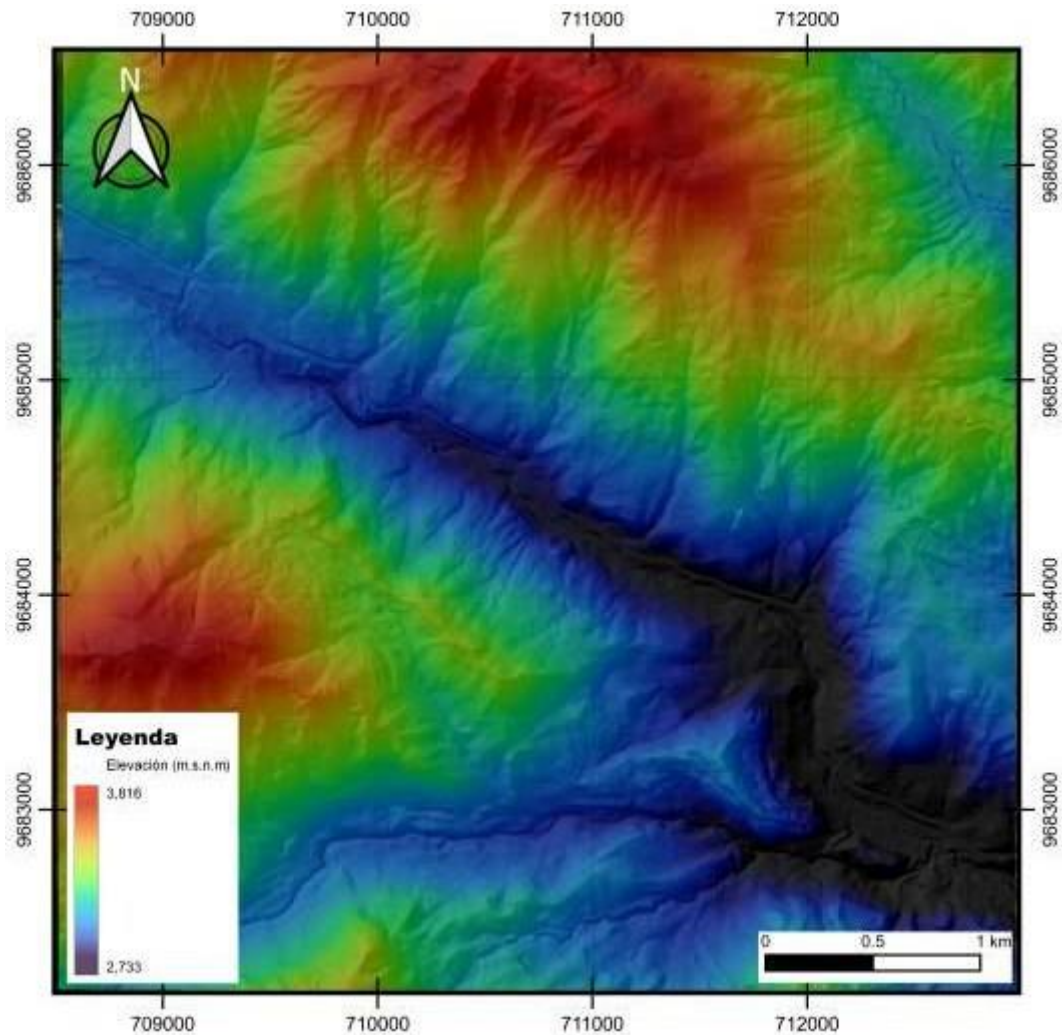
**Tabla 3-1.** Ficha estaciones pluviométricas PROMAS en el sector Marianza.

### 3.2.2 Modelo Digital de Elevación (MDE)

El Modelo Digital de Elevación (MDE) del área de estudio se obtuvo del Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Geológica (SIGTIERRAS) utilizando la herramienta Centro Geomático Virtual disponible en su página web <http://www.sigtierras.gob.ec/centro-geomatico-virtual/>. El MDE descargado en formato *.tiff* dispone de información en 1 banda de la elevación en m.s.n.m en base al sistema de coordenadas SIRGAS1995/UTM 17 S. Los MDE poseen dimensiones de 770x750 píxeles con un tamaño de píxel de 3x3m. El año de elaboración de estos modelos digitales de elevación corresponde al año 2015.

Para mejorar la precisión en la determinación de la red de canales en el área, se realizaron sobrevuelos y se capturaron imágenes empleando un vehículo aéreo no tripulado (VANT) dron DJI Phantom 4, a partir de las cuales se generó un MDE con mayor densidad de puntos, con una resolución de 10x10 cm en las áreas de interés (ver. Figura 3-3).





**Figura 3-3.** Modelo Digital Elevaciones parroquia Sayausí, sector Marianza. WGS 84/Zona 17 S. Fuente: Elaboración Propia

### 3.2.3 Información Geológica

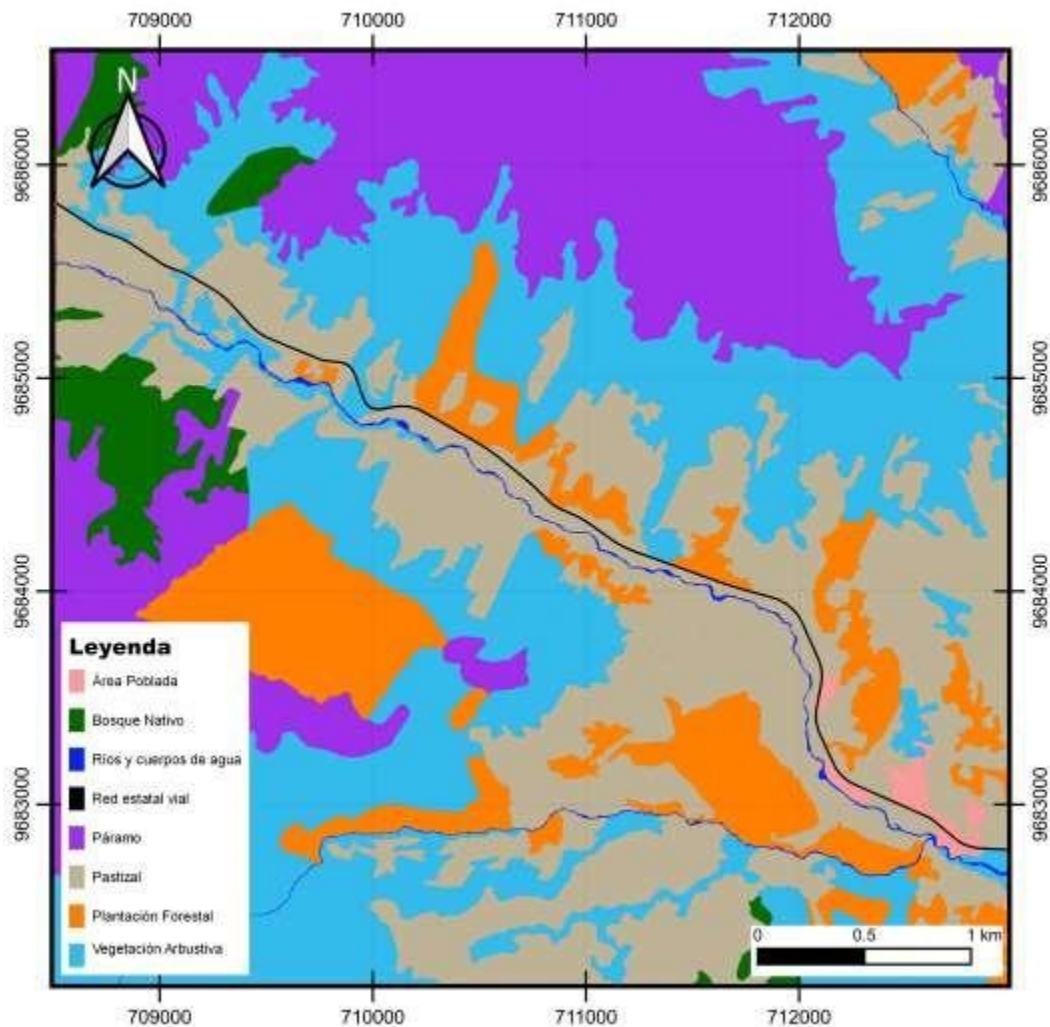
La información geológica del área de estudio se obtuvo mediante la hoja geológica Cuenca 53 (versión actual) disponible en el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE). La hoja geológica se encuentra en escala 1:100000 y permite obtener descripciones geológicas de varias zonas alrededor de la ciudad de Cuenca y en el área de estudio. De igual manera se empleó la información temática digital de la cuenca del río Paute con su mapa geológico en el sistema de coordenadas UTM-SAM56 en formato *.shp*. Esta información está disponible en el portal virtual de la Universidad del Azuay: <https://gis.uazuay.edu.ec/descargas/promsa/paute/home.htm>

Además, se utilizó levantamientos de información de geopedología del (SIGTIERRAS) y mediante convenio con la Empresa Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la ciudad de Cuenca (ETAPA) se obtuvo información del Programa de Protección para la Cuenca del Río Paute (PRECUPA) la cual aporta

con la descripción geológica de la zona y el análisis de vulnerabilidad del área de estudio.

### 3.2.4 Información de cobertura vegetal y uso de suelo

La información relativa a la cobertura vegetal actualizada del sector Marianza fue suministrada por ETAPA EP en forma de un archivo de mapa temático en formato *.shp*. Este archivo contiene polígonos que representan la distribución y características de la cobertura vegetal en el área de estudio. El sistema de coordenadas utilizado para georreferenciar el mapa es UTM-WGS84/17S (ver. Figura 3-4). Se desconoce la institución que haya realizado la caracterización y determinación de la cobertura y uso de suelo en el sector.



**Figura 3-4.** Mapa cobertura vegetal y uso de suelo sector Marianza, parroquia Sayausí. WGS 84/Zona 17 S. Fuente: Red Hidrometeorológica ETAPA

### 3.2.5 Información de Imágenes Satelitales

La información de imágenes satelitales se obtuvo mediante la página web Sentinel-Hub en su plataforma virtual: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. Mediante esta página web que ofrece los datos de los satélites (Sentinels, Landsat y otros proveedores) se puede navegar y observar imágenes satelitales a lo largo de un periodo temporal que puede ser definido por el usuario. Además, proporciona servicios de almacenamiento procesamiento, algoritmos de descompresión, metadatos y bandas de sensores (ver. Figura 3-5). Estas características permiten una evaluación de las condiciones de superficie del área de estudio previo y después al evento de marzo de 2022, pues se cuenta con información cada 5 días.

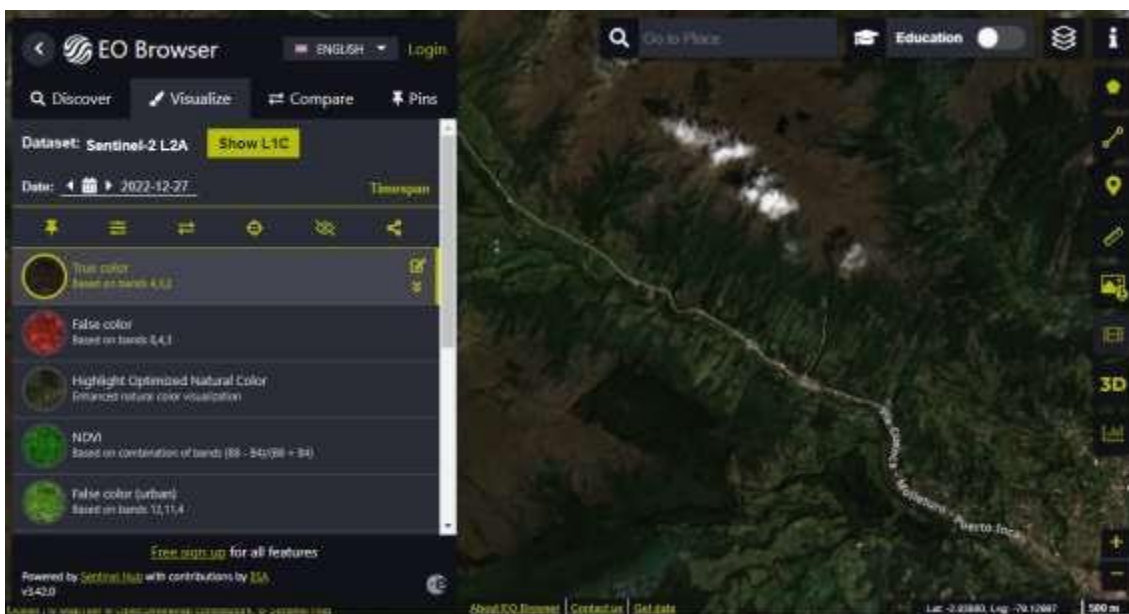


Figura 3-5. Interface de la Sentinel-Hub/EO Browser. Fuente: (EO Browser 2023)

### 3.3 Procesamiento de información en software GIS

Todo el procesamiento información geoespacial en formatos ráster y vectorial, como shapefile (.shp), raster (.tiff) y geopackage (.gpkg), fue realizado mediante el software QGIS (Firenze 3.28.2) (ver. Figura 3-6). Se instalaron complementos en QGIS que permiten el uso de sistemas geo científicos de análisis del terreno, como GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) y SAGA (System of Automated Geoscientific Analyses). Con esto, fue posible calcular los parámetros geomorfológicos y aplicar algoritmos de análisis del terreno utilizando las bibliotecas de estos softwares directamente desde QGIS.

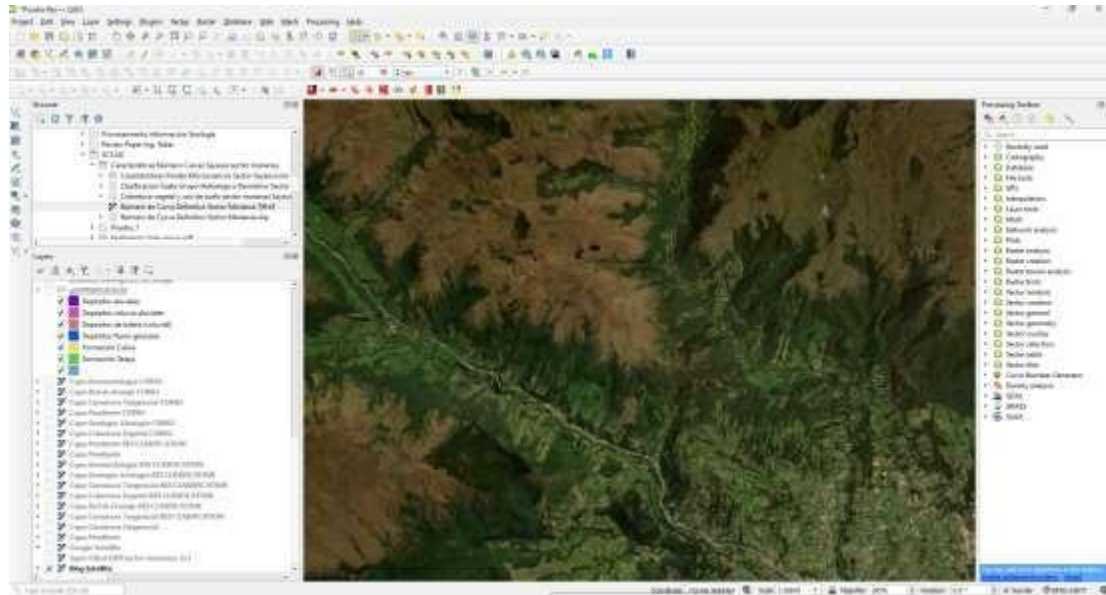


Figura 3-6. Interface del software QGIS (Firenze 3.28)

### 3.4 Caracterización Geológica

Este proceso se llevó a cabo mediante la revisión de la hoja 53 del mapa geológico del Ecuador en la ciudad de Cuenca (escala de 1:100000). Se utilizó la información de geopedología proporcionada por SIGTIERRAS, así como las cartas geológicas y de hidrogeología del MAGAP en formato shapefile. Además, se realizaron visitas de campo por medio de acceso a pie a las dos microcuencas de estudio en el sector Marianza, se tomaron fotografías y se analizaron en función de la bibliografía disponible. Se complementó la investigación con la revisión de imágenes satelitales y se realizaron sobrevuelos utilizando un VANT. Para el análisis y procesamiento de las imágenes satelitales se empleó el software QGIS (3.28).

### 3.5 Caracterización Geomorfológica

Para realizar la clasificación geomorfológica en el área de estudio, se utilizó información de geopedología obtenida del SIGTIERRAS, así como datos sobre las características geomorfológicas de la cuenca del Río Paute en la zona temática digital. Además, se realizaron visitas al sector y sobrevuelos utilizando un VANT para obtener una mejor comprensión y verificación de la información recopilada. Para el procesamiento de la información en formato shapefile y procesamiento de imágenes satelitales se empleó el software QGIS (3.28). Por medio del cual se aplicaron distintos algoritmos para análisis de información satelital de las librerías: GDAL, SAGA, GRSS. Además, el cálculo de parámetros geomorfológicos fue realizado mediante hojas de cálculo en Excel. Esta caracterización se lo realizó en base a lo establecido por el manual del U.S.D.A. Forest Service en su publicación Geomorphic Classification System (Donald et al. 1998).

Para poder delimitar las microcuencas en el área de estudio y el análisis de las redes de drenaje se aplicaron los algoritmos *Channel Network and Drainage Basins* y *Upslope Area*. Los parámetros geomorfológicos mediante el análisis del (DEM) fueron calculados empleando la información del SIGTIERRAS aplicando los algoritmos: *Slope, Curvature Classification, Aspect, Curvature*. La curva hipsométrica de las microcuencas de análisis fue obtenida mediante el uso de la herramienta *Hypsometric curves*. Para obtener el perfil de los causes principales se empleó el complemento *Profile Tool*. Todo post procesamiento de información para obtener los parámetros morfológicos se los realizó en Excel.

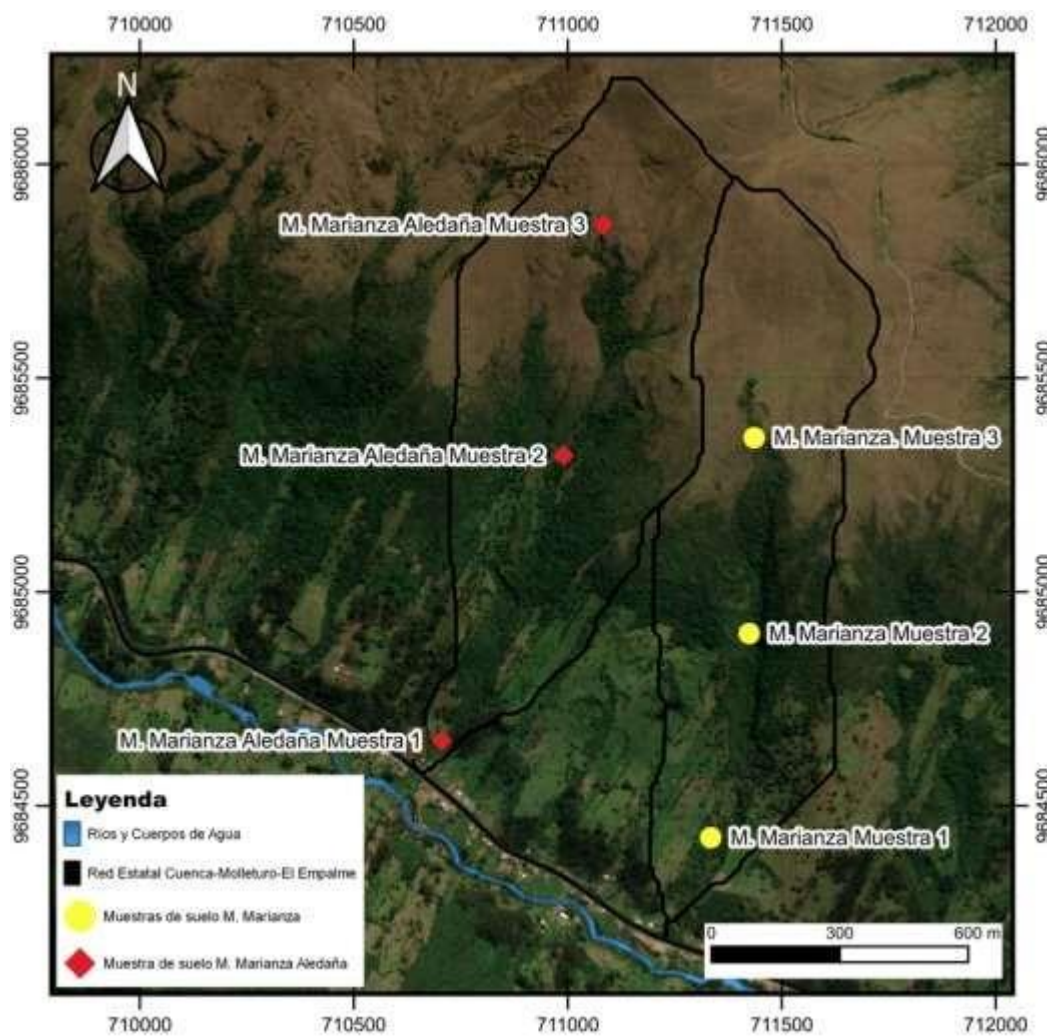
### **3.6 Clasificación de suelos y ensayos de Laboratorio**

Las metodologías aplicadas para la caracterización del suelo que conforma las microcuencas de estudio corresponden a la indicada por las normas de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM). Este proceso se complementó con la revisión de la norma técnica INEN 691 y 692 para la realización de este tipo de ensayos.

Las muestras fueron extraídas de dos microcuencas dentro del área de estudio correspondiente a su ubicación indicada en la Figura 3-7 en un periodo de 3 meses mediante varias visitas a la zona. Se tomaron muestras de suelo en áreas cercanas a taludes expuestos, donde se evitó la presencia de suelo orgánico o influenciado por raíces y vegetación. Las muestras se obtuvieron mediante excavaciones manuales de aproximadamente 50-70 cm de profundidad. En general, no se presentaron mayores complicaciones para acceder al suelo, ya que la superficie estuvo expuesta debido a eventos de deslizamientos previos. Se priorizó la selección de áreas no alteradas por la meteorización, pero expuestas a la superficie para obtener muestras representativas. Las muestras de suelo fueron sometidas a ensayos en el laboratorio de geotecnia y materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

#### **3.6.1 Muestreo ASTM D4220**

El método aplicado para la conservación y el transporte de muestras de suelo corresponde al indicado en la norma ASTM D4220. Las muestras de suelo alterado se tomaron de 3 puntos representativos de la microcuenca de Marianza y 3 puntos de la microcuenca Marianza Aledaña con la finalidad de tener una caracterización general del material que conforman la microcuenca. En la Figura 3-7 se observa la ubicación de los puntos donde se obtuvieron las muestras, de igual manera en la Tabla 3-2 se establecen las coordenadas, así como la fecha en las que se extrajeron.



**Figura 3-7.** Ubicación de las muestras de suelo tomadas en el sector Marianza, parroquia Sayausí. WGA84/Zona 17S. Fuente: Elaboración Propia

Las muestras se almacenan y se transportan conforme a lo indicado en la norma ASTM D4220 para muestras de tipo B, las cuales se definen como aquellas muestras para las cuales se requiere el contenido de agua, clasificación y/o compactación. Las muestras deben ser contenidas de forma hermética y a una temperatura aproximada entre 3 y 30 °C. Se buscó preservar las muestras de modo que los ensayos de laboratorio reflejen con precisión las condiciones de campo (ASTM 2023).

Muestra	X (m)	Y (m)	Z (m.s.n.m)	Fecha de recolección de la muestra
M. Marianza Muestra 1	711334	9684426	2953	26/Marzo/2023
M. Marianza Muestra 2	711424	9684903	3229	4/Marzo/2023
M. Marianza. Muestra 3	711436	9685361	3453	4/Marzo/2023
M. Marianza Aledaña Muestra 1	711083	9685858	3591	19/Marzo/2023
M. Marianza Aledaña Muestra 2	710990	9685319	3258	11/Junio/2023
M. Marianza Aledaña Muestra 3	710705	9684653	2925	15/Junio/2023

**Tabla 3-2.** Ubicación de las muestras de suelo tomadas en el sector Marianza, parroquia Sayausí. WGA84/Zona 17S.

Las muestras fueron identificadas con marcas previo a su transporte. Se colocaron las muestras en bolsas de plástico buscando que estas queden lo más ajustadas posible y se extrajo la mayor cantidad de aire de ellas. Para un cierre hermético se selló las bolsas con cinta adhesiva y se las transportó para ser ensayadas a la brevedad.

### 3.6.2 Humedad Natural ASTM D-2216

La determinación del contenido de agua o humedad natural debido a la pérdida de masa se la llevo a cabo mediante la metodología indicada por la norma ASTM D-2216. Esta medida permite establecer correlaciones entre el comportamiento y las propiedades del suelo.

La norma establece que una muestra debe ser secada en un horno a una de temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta que se obtenga un peso constante. La pérdida de peso durante este proceso corresponde al agua contenida en la misma. Finalmente, el contenido de agua se calculó mediante la relación entre el peso del agua para el peso total de la muestra (ASTM 2019).

### 3.6.3 Granulometría ASTM D422

El ensayo de granulometría consiste en agitar una muestra de suelo a través de una serie de tamices que presentan una reducción progresiva en sus aberturas (Das 2019). El método utilizado para el ensayo granulométrico corresponde al indicado por la norma ASTM D422 la cual permite una determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas del suelo. Cabe recalcar que el proceso de tamizado solo permite determinar la distribución de tamaño de partículas mayores a  $75\mu\text{m}$ , es decir, aquellas

retenidas sobre el tamiz N.º 200. Con base en las recomendaciones de Das (2019) para suelos cohesivos se procede a lavar el material sobre el tamiz No 200.

En este ensayo se requiere una serie de tamices que permita la representación gráfica de puntos uniformemente espaciados, iniciando desde el tamiz 3" (75 mm) hasta el N.º 200 (75 µm). Se divide el material en una serie de fracciones en los diferentes tamices, estas divisiones vendrán dadas por las condiciones de la muestra o las especificaciones del ensayo. Posteriormente se lleva a cabo la operación de tamizado por medio de movimientos laterales y verticales de la malla o con el uso de algún dispositivo mecánico. Se busca que siempre exista un movimiento continuo del material sobre la malla. Se debe evitar manipular los fragmentos de material sobre la superficie de la malla con la mano. El tamizado debe ser realizado hasta que no más del 1% de la masa del residuo en la malla pase a través de ella durante 1 minuto. Finalmente se determina la masa retenida en cada fracción mediante el uso de una balanza que cumpla con los requerimientos del ensayo, se debe tomar en cuenta que el peso de las masas retenidas debe ser similar a la masa original previo al tamizado (ASTM 1998).

#### **3.6.4 Límites de Atterberg ASTM D4318**

Los límites de Atterberg se los denominan a: límite líquido, límite plástico y límite sólido de un suelo. La norma ASTM D4318 indica el método a seguir para la determinación del límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad de un suelo. Ambos ensayos se los realiza sólo con material que pase a través del tamiz N.º 40 (4.25mm) y con una preparación en húmedo. Se busca obtener una porción representativa de material que permita suministrar 150 a 200 gramos de suelo.

El límite líquido se lo determina llevando una porción de la muestra preparada a una copa de bronce, la cual se divide en 2 mediante el uso de una herramienta de ranurado. Posteriormente se deja fluir hasta que choquen a causa de golpes repetidos ocasionados por un dispositivo mecánico. El límite líquido se lo determina mediante un método multipunto en el cual se requiere tres o más ensayos con una variación en el contenido de agua. Estos valores son graficados a fin de determinar la humedad correspondiente a 25 golpes mediante un ajuste lineal (ASTM 2018).

El límite plástico se lo determina presionando y rodando una muestra de suelo en un cilindro de 3.2mm de diámetro con el objetivo de que el contenido de agua se reduzca hasta que el cilindro se desmorone y no se pueda presionar o laminar nuevamente. El contenido de agua determinado en este punto permite establecer el límite plástico del suelo (ASTM 2018).



### 3.6.5 Clasificación de Suelos ASTM D2487

La clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se realizó mediante la combinación de la clasificación granulométrica y los límites de Atterberg. La norma ASTM D2487 presenta un método para la clasificación de suelos conforme al sistema de clasificación SUCS limitados a suelos de origen natural.

Inicialmente se determina el porcentaje de grava, es decir, la fracción de suelo que pasa el tamiz de 3 pulgadas y queda retenido sobre el tamiz #4. Posterior a esto se determina el porcentaje de arena la cual corresponde a la fracción que pasa el tamiz #4 y se retiene sobre el tamiz #200. Con esta información es posible conocer el porcentaje de finos, los cuales están compuestos de limo y arcilla y corresponde a la fracción que pasa el tamiz #200. Finalmente es necesario determinar el límite líquido y el índice de plasticidad de la porción de la muestra de suelo que pasa a través del tamiz 200 (Das, 2019; ASTM 2020). Esta información permite establecer la simbología y el nombre del grupo al cual pertenece el suelo ensayado.

### 3.7 Análisis de Lluvias

Para este estudio se cuenta con un registro de lluvia instantánea en tres pluviómetros a lo largo de diecinueve años en el sector Marianza. Sin embargo, para utilizar estos datos en aplicaciones relacionadas con la ingeniería, es necesario llevar a cabo su procesamiento y validación correspondiente.

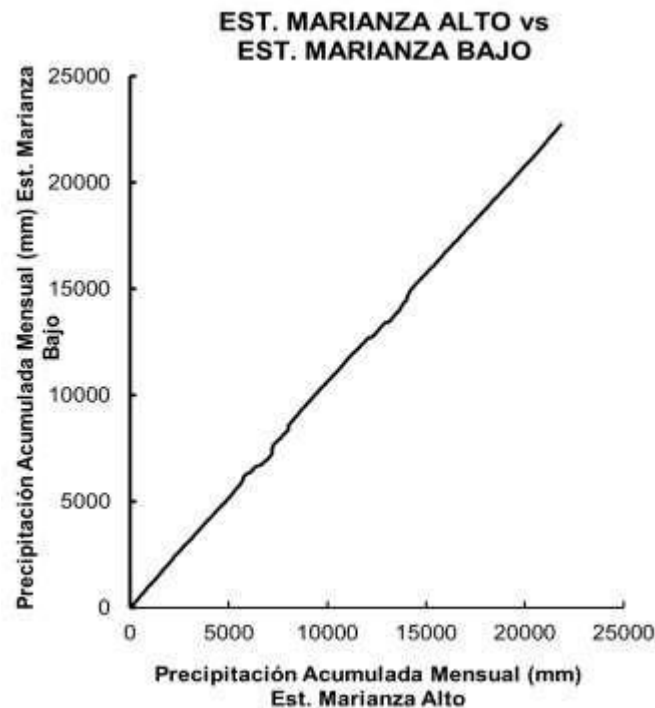
#### 3.7.1 Procesamiento de Lluvias

Con la finalidad de establecer un periodo de tiempo común entre los registros de las tres estaciones de lluvia se procesó los datos crudos mediante un algoritmo de elaboración propia en el lenguaje de programación R. Se estableció intervalos de tiempo de cinco minutos para los diecinueve años de registro. Se acumuló los datos de lluvia instantánea dentro de cada uno de los intervalos correspondientes para finalmente ser exportados a Excel para su procesamiento manual.

#### 3.7.2 Validación de datos

La metodología aplicada para la validación de los datos de precipitación es la conocida como curva doble masa. Para la elaboración de las curvas doble masa se parte de ordenar los datos de precipitación mensual en orden cronológico para posteriormente comparar los registros de precipitación acumulada entre las posibles combinaciones de las estaciones Marianza Alto, Marianza Bajo y Marianza Pinos. Al disponer de solo 3 estaciones localizadas en el sector Marianza cada uno de los registros se ha graficado

con respecto al patrón obtenido con base en los registros consistentes de dichas estaciones para su posterior ajuste. Un ejemplo de curva doble masa es la que se muestra en la Figura 3-8 correspondiente a la construida para datos crudos entre la estación de Marianza Alto y Marianza Bajo.



**Figura 3-8.** Análisis de curva doble masa para valores acumulados mensuales. Periodo Mayo/2004 - Marzo/2023. Fuente: Elaboración Propia.

### 3.7.3 Ajuste de Datos

Con base en lo expuesto en la sección 2.6.2 se aplicó el método de la razón normal para el ajuste de datos faltantes de lluvia acumulada mensual en las diferentes estaciones. Para estimar el dato faltante en una estación se utilizó un registro o patrón obtenido a partir de las otras estaciones cercanas. Se multiplicó el valor registrado por la relación entre la pendiente de la curva doble masa de la estación que presenta datos faltantes y la estación de registro. Este procedimiento permitió rellenar datos faltantes y ajustarlos a una misma proporcionalidad.

Finalmente, estos datos procesados y corregidos se utilizaron como base para el desarrollo y análisis de la cantidad de lluvia en diferentes escalas. La acumulación de estos datos permitió la construcción de hietogramas incrementales y de lluvia acumulada. Los periodos de análisis se establecieron de manera horaria, diaria y mensual con el objetivo de visualizar gráficamente el comportamiento de la lluvia durante el periodo registrado. Además, estos datos permitieron determinar la intensidad

de distintos eventos de lluvia, la variabilidad estacional y la identificación de eventos extremos.

### **3.7.4 Curva de Variación Estacional**

La curva de variación estacional se obtuvo para los registros de las 3 estaciones disponibles. Se determinaron los valores para probabilidades de excedencia de 10% hasta 90% por medio de percentiles para el conjunto de datos correspondientes a cada mes a lo largo del año. La curva obtenida permitió visualizar detalles relevantes en la zona como los máximos y mínimos observados, la probabilidad ante eventos similares y la magnitud de los diferentes eventos a través del año.

### **3.7.5 Determinación de eventos extremos**

El análisis de la precipitación pico presentada anualmente en las estaciones disponibles en el sector Marianza requirió de un ejercicio de búsqueda en los datos disponibles del valor máximo registrado para un intervalo de tiempo dado.

Ante la variabilidad en la duración de eventos extremos de precipitación se agrupó los datos de lluvia instantánea en intervalos de 24 y de 3 horas con el objetivo de analizar el evento de precipitación presentado la tarde del 27 de marzo de 2022, el cual presentó una duración aproximada de 3 horas según los registros de las estaciones pluviométricas.

Los datos procesados por medio del lenguaje R se exportaron a una matriz en Excel en donde se realizó la búsqueda de los datos a fin de determinar los valores extremos para los intervalos dados. Este ejercicio se lo realizó para cada uno de los años de información registrada. Cabe recalcar que al estar estas observaciones localizadas en la cola extrema de la distribución de probabilidad de todas las observaciones de la cual se extraen su distribución de probabilidad es diferente, requiriendo de un análisis particular (Chow 1988).

Se procesó los datos de precipitación de todo el periodo de registro a fin de obtener un valor acumulado de precipitación en intervalos de 24 y 3 horas. Se obtuvo el valor máximo de precipitación de cada intervalo para cada año desde el 2004 hasta el 2023. Cada valor obtenido por año fue contrastado entre las estaciones disponibles a fin de mostrar los eventos extremos para fechas cercanas. Esto debido a que no es factible rellenar datos a intervalos tan cortos en los casos en donde los valores extremos ocurrían en periodos sin mediciones.

### 3.8 Ajuste de valores extremos a funciones de distribución de probabilidad

Una vez obtenidos los valores de precipitación máxima en los periodos acumulados de 3 horas y 24 horas, se procedió ajustar dichos valores a tres funciones de distribución de probabilidad: Gumbel, Pearson tipo 3 y Log-Pearson tipo 3. Este proceso de ajuste se realizó utilizando el software Excel e Hidroesta 2, siguiendo lo establecida en la sección 2.5.

Para verificar la calidad del ajuste de los eventos extremos, se aplicó el test de bondad de ajuste Kolmogórov-Smirnov. Esta evaluación se llevó a cabo utilizando un complemento estadístico en Excel llamado *Real Statistics Resource Pack*. La selección del mejor ajuste a la función de distribución de probabilidad se lo realizó empleando el ajuste que presentaba una menor distancia en el test Kolmogórov-Smirnov.

### 3.9 Modelación hidrológica lluvia-escorrentía

#### 3.9.1 Clasificación hidrológica de suelos

La clasificación hidrológica del suelo (HSG) conforme su explicación en la sección 2.6.2.1 fue llevada a cabo utilizando datos de textura superficial y capacidad de infiltración de suelos bajo condiciones húmedas, obtenidos de la capa de geopedología del SIGTIERRAS en formato *.shp*. Estos datos fueron procesados en el software QGIS y transformadas al HSG empleando la Figura 2-5 y la Tabla 2-3.

Una vez obtenida esta información se procedió a transformarlo en formato ráster empleando el algoritmo *Rasterized (vector to raster)*, mismo que servirá posteriormente para aplicar la metodología RES. Esta información fue obtenida en el área de estudio aplicando un tamaño de píxel máximo de 3x3m.

#### 3.9.2 Número de Curva

La obtención de la clasificación del número de curva en AMC II en el área de estudio se lo realizó mediante la intersección de la capa de uso de suelo/cobertura vegetal con la capa de la clasificación del grupo hidrológico del suelo. En base a esta intersección se asignó un número de curva referente a la clasificación de la Tabla 2-5.

Esta clasificación fue convertida de formato vectorial a ráster mediante el algoritmo *Rasterized (vector to raster)* con un píxel de tamaño de 3x3m. La obtención de un número de curva para cada microcuenca de estudio se lo realizó mediante la aplicación del algoritmo *Zonal Statistics* con el cual se obtuvo un promedio ponderado conforme la ecuación (2-27).

### **3.9.3 Condiciones Antecedentes de Humedad**

Dado que no se dispone de valores de número de curva calibrados en el sector Marianza, se aplicó el método establecido por el SCS según la Tabla 2-4. Se tomó los datos de precipitación registrados y procesados para un intervalo de 5 minutos. Estos datos inician el día 22 de marzo de 2022 y concluyen el 26 de marzo del mismo año. Se realizó el acumulado de precipitación a lo largo de 5 días a fin de obtener un valor que permita caracterizar las condiciones antecedentes de humedad en tipo I, II o III. Esta caracterización se la realizó conforme a los intervalos indicados para la estación en el periodo de crecimiento.

### **3.9.4 Precipitación**

#### **3.9.4.1 Selección de datos para modelación (Tormenta de Diseño)**

El hietograma de diseño seleccionado para el modelo lluvia-escorrentía en la microcuenca de Marianza es el correspondiente al evento registrado el día 27 de marzo de 2022. Este evento ha sido seleccionado por su relevancia ya que durante el mismo se produjo el movimiento geodinámico conocido como flujo de detritos. La información recogida por las estaciones presentes en el sector Marianza corresponden a datos de precipitación puntual por lo que se requiere ajustar los mismos a una precipitación promedio sobre un área. Para realizar este ajuste se aplicó el método del inverso de la distancia, así como una reducción en función del área de la microcuenca de análisis.

#### **3.9.4.2 Ajuste por el inverso de la distancia IDW**

La metodología se aplicó para el cálculo de la precipitación en la microcuenca de análisis considerando la distancia entre las 3 estaciones disponibles y el centroide de la microcuenca. Se trabajó de esta forma debido a que el área de la microcuenca es bastante reducida. Según lo indicado por Wei and McGuinness (1973) es necesario establecer un sistema de coordenadas cartesianas de forma tal que toda la superficie de la microcuenca se encuentre en el primer cuadrante. Además, se estableció un punto no pluviométrico  $(x, y)$  de la microcuenca que puede determinarse con un número  $n$  de estaciones cercanas. Suponiendo que la precipitación en el punto establecido es proporcional a la medida registrada e inversamente proporcional a la distancia entre el punto y las estaciones se calcula la precipitación puntual para el punto establecido.

#### **3.9.4.3 Profundidad de precipitación promedio sobre un área**

A partir de lo expuesto en la sección 2.7.3 se ha definido un porcentaje de reducción con base en el área de las microcuencas de análisis y la duración del evento de

precipitación. Las microcuencas en el sector Marianza presentan un área menor a  $1\text{km}^2$  y una duración que se ha tomado igual al tiempo de concentración en las mismas. Con estas consideraciones la reducción para este caso de estudio es mínima, sin embargo, es importante considerar su influencia al momento de aplicar datos de precipitación sobre un área en el modelamiento de cuencas hidrográficas.

### 3.9.5 Flujo Base

Parte del modelamiento del sistema lluvia-escorrentía requiere de un valor de caudal correspondiente al flujo base de la cuenca. Ante la ausencia de datos de caudal en las microcuencas de análisis y tomando en cuenta que este flujo representa una minúscula porción del caudal existente, en la microcuenca durante un evento de lluvia extrema se ha definido el flujo base en  $10\text{l/s}$ . Este valor es un aproximado en función de visitas realizadas a la zona en donde se puede apreciar la presencia de un flujo continuo en periodos sin lluvia.

### 3.9.6 Método de Muskingum

Se aplicó el método de Muskingum para el modelamiento del canal presente en las microcuencas de análisis. Esta metodología requirió definir 2 factores como  $X$  y  $K$ . Para corrientes naturales el valor del factor de ponderación  $X$  esta entre 0 y 0.2, con un valor medio de 0.2. Cabe recalcar que la determinación de  $X$  no requiere de precisión ya que el resultado es relativamente insensible a este factor (Chow 1988). Por otra lado el factor de proporcionalidad  $K$  corresponde al tiempo de tránsito de una onda de creciente a través de tramo de canal (Chow 1988).

Si bien existen procedimientos para el cálculo de los factores  $X$  y  $K$  no es factible su uso ya que es fundamental el contar con datos del hidrograma de entrada y salida en el canal de análisis. La microcuenca de Marianza, así como la microcuenca Marianza Aledaña no cuentan con estaciones de medición de caudal imposibilitando el cálculo de dichos factores. De igual manera variaciones del método como el Muskingum – Cunge no es aplicable ya que no se cuenta con la información necesaria para la formulación indicada para el cálculo de los factores  $X$  y  $K$ . Por tal motivo se ha recurrido a aproximar estos valores en función de las condiciones propias de la microcuenca de análisis.

Según lo indicado por (Romera and Santos 2015) para cauces naturales el valor de  $X$  será cercano a 0.5 conforme al incremento en la pendiente y la disminución del caudal en el cauce, recomendando un valor de 0.35 para zonas de alta pendiente. El factor  $K$  se estimó con base al cálculo del tiempo de concentración tomando en cuenta la longitud del canal en la microcuenca de análisis, así como su pendiente.

### 3.9.7 Modelamiento mediante HEC-HMS

El programa HEC-HMS está formado por una serie de componentes los cuales involucran diferentes parámetros y procesos necesarios para la modelación lluvia escorrentía. A continuación, los procedimientos y configuración de cada componente serán explicados.

#### 3.9.7.1 Datos de Terreno

Se partió de un archivo ráster (.tiff) el cual contenía información de elevación de la zona en donde se localizan las microcuencas de análisis. Posteriormente se seleccionó sistema de coordenadas WGS 84 Zona UTM 17 S. Se asoció los datos de terreno a un modelo de cuenca hidrográfica, esto con la finalidad de generar los elementos hidrológicos que componen el modelo a través de un delineado de la microcuenca de análisis. Se procesó la red de drenaje, de esta manera se identificó los cauces existentes y se definió los cauces correspondientes a la microcuenca de Marianza y Marianza aledaña. Esto permitió obtener varios parámetros geomorfológicos y delimitar la cuenca de análisis, así como definir una red de drenaje que llega hasta el punto de descarga en la vía Cuenca-Molleturo-El Empalme.

#### 3.9.7.2 Modelo de Cuenca Hidrográfica

El modelo de cuenca hidrográfica consto de 6 elementos hidrológicos. Estos corresponden a los elementos junction, sink, reach y 3 subcuencas para cada microcuenca de análisis. Se definió un método para la modelación de los elementos más relevantes siendo en este caso las subcuencas y el canal. Se modelaron los parámetros correspondientes a las perdidas, la transformación y el caudal base para cada subcuenca. No se incluyó los parámetros referentes a evapotranspiración en el modelo ya que presenta una mayor complejidad y no se dispone de la información necesaria.

Las pérdidas se modelaron mediante el método de numero de curva del SCS siendo necesario la determinación de las abstracciones iniciales, el número de curva y el porcentaje de impermeabilidad en la microcuenca. Se aplicó el método del hidrograma unitario SCS para las transformaciones requiriendo únicamente del tiempo de retardo para cada subcuenca. Finalmente, el caudal base se lo modeló mediante un valor constante para el mes de marzo de 2022. Cabe recalcar que los fundamentos teóricos y las metodologías para cada uno de los métodos indicados han sido descritas a detalle en secciones anteriores.

Al ser simplemente puntos de convergencia los elementos junction y sink no requieren de un método para su modelamiento. Sin embargo, es necesario el modelamiento del

elemento reach mediante un método de tránsito hidrológicos de canales. El método empleado corresponde a Muskingum el cual requiere de 2 parámetros conocidos como K y X indicados anteriormente.

### **3.9.7.3 Modelo Meteorológico**

El componente de modelo meteorológico presenta una configuración igual para el análisis de cada una de las microcuencas en ambos casos. Se estableció en unidades métricas, con precipitación especificada por hietograma y con el proceso por defecto para el reemplazo de datos faltantes. Además, los datos de precipitación ingresados se definieron por igual para su aplicación en todas las subcuencas del modelo. Dichos datos fueron ingresados a través del gestor de datos de series temporales.

### **3.9.7.4 Gestor de Datos de Series Temporales**

Para los casos de análisis se ingresó datos de mediciones de precipitación registradas en tres estaciones en el sector Marianza y tratadas según lo indicado en la sección 3.8.3. La información pluviométrica fue ingresada forma tabular para intervalos de 1 minuto pudiendo generar dentro del programa el hietograma correspondiente. Esta información corresponde a la precipitación de los 5 días previos al evento, así como la precipitación del hietograma de diseño correspondiente al evento del 27 de marzo de 2022. El ingreso de datos de series temporales de precipitación es parte del proyecto generado por el programa por lo que la información puede ser compartida por múltiples subcuencas o modelos de cuencas hidrográficas.

### **3.9.7.5 Especificaciones de Control**

El componente de especificaciones de control se configuró de tal manera que permita realizar las modelaciones y obtener los resultados en un intervalo de tiempo específico. Dicho intervalo de tiempo corresponde al desarrollo de todo el evento de esorrentía posterior a la precipitación del 27 de marzo de 2022. Se definió estos intervalos desde el inicio de los hietogramas ingresados para los casos de análisis. Su finalización se dio el día 28 de marzo de 2022 definiendo la hora en función del momento en el cual el caudal obtenido retorna a sus condiciones normales coincidiendo con el caudal base.

## **3.10 Mapeo de susceptibilidad de flujo de detritos mediante el método Rock Engineering Systems (RES)**

En este trabajo se utilizó una versión mejorada propuesta por Vianello et al. (2022) del enfoque de Bonetto et al. (2021) para evaluar la susceptibilidad a los flujos de detritos



empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG) en dos microcuencas de montaña en el sector Marianza.

En este estudio, se consideró siete factores condicionantes para la definición del *DfPI* según lo establecido por investigaciones e información disponible en el sector Marianza. (Bonetto et al. 2021; Rozos et al. 2008; Vianello et al. 2022; Zhang et al. 2022). Los factores considerados fueron: Geología/Litología, Pendiente, Red de Canal, Curvatura, Geomorfología, tipo de suelo hidrológico, Uso de suelo. A continuación, se describen la categorización empleada con los que se obtuvieron los resultados del *DfPi* en el área de estudio:

Geología/Litología: en base a la información de geología del SIGTIERRAS y características del área de estudio se identificaron 5 clases: (i) Depósitos fluvio-glaciares, (ii) Depósitos coluviales, (iii) Depósitos de ladera, (iv) Formación Tarqui, (v) Formación Celica (ver. Figura 4-6b).

Pendiente: en base a las investigaciones de Vianello et al. (2022) 5 diferentes clases de pendientes fueron seleccionadas para la clasificación en el área de estudio: (i) 0-8°, (ii) 8-15°, (iii) 15-25°, (iv) 25-35°, (v) >35° (ver. Figura 4-6b).

Tipo de suelo hidrológico: en base a la clasificación del grupo hidrológico del suelo el área de estudio se dispone de 4 categorías para la aplicación de la metodología RES: (i) A, (ii) B, (iii) C, (iv) D. (ver. Figura 4-33).

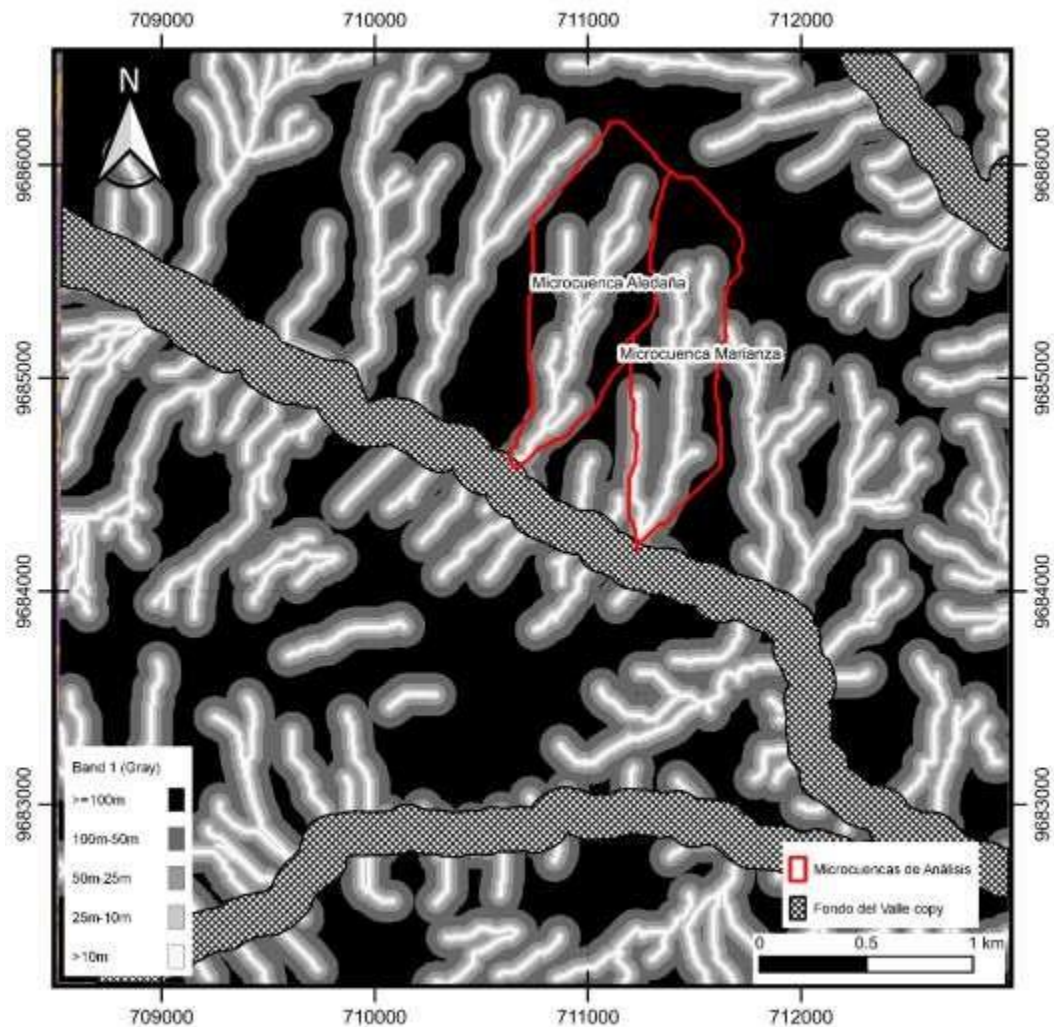
Distancia red de canal: en base a las investigaciones de Vianello et al. (2022) y el análisis del evento ocurrido el 27 de marzo en el sector Marianza, se han establecido cinco zonas de influencia para identificar las distancias a lo largo de los cauces de las quebradas donde es probable que se movilicen flujos de detritos: (i) 0-10m, (ii) 10-25m, (iii) 25-50m, (iv) 50-100m, (v) >100m (ver. Figura 3-9).

Curvatura: en base a la investigación de Vianello et al. (2022) se ha realizado 3 clasificaciones: (i) superficies cóncavas (valores negativos), (ii) convexas (valores positivos), (iii) planas (valores cercanos a cero) (ver. Figura 4-6a).

Geomorfología: en base a la caracterización geomorfológica del área de estudio, y a las condiciones del ocurrido en marzo del 2022 se identificaron 5 clasificaciones: (i) Superficie de aplanamiento, (ii) Relieve escarpado, (iii) Relieve montañoso, (iv) Valles encañonados, (v) Vertientes convexas (Figura 4-6c).

Cobertura vegetal y uso de suelo: en el área de estudio se identificaron 5 clasificaciones en función de los datos proporcionados por ETAPA: i) Área poblada/cuerpo de

agua/infraestructura antrópica, (ii) Plantación forestal/Bosque Nativo, (iii) Vegetación arbustiva, (iv) Páramo, (v) Pastizal (ver. Figura 3-4)



**Figura 3-9.** Influencia de la distancia de la red de drenaje en el sector Marianza, parroquia Sayausí, RES. WGS84/Zona 17S. Fuente. Elaboración Propia.

Esta información fue asignada en capas formato ráster, donde se dispone su clasificación en el rango de 0 a 4 empleando el algoritmo *Reclassify by table* conforme el orden mencionado anteriormente. Esta clasificación está disponible en la Tabla 4-23. De igual manera se realizó una corrección y ajuste de grilla mediante el algoritmo *Align Raster* y finalmente se sumó las 7 capas empleando pesos por capa en función de lo establecido por la matriz de interacción en la Tabla 4-22 en el sector Marianza.

Con este procedimiento se obtuvo un mapa de susceptibilidad ante flujos de detritos en una escala de *DfPI* de 0 a 100 para el sector Marianza. Este procedimiento se realizó empleando el software QGIS (3.28). Los factores con los que se aplica el modelo se resumen en la Tabla 3-3.

Para la obtención de un *DfPI* en las microcuencas de análisis se computó un promedio ponderado a escala de pixel mediante la herramienta *Zonal statistics* en QGIS, con lo cual, se obtuvo un *DfPI* global representativo.

Conjunto de datos espaciales	Factor Condicionante	Formato GIS	Resolución o escala (Px)
Modelo Digital de Elevación (DEM)	Pendiente	Ráster	Px=5x5m
	Curvatura Tangencial	Ráster	
	Distancia red de canal	Ráster y Polígono	
Uso de suelo: Red hidrometeorológica de ETAPA/Geopedología SIG Tierras	Uso de suelo	Polígono	1:25000
Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica. (Geopedología y temáticas derivadas)	Geología/Litología	Polígono	1:25000
	Geomorfología	Polígono	1:25000
Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGS250) for Curve Number- Based Runoff Modeling	Tipo de Suelo Hidrológico	Ráster	Px=250mx250m

**Tabla 3-3.** Factores condicionantes para la ocurrencia de flujo de detritos

### 3.11 Resumen

En esta sección se describen los materiales métodos y técnicas utilizados para evaluar la susceptibilidad a los flujos de detritos en dos microcuencas en la provincia de Azuay, Ecuador. Se explica el procesamiento de datos de lluvia, se discuten la caracterización geológicas, geomorfológicas, geotécnicas y de vegetación en la zona. Se establecen las implicaciones para aplicar un modelo lluvia- escorrentía mediante el software HEC-HMS. Finalmente se describe el método de Rock Engineering Systems (RES) y la metodología basada en factores geológicos, de pendiente y de tipo de suelo para evaluar la susceptibilidad a los flujos de detritos en el área de estudio.

## Capítulo 4

### Resultados y Discusiones

#### 4.1 Caracterización Geológica

##### 4.1.1 Geología

En la zona de estudio ubicada en el sector Marianza, a lo largo de la vía Cuenca-Molleturo-El Empalme, se identificaron dos formaciones rocosas predominantes. En la parte alta y media de la región, que abarca la mayor parte de las microcuencas en el sector Marianza, se encuentra la Formación Río Blanco. Por otro lado, en las áreas bajas del valle, a lo largo de la vía principal, se encuentra presente la unidad geológica Tomebamba (ver. Figura 4-1) (Erazo 1975).

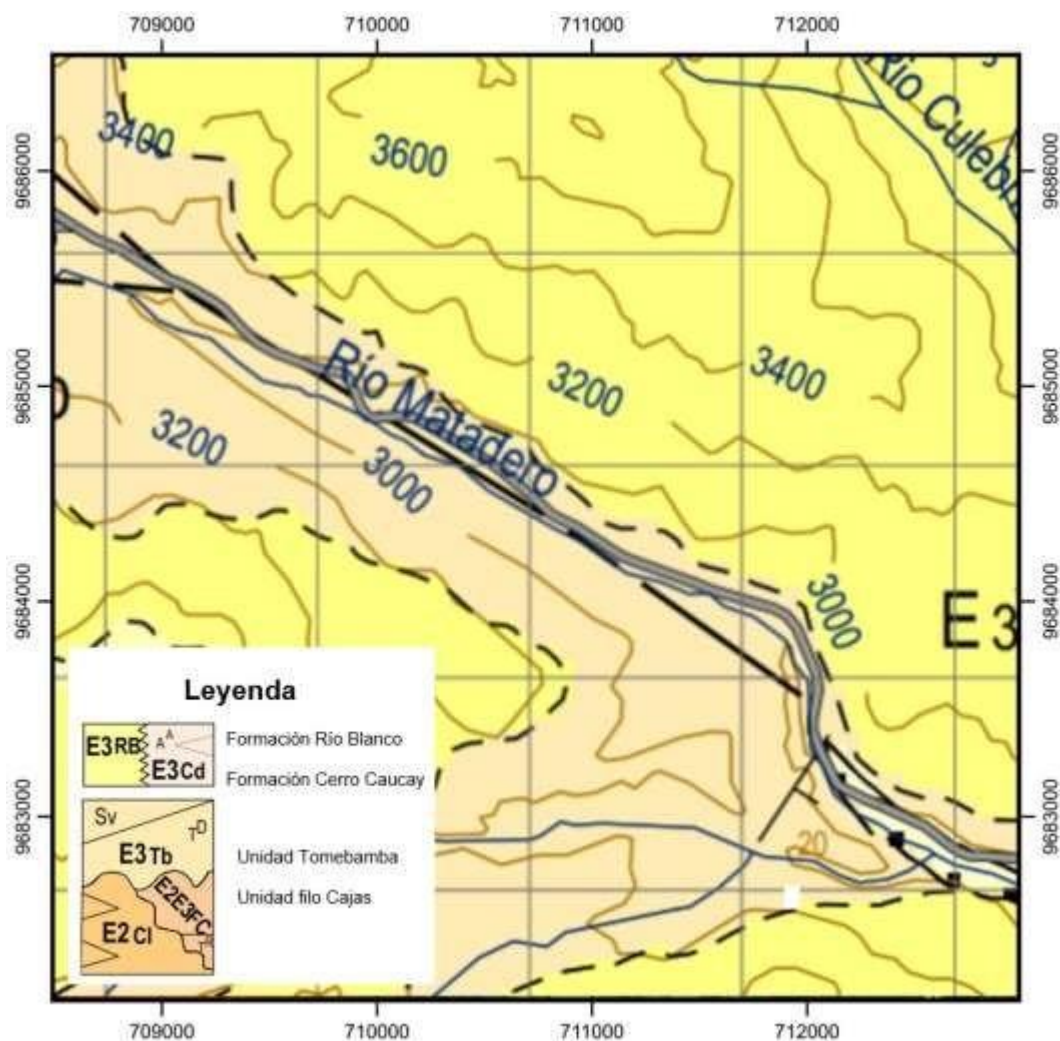


Figura 4-1. Mapa geológico hoja 53 Cuenca (versión actual): Fuente: (IGM 2002)

La formación geológica Río Blanco está compuesta por lavas andesíticas feldespáticas que contienen minerales como hipersteno y hornblenda. También se observan tobas de

flujo de ceniza, brechas con intercalaciones de areniscas volcánicas y algunas tobas dacíticas en esta formación. Estas rocas se ven afectadas por pequeños cuerpos de meladorita de textura fina y granular. Una parte minoritaria de la formación se encuentra ubicada debajo de la carretera Cuenca-Molleturo-El Empalme y tiene una edad correspondiente al Oligoceno temprano. En general, la formación presenta una dirección de rumbo N-O y una leve inclinación hacia el N-E (IIGE 2007).

La unidad geológica Tomebamba está compuesta por tobas masivas andesíticas y dacíticas básicas que se formaron a partir de flujos de cenizas. Estas rocas presentan cristales de feldespato y anfíboles cloritizados, con una presencia limitada o nula de cristales de cuarzo. Las tobas exhiben signos de alteración propilítica, con la presencia secundaria de minerales como clorita, epidota, actinolita, calcita y trazas de piritita. Presentan una textura soldada y una estructura eutaxítica. En algunas zonas, la Unidad Tomebamba muestra un contacto transicional con otras formaciones geológicas, y su edad se estima que corresponde al Oligoceno temprano. (IIGE 2007).



**Figura 4-2.** a) Visitas y mediciones en la microcuenca Marianza. b) Afloramientos rocosos y diaclasas (diciembre 2022). Fuente: Elaboración Propia

Mediante visitas a pie al sector Marianza y al canal afectado por el evento del 27 de marzo de 2022, se corroboraron los hallazgos previamente descritos sobre la composición y características de la Formación Río Blanco y la Unidad Tomebamba. La observación directa en el terreno permitió confirmar la presencia de lavas andesíticas feldespáticas y tobas de la Formación Río Blanco. Asimismo, se evidenció la presencia

de tobas masivas andesíticas y dacíticas básicas en la Unidad Tomebamba, así como las características de alteración propilítica y las texturas soldadas y eutaxítica (ver. Figura 4-2). Estos hallazgos respaldan la descripción detallada de cada formación geológica mencionada anteriormente.

#### 4.1.2 Litología Superficial

La Figura 4-3 muestra la presencia de formaciones geológicas y la acumulación de depósitos resultantes de procesos de meteorización y erosión en las partes inferiores y lechos de los valles. La composición de estas formaciones y depósitos se detalla en la Tabla 4-1.

Litología Superficial	Composición
Depósitos Aluviales	Arenas, limos, arcillas y conglomerados
Depósitos coluvio aluviales	Limos, arcillas, arenas, gravas y bloques
Depósitos de ladera (coluvial)	Mezcla heterogénea de materiales finos y fragmentos angulares rocosos, con ausencia de estratificación y estructuras de ordenamiento interno.
Depósitos Fluvio glaciares	Bloques y gravas en matriz de grano fino, con ocasionales niveles de arenas
Formación Celica	Tobas andesíticas verdes muy meteorizadas y lavas andesíticas a andesita-basálticas
Formación Tarqui	Tobas y aglomerados (dacíticas, riolíticos y andesíticos) caolinizados, con bajo porcentaje de lava.

**Tabla 4-1.** Geología/Litología en el sector Marianza, parroquia Sayausí. Fuente: SIGTIERRAS

En las microcuencas de estudio, se identifica la presencia de dos formaciones litológicas relevantes: la formación Tarqui y la formación Celica. Estas formaciones exhiben una permeabilidad que varía de baja a muy baja, y se atribuye a la fisuración del macizo rocoso, según se indica en los metadatos del archivo de información en formato .shp. Además, se destaca que estas formaciones geológicas poseen edades más recientes en comparación con la geología profunda previamente descrita. En concreto, se sitúan en el Cuaternario y el Cretácico (Erazo 1975).

En el área de estudio se identifica la presencia de una falla inferida adyacente a la red vial estatal. Esta observación se respalda con la información proporcionada por el mapa geológico 53 del Instituto Geográfico Militar (IGM) y los metadatos en formato .shp del Sistema de Información Geográfica de Tierras (SIGTIERRAS).

La existencia de esta estructura geológica abarca todo el territorio de la parroquia Sayausí, atravesando las comunidades de Marianza, Lirio, Gulay y la cabecera cantonal de Sayausí (ver. Figura 4-3).

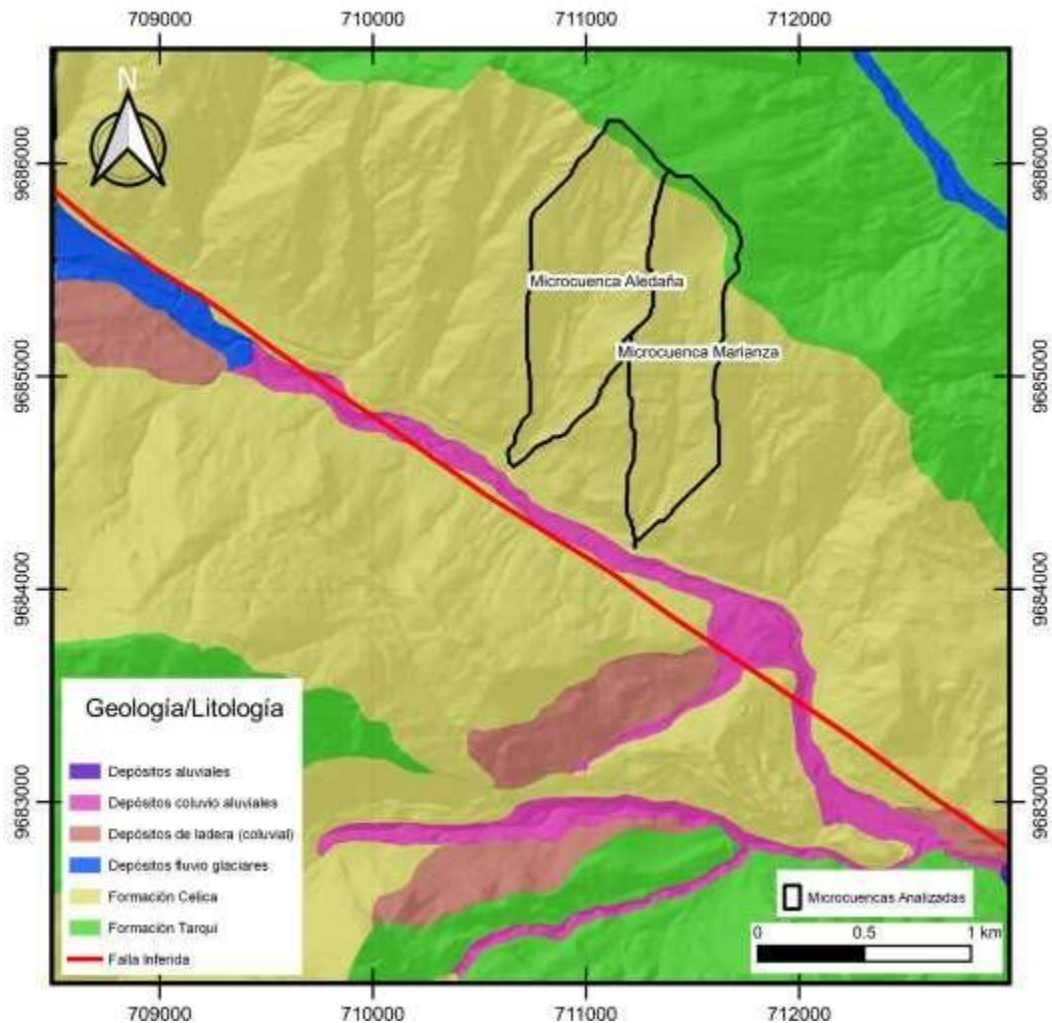


Figura 4-3. Geología/Litología en el sector Marianza, parroquia Sayausí. WGA84/Zona 17S. Fuente: (SIGTIERRAS 2015)

## 4.2 Caracterización Geomorfológica

### 4.2.1 Procesos geomórficos

La geomorfología del área de estudio muestra evidencia de erosión glacial, con la presencia de valles glaciares en forma de "U". Estos valles son el resultado de la acción de glaciares pasados que dejaron una excavación característica en el paisaje. Las visitas de campo confirman la presencia de un valle Fluvio-glaciar a lo largo de la vía vial Cuenca-Molleturo-El Empalme. En la Figura 4-4 se aprecia en la parte central la vía en el valle glacial típico con forma de U. Las microcuencas de estudio Marianza, y Marianza Aledaña se encuentran hacia la derecha de la vía.



**Figura 4-4.** Valle fluvioglacial sector Marianza. Foto: Chaca, J & Rea, J. (2023)

#### **4.2.2 Relieve del terreno**

De acuerdo con la información de geopedología del SIGTIERRAS, en la parte baja de las microcuencas de estudio se refleja un relieve poligénico influenciado por climas fríos. En el trayecto central del valle se encuentran antiguos depósitos coluvio-aluviales, mientras que en las áreas laterales a la red vial estatal se observan laderas con vertientes rectilíneas y abruptas. Estas características geomorfológicas reflejan la acción de múltiples procesos a lo largo del tiempo.

#### **4.2.3 Generación morfológica**

El proceso de glaciación que dio origen al valle principal del área de estudio es considerado como una generación morfológica relictas, ya que la presencia de glaciares en la zona es inexistente en la actualidad. Sin embargo, en lo que respecta a los procesos de formación de quebradas, vertientes y acumulación de material en la base, se clasifican como generación activa, debido a que las condiciones que propiciaron su formación aún están presentes, siendo influenciadas por factores climáticos y la acción de la lluvia. Esta información fue corroborada en base a visitas de campo conforme a sobrevuelos con un VANT (ver. Figura 4-5).





Figura 4-5. Geomorfología microcuencas sector Marianza. Foto: Chaca, J & Rea, J. (2023)

#### 4.2.4 Morfometría

La Tabla 4-2 muestra las características y parámetros generales, de las cuencas de análisis. Esta información fue obtenida mediante geoprocesamiento con herramientas en QGIS (3.28).

Características de la Microcuenca	Microcuenca Marianza	Microcuenca Marianza Aledaña
<b>Características físicas</b>		
Área (Km <sup>2</sup> )	0.590	0.662
Perímetro (Km)	4.835	4.835
Longitud Cuenca (Km)	1.780	1.699
Ancho (km)	0.331	0.390
<b>Coordenadas Centroides UTM WGS84/ ZONA 17S</b>		
Centroide X (m)	711436	711007
Centroide Y (m)	9685115	9685447
Centroide Z (m)	3335	3346
<b>Características Altimétricas</b>		
Cota mínima (Hmin) (m.s.n.m)	2858	2895
Cota máxima (Hmax) (m.s.n.m)	3696	3798

<b>Características red hidrográfica</b>		
Longitud del Cause Principal (Km)	1.495	1.601
Número de arroyos (u)	15	16
Orden de la red Hídrica	2	3
Longitud de la Red Hídrica (Km)	3.192	3.151
Pendiente promedio de la red hídrica (%)	55.52	58.40
Cota inicial-cauce principal (m.s.n.m)	2857	2895
Cota final-cauce principal (m.s.n.m)	3495	3629

**Tabla 4-2.** Características fisiográficas microcuencas de análisis

De igual manera en la

<b>Parámetros Morfométricos de superficie y Relieve</b>	<b>Microcuenca Marianza</b>	<b>Microcuenca Marianza Aledaña</b>
Factor de Forma (Ff)	0.19	0.23
Índice de Circularidad (Rc)	0.32	0.36
Índice de Elongación (Re)	0.86	0.91
Índice de Compacidad (Kc)	1.76	1.66
Rectángulo Equivalente (Lmayor) (Km)	2.14	2.10
Rectángulo Equivalente (Lmenor) (Km)	0.28	0.31

Tabla 4-3, se muestran calculados los parámetros morfométricos para las dos microcuencas de análisis según lo explicado en la sección 3.4.3.

<b>Parámetros Morfométricos de superficie y Relieve</b>	<b>Microcuenca Marianza</b>	<b>Microcuenca Marianza Aledaña</b>
Factor de Forma (Ff)	0.19	0.23
Índice de Circularidad (Rc)	0.32	0.36
Índice de Elongación (Re)	0.86	0.91
Índice de Compacidad (Kc)	1.76	1.66
Rectángulo Equivalente (Lmayor) (Km)	2.14	2.10
Rectángulo Equivalente (Lmenor) (Km)	0.28	0.31

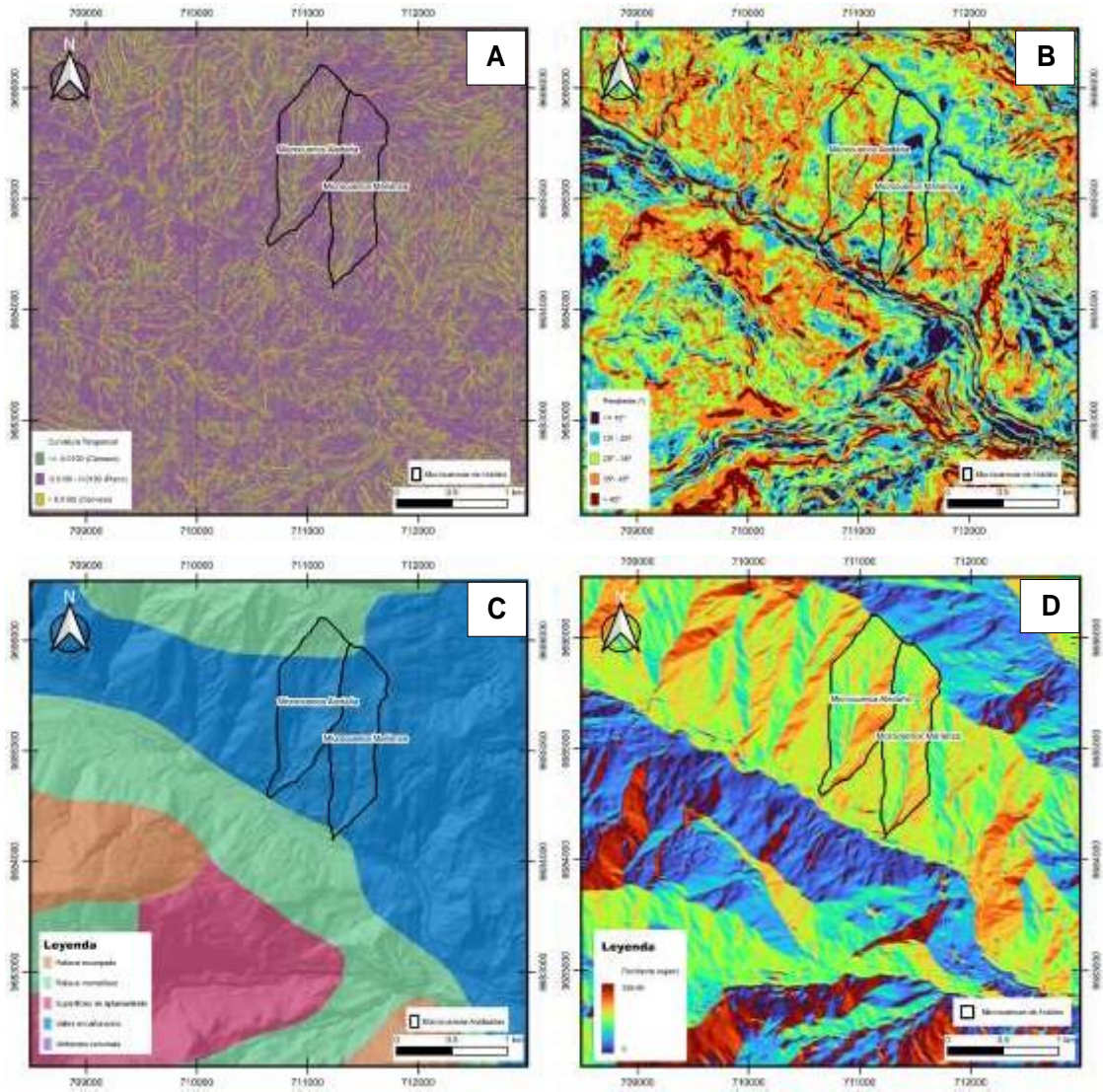
**Tabla 4-3.** Parámetros morfométricos microcuencas de análisis. Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.5 Parámetros geomorfológicos obtenidos mediante SIG

La representación gráfica de parámetros geomorfológicos obtenidos mediante QGIS (3.28) se muestra en la Figura 4-6. Estos datos obtenidos serán utilizados en etapas posteriores de la metodología RES. A continuación, se describen los resultados obtenidos:

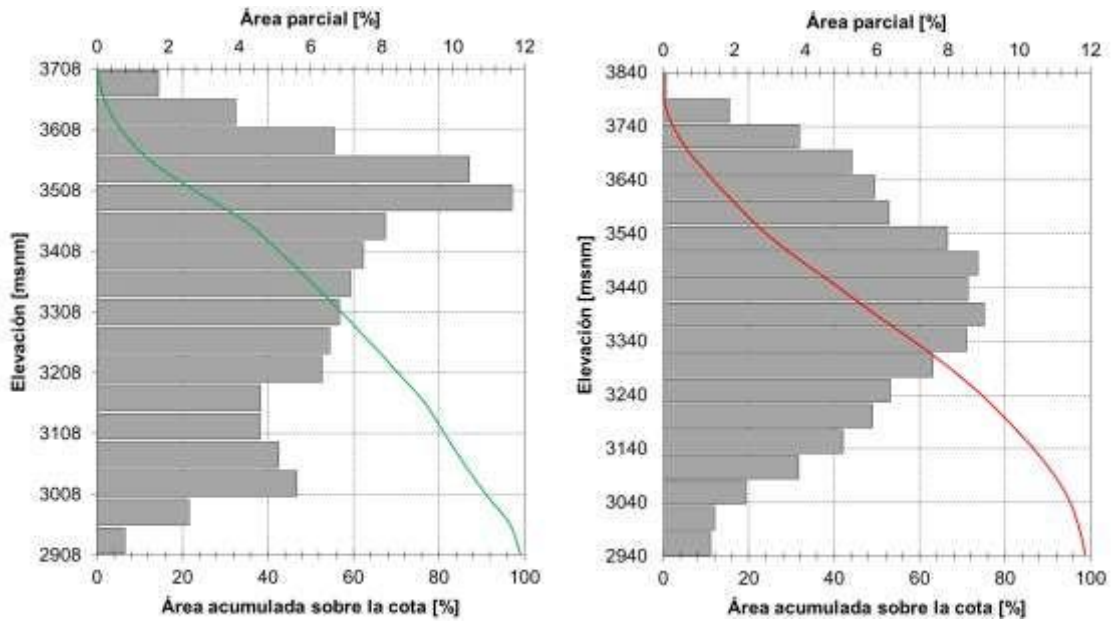
Las microcuencas de análisis presentan una acumulación superficie cóncava en las intermediaciones de la red hídrica. En zonas exteriores a los cauces principales la superficie es convexa y plana en su gran mayoría (ver. Figura 4-6a). Las pendientes de las microcuencas se encuentran en el rango de 1º-67º. Existe una mayor concentración de pendientes altas en las intermediaciones de la red de drenaje en la microcuenca Marianza. Además, esta microcuenca posee una zona de bajas pendientes en su parte

superior (ver. Figura 4-6b). La pendiente media de la microcuenca Marianza es 29° y de la microcuenca Marianza Aledaña es 33°. Las dos microcuencas de análisis son clasificadas como valles encañonados, la cual fue corroborada mediante varias visitas de campo (ver. Figura 4-6c). La orientación para la exposición a condiciones climáticas de la microcuenca Marianza es de 95°-312° y 91°-340° para la microcuenca Marianza Aledaña (ver. Figura 4-6d).



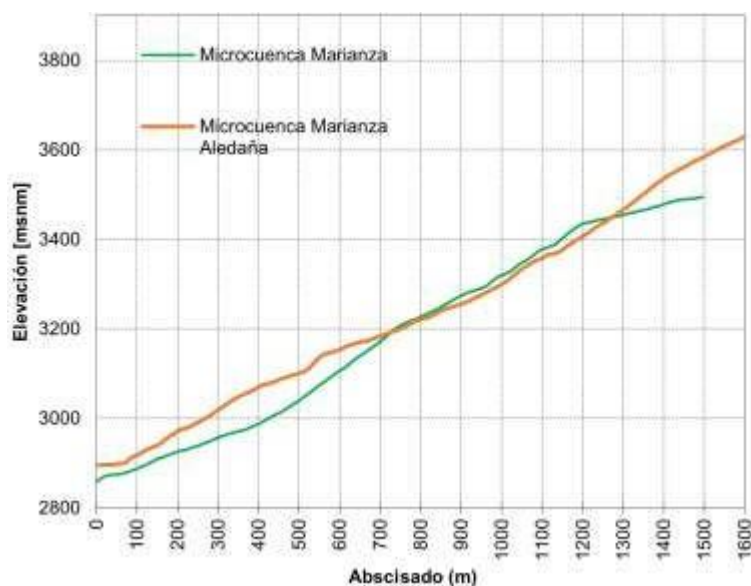
**Figura 4-6.** Parámetros geomorfológicos obtenidos mediante QGIS en el sector Marianza, parroquia Sayausí. WGS84/17S.: A: Curvatura Tangencial, B Pendiente, C Clasificación Geomorfológica, D Pendiente Aspect (Orientación). Fuente: Elaboración Propia

La curva hipsométrica de las microcuencas de estudio se presenta en la Figura 4-7.



**Figura 4-7.** Curva hipsométrica e histograma de altimetría de frecuencias. Izquierda: Microcuenca Marianza, Derecha: Microcuenca Marianza Aledaña. Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4-8 muestra el perfil del cauce principal de las dos microcuencas de análisis en el año 2015. El índice de pendiente (IP) para la microcuenca Marianza correspondiente al 48.16% mientras que para la microcuenca Marianza Aledaña el IP corresponde al 39.60%.

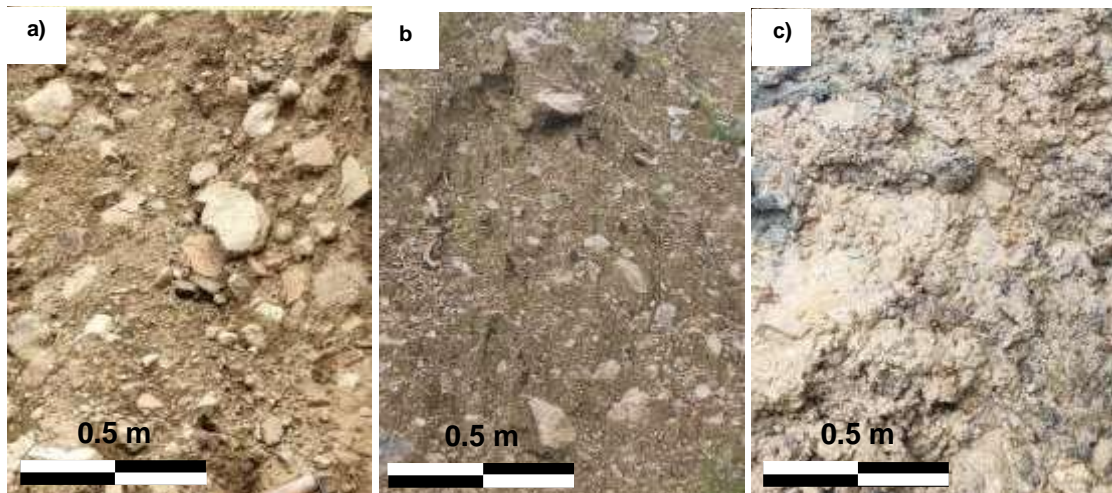


**Figura 4-8.** Perfil red del cauce principal microcuencas de análisis con base en el MDE del SIGTIERRAS (2015). Fuente: Elaboración Propia.

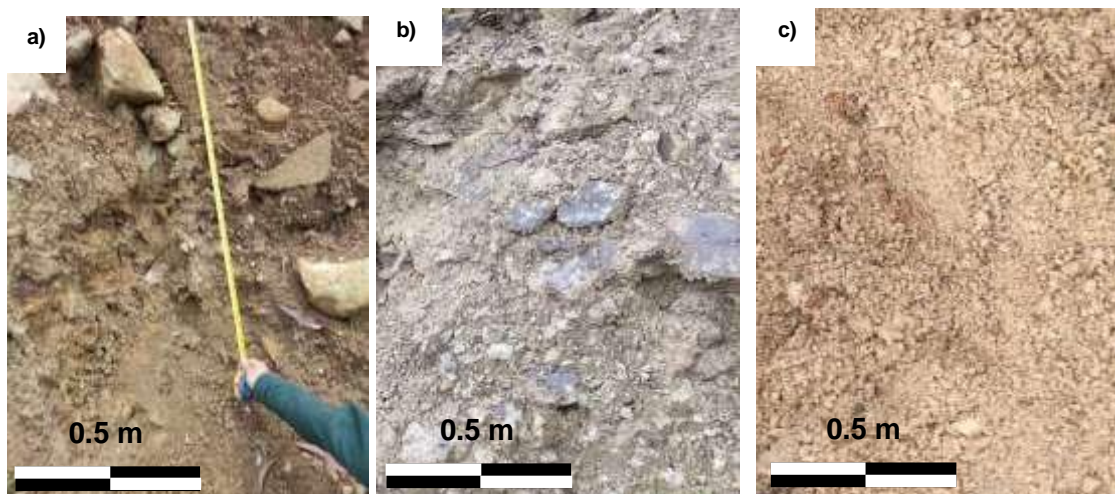
### 4.3 Ensayos en laboratorios de suelos

#### 4.3.1 Distribución de matriz de suelo

La Figura 4-9 y Figura 4-10 muestran las zonas donde se extrajeron las muestras de suelo en la microcuenca Marianza y Marianza Aledaña. En la Tabla 4-4 se refleja el porcentaje de matriz de suelo de las muestras extraídas.



**Figura 4-9.** Muestras de suelos en la microcuenca Marianza. a) Muestra 1 (Parte Baja), b) Muestra 2 (Parte Media), c) Muestra 3 (Parte Alta). Fuente: Elaboración Propia



**Figura 4-10.** Muestras de suelos en la microcuenca Marianza Aledaña. a) Muestra 1 (Parte baja), b) Muestra 2 (Parte Media), c) Muestra 3 (Parte Alta). Fuente: Elaboración Propia

Muestra		Roca (%)	Matriz (%)
Microcuenca Marianza	1	63	37
	2	42	58
	3	22	78
Microcuenca Marianza Aledaña	1	49	51
	2	66	34
	3	27	73

Tabla 4-4. Distribución de roca y matriz de suelo en microcuencas en el sector Marianza. Fuente: Elaboración Propia

### 4.3.2 Clasificación granulométrica

En la Figura 4-11a se presenta la distribución granulométrica de las muestras analizadas en la microcuenca Marianza, sitio del evento de flujo de detritos el 27 de marzo de 2022. La matriz de suelo ensayada exhibe un tamaño máximo de partícula de 2" (50mm). El valor medio de distribución de partículas  $D_{50}$  varía en el rango de 3 a 7mm. En términos de composición, se observa que el tamaño de partículas se distribuye de la siguiente manera: 48% a 59% de gravas (de 75 a 4.75mm), 14% a 33% de arena (de 4.75 a 0.075mm) y 15% a 38% de material fino (<0.075mm).

De igual manera la Figura 4-11b evidencia la distribución granulométrica de las muestras de la microcuenca Marianza Aledaña. El tamaño máximo de partícula es de 1" (25mm). El  $D_{50}$  varía entre 2 a 9 mm y la distribución de partículas consta de 44% a 65% de gravas, 18% a 41% de arena y 15% a 37% de material fino.

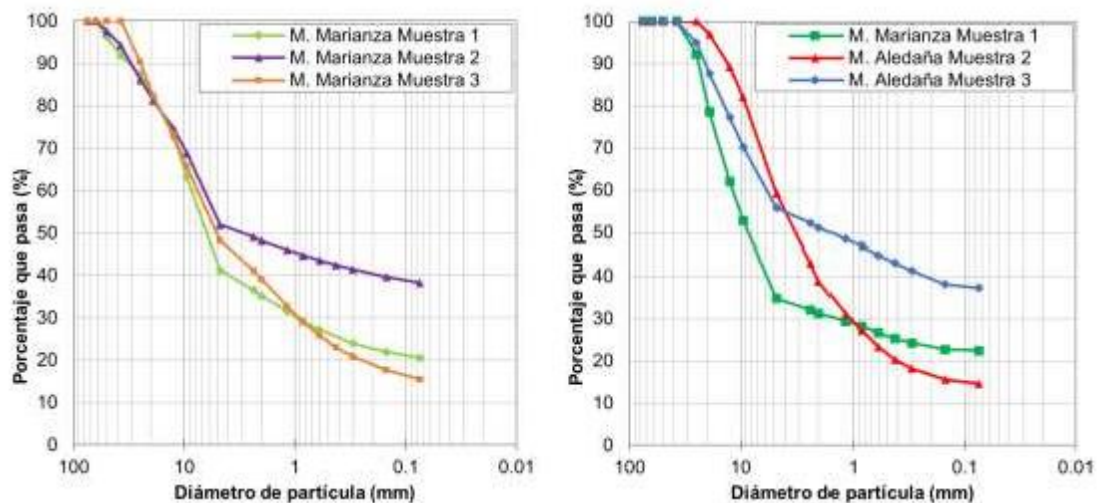


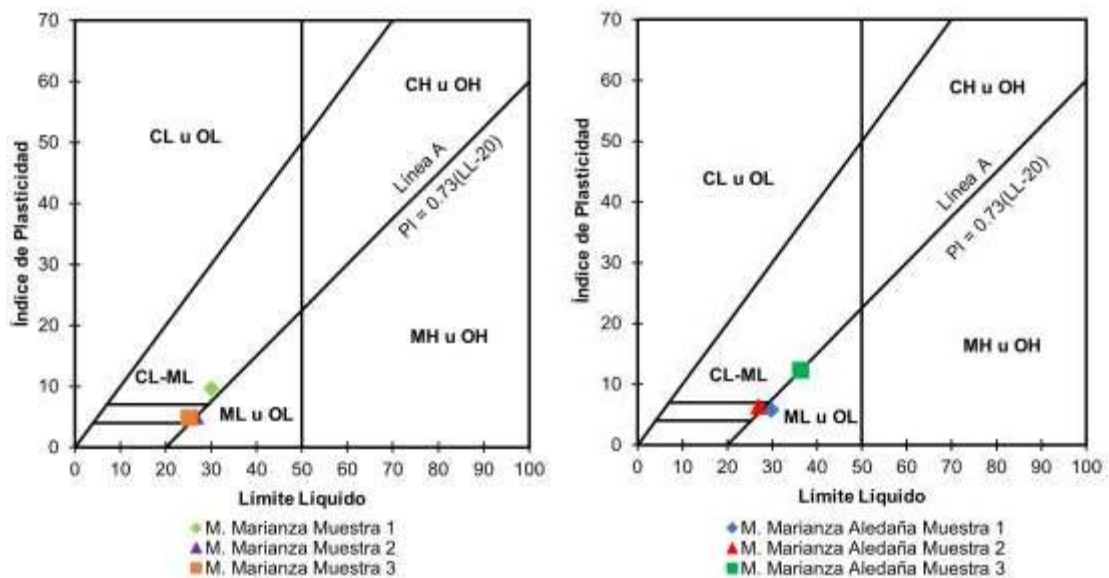
Figura 4-11. Curva granulométrica muestras de suelo. Izquierda: Microcuenca Marianza. Derecha: Microcuenca Marianza Aledaña. Fuente: Elaboración Propia.

**4.3.3 Clasificación SUCS de suelos, límites de Atterberg, humedad natural, índice de actividad**

Los resultados de los ensayos realizados en las dos microcuencas fueron clasificados según el (SUCS) y se registraron los valores del índice de liquidez (IL), el índice aproximado de movilidad (IMA) y la humedad natural. Dichos resultados se encuentran resumidos en la Tabla 4-5.

ÍndiceMuestra	Microcuenca Marianza			Microcuenca Marianza Aledaña		
	1	2	3	1	2	3
Humedad Natural w (%)	23	20	26	21	14	32
Límite Líquido LL (%)	30	27	25	36	27	30
Límite Plástico LP (%)	20	21	20	24	21	24
Índice Plástico IP (LL - LP)	9.61	5.05	4.76	12.23	6.33	5.76
Índice de Liquidez IL ( $\frac{w-LP}{IP}$ )	0.23	-0.22	1.25	-0.24	-1.00	1.42
Índice de Movilidad IMA ( $\frac{w}{LP}$ )	1.33	1.30	0.95	1.71	1.89	0.93
Tipo de Suelo (SUCS)	GC-GM	SC-SM	GC-GM	GC	SC-SM	SC-SM
Comentario	Grava limo arcillosa con arena	Arena limo arcillosa con grava	Grava limo arcillosa con arena	Grava Arcillosa con arena	Arena limo arcillosa con grava	Arena Limo arcillosa con grava

**Tabla 4-5.** Límites de Atterberg, Humedad y Clasificación de Suelos SUCS en el sector Marianza



**Figura 4-12.** Clasificación de suelos en la carta de plasticidad para las muestra. a) Mirocuenca Marianza, b) Microcuenca Marianza Aledaña. Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4-12 representa la relación entre el límite líquido y el índice de plasticidad en la carta de plasticidad de Casagrande, lo que permite determinar la clasificación de los suelos. Se observa que el material de suelo que pasa a través del tamiz N°40 (0.425mm) muestra un comportamiento característico de suelos poco cohesivos, correspondientes a arcillas inorgánicas de baja plasticidad y limos inorgánicos de baja compresibilidad para las dos microcuencas en el área de estudio.

Para la microcuenca del sector Marianza el suelo ensayado corresponde a grava y arena limo arcillosa. Presenta un rango de humedades naturales entre 20% y 27% al momento de su extracción. El límite líquido se encuentra en el rango de 25% a 30%, a su vez el límite plástico está en el rango de 20% a 21%. En base a su índice plástico el suelo es poco plástico con un IP entre (4-10). En base a sus índices de liquidez, se determinó que las muestras de la parte baja fueron extraídas en estado plástico, las de la parte media en estado sólido y las de la parte alta en estado líquido.

La microcuenca Marianza Aledaña exhibe una clasificación SUCS correspondiente a gravas limo arcillosa con grava y arenas limo arcillosa con grava. Las muestras extraídas presentaron un rango de humedad entre 14% a 33%, un límite líquido entre 27% a 30%, y un límite plástico entre 20% a 25%. El índice plástico varió en el rango de (5-13) con una plasticidad media. Se determinó que las muestras de la parte baja y media fueron extraídas en estado sólido, mientras que las muestras de la parte superior se extrajeron en estado líquido según su índice de liquidez. Los valores de índice aproximado de actividad se explicarán adelante.

#### **4.4 Precipitación en el sector Marianza**

##### **4.4.1 Validación de datos.**

Se obtuvo las curvas doble masa para las diferentes combinaciones de las 3 estaciones disponibles con el uso de datos de precipitación acumulada mensual luego del procesamiento de datos crudos. Es apreciable la ruptura en la pendiente de las curvas indicando una variación en la proporcionalidad de los datos analizados como se muestra en la Figura 4-13. Estas variaciones se registran en varios periodos y son causadas por la falta de datos o por la presencia de datos duplicados en el registro. Un resumen de los datos faltantes en las diferentes estaciones se muestra en la Tabla 4-6.



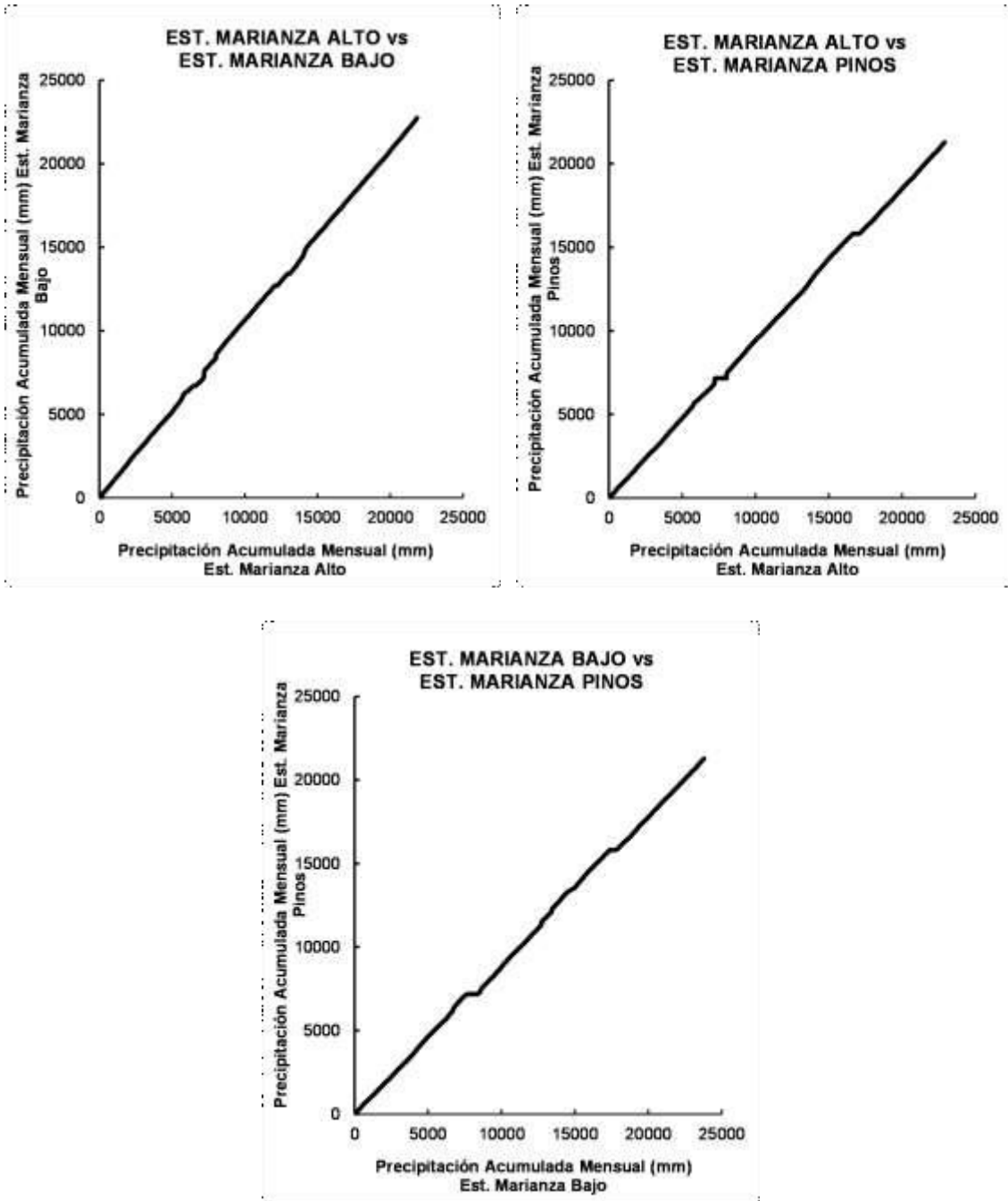


Figura 4-13. Análisis de curva doble masa para valores acumulados mensuales (Periodo Mayo/2004 - Marzo/2023). Fuente: Elaboración Propia.

Estación	Periodo faltante de datos
Marianza Alto	14/06/2009 - 14/08/2008
	17/11/2010 - 08/02/2011
	08/08/2011 - 16/11/2011
Marianza Bajo	26/03/2010 - 21/04/2010
	27/06/2010 - 17/07/2010
	27/10/2011 - 16/11/2011
	25/12/2014 - 18/02/2015
	10/09/2015 - 10/11/2015
Marianza Pinos	08/02/2011 - 08/08/2011
	10/10/2018 - 12/02/2019

Tabla 4-6. Resumen de periodos con datos faltantes para las estaciones de registro. Fuente: Elaboración Propia

Para la corrección de datos duplicados se eliminaron valores repetidos durante el procesamiento de datos crudos. Sin embargo, ante la carencia de datos para los periodos mencionados previamente fue necesario un ajuste de estos mediante el método de la razón normal. Se estimó un patrón a partir de los registros de precipitación acumulada mensual presentes en un mismo periodo para las tres estaciones. Se determinó el coeficiente de proporcionalidad para cada una de las estaciones permitiendo rellenar los datos faltantes. La Tabla 4-7 muestra las pendientes obtenidas al graficar el patrón definido junto con los registros de cada estación.

Estación	Pendiente
Marianza Alto	0.9932
Marianza Bajo	0.9697
Marianza Pinos	1.0395

**Tabla 4-7.** Pendientes para corrección de datos faltantes para cada estación. Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se calcularon los valores faltantes de precipitación mensual en cada una de las estaciones obteniendo así las curvas doble masa con valores corregidos, como se muestra la Figura 4-18. Del mismo modo se pudo determinar la ecuación de la recta que se ajusta a cada uno de los gráficos. Esto permite analizar la proporcionalidad y validar el uso de los datos de cada una de las estaciones. Las curvas son prácticamente líneas rectas ininterrumpidas, presentando pendientes de 1.015, 0.960 y 0.946.

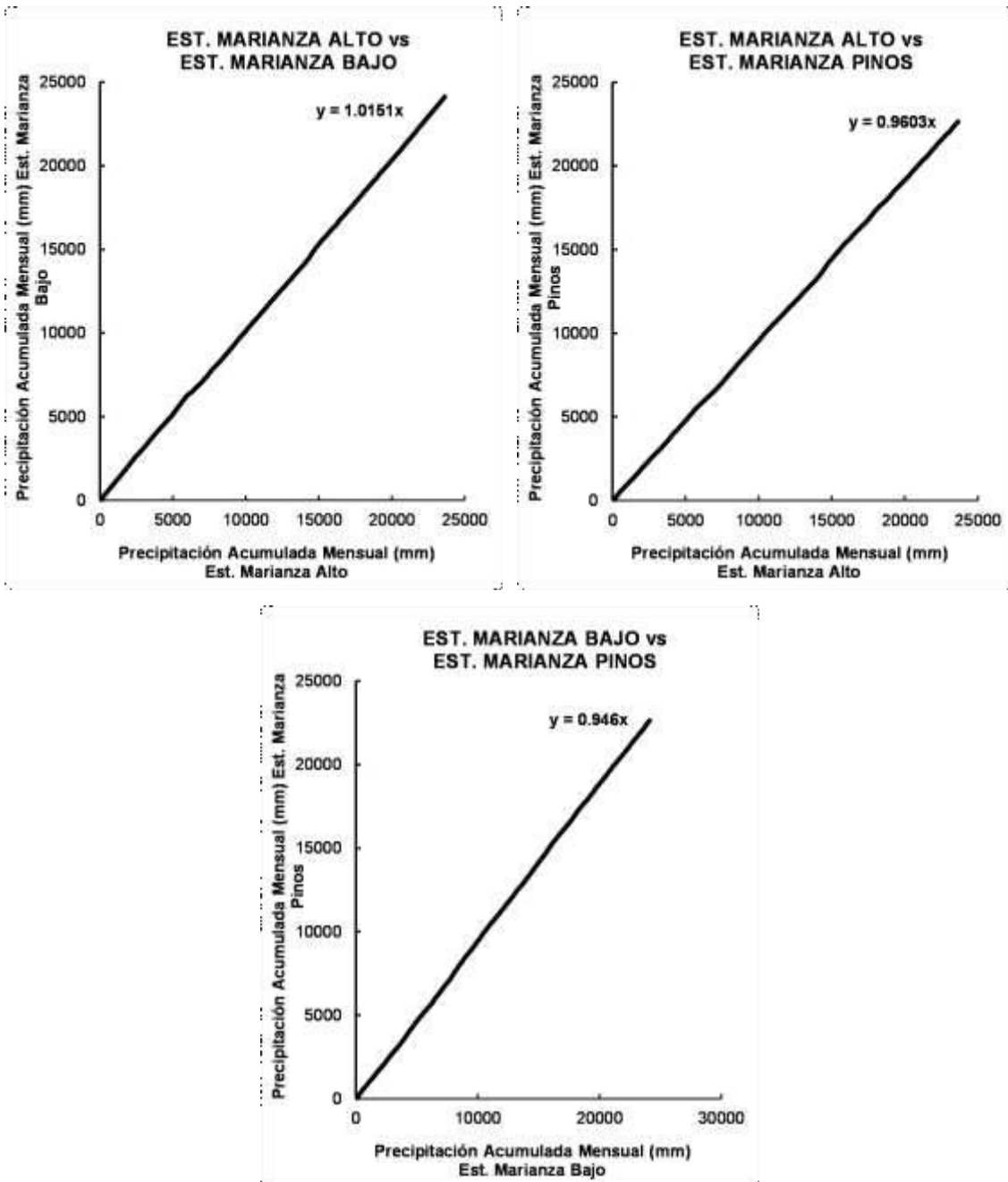


Figura 4-14. Resultado de curva doble masa para datos corregidos. Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4.2 Hietograma Mensual del Periodo de Registro

A partir de los datos procesados y corregidos de lluvia acumulada mensual se construyeron hietogramas para cada una de las estaciones durante el periodo de registro. Los resultados obtenidos muestran que marzo de 2022 es el mes con la mayor precipitación durante el periodo de registro en la estación de Marianza Bajo (Figura 4-15). Mientras que en las estaciones de Marianza Alto (Figura 4-16) y Marianza Pinos (Figura 4-17) el mes de marzo de 2022 corresponde al segundo mes más lluvioso registrado, solo superado por el mes de abril de 2011.

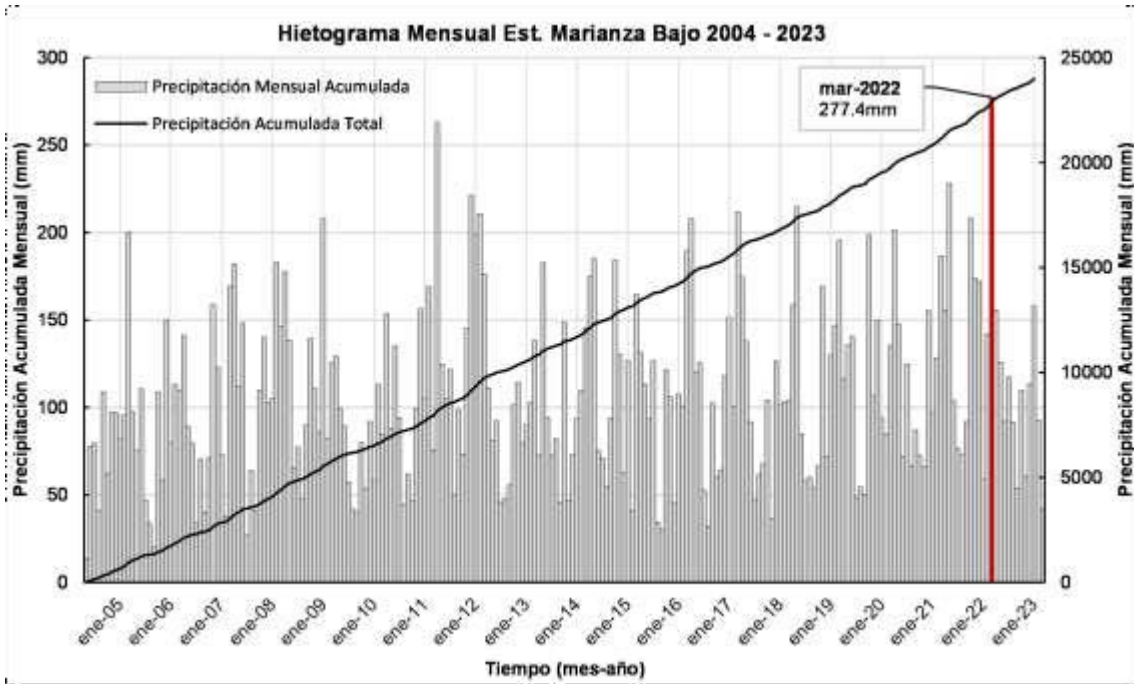


Figura 4-15. Precipitación incremental y acumulada estación Marianza bajo. Fuente: Elaboración Propia

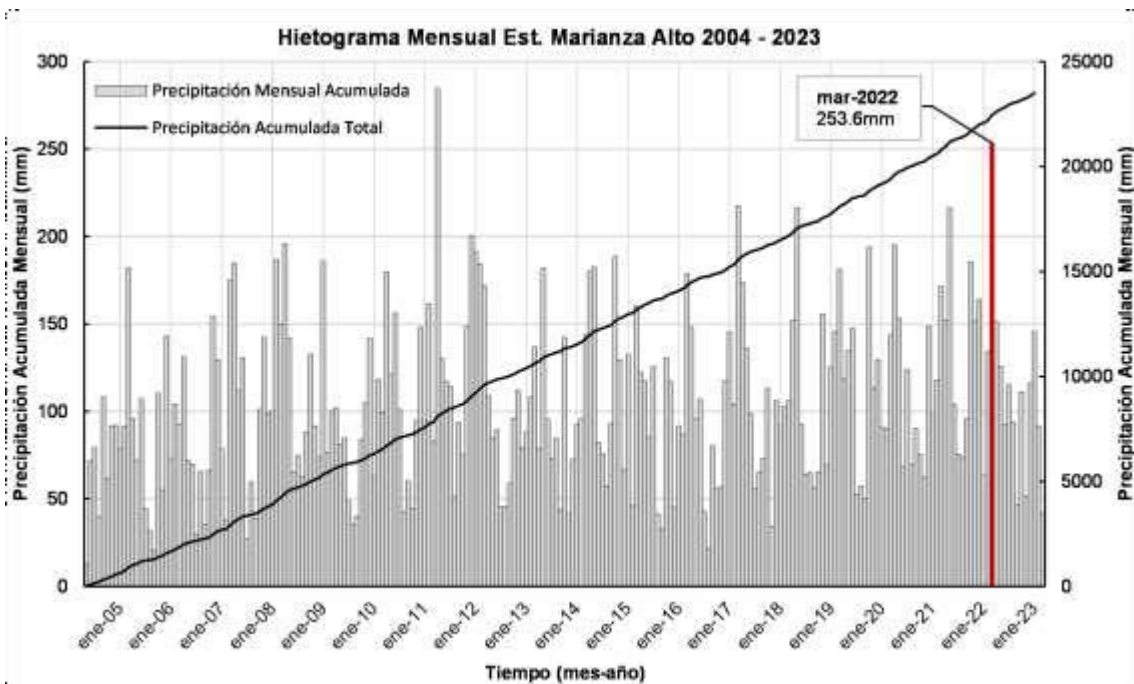


Figura 4-16. Precipitación incremental y acumulada estación Marianza Alto. Fuente: Elaboración Propia

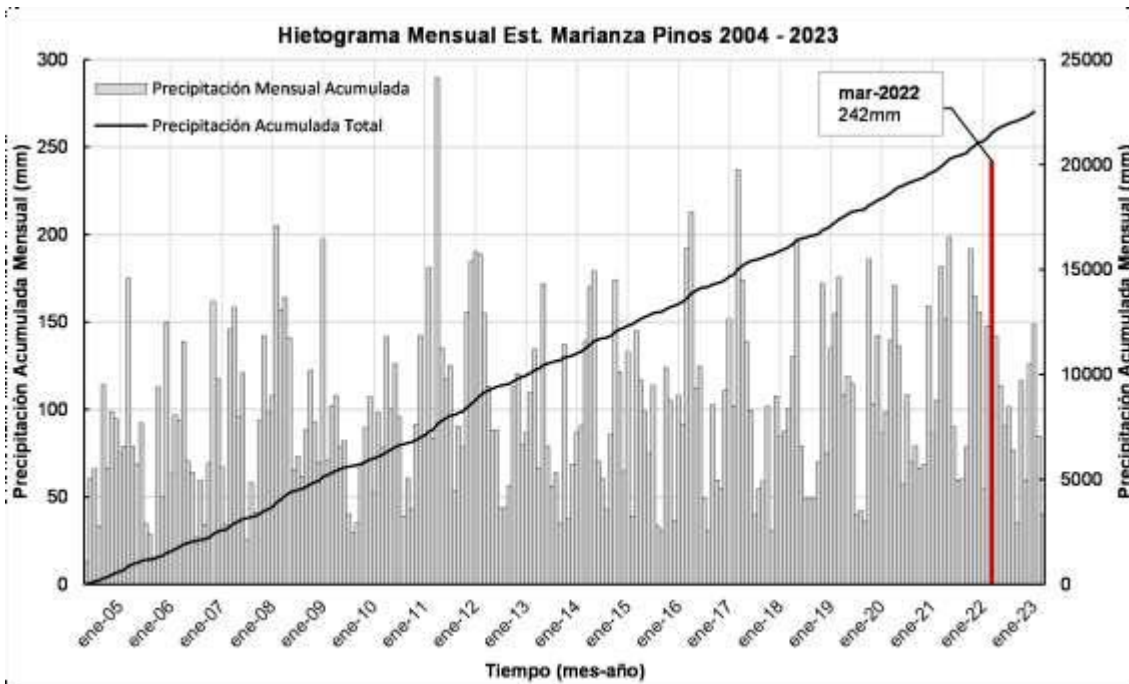


Figura 4-17. Precipitación incremental y acumulada estación Marianza Pinos. Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4.3 Hietograma de mes de marzo 2022.

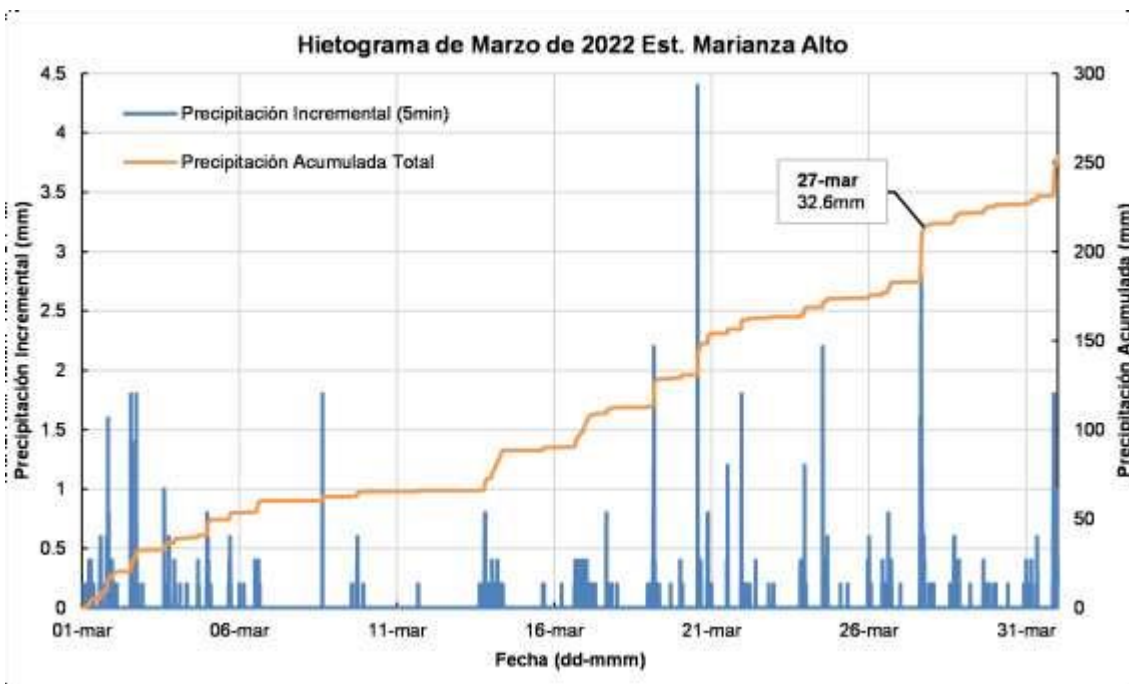
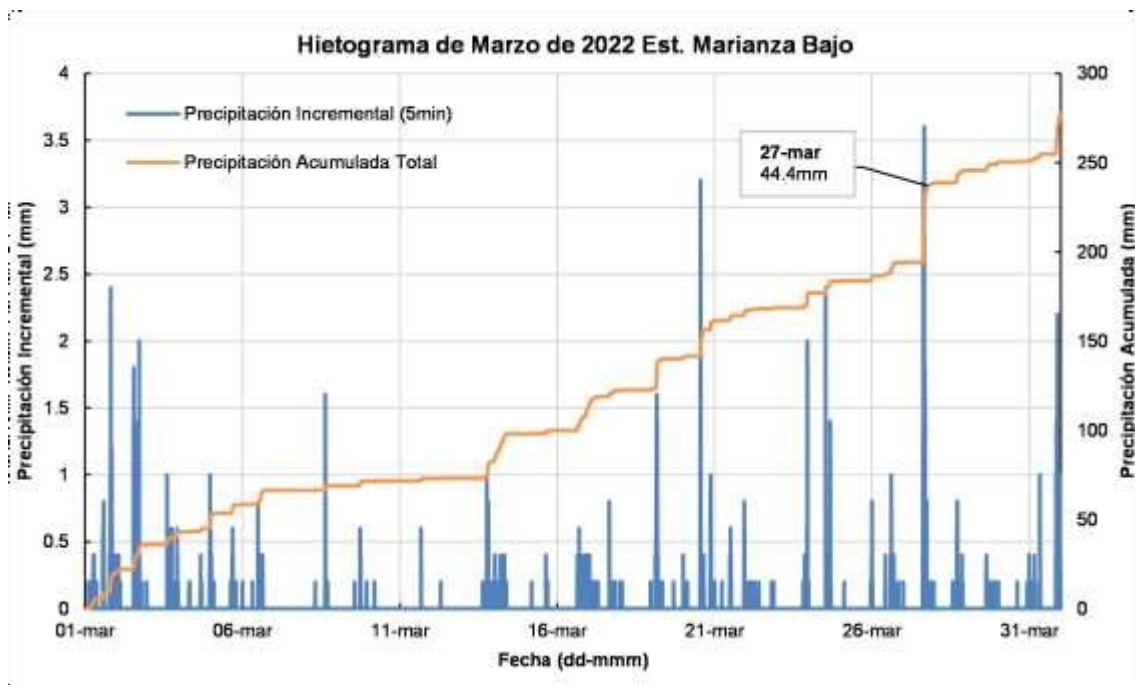


Figura 4-18. Precipitación incremental y acumulada marzo 2022 Estación Marianza Alto. Fuente: Elaboración Propia

Se elaboró lo hietogramas del mes de marzo de 2022 para precipitación incremental y acumulada con datos procesados en un intervalo de tiempo de 5 minutos. La Figura 4-18 muestra el resultado obtenido para la estación de Marianza Alto siendo apreciable que el mayor incremento en la precipitación acumulada se produjo el día 27 de marzo de 2022, coincidiendo con el evento de flujo de detritos ocurrido en el sector Marianza.

La cantidad de lluvia registrada durante el evento es de 31.6mm, lo cual representa el 97% de la precipitación diaria y cerca del 13% del total mensual del mes de marzo.

Los resultados en las estaciones de Marianza Bajo (Figura 4-19) y Marianza Pinos (Figura 4-20) reflejan condiciones muy similares en donde de igual manera se registra la mayor acumulación durante el 27 de marzo de 2022. La cantidad de lluvia acumulada durante el evento corresponde a casi a la totalidad de la lluvia diaria. La precipitación diaria en la estación Marianza Bajo es la máxima registrada entre las estaciones y representa alrededor del 16% de la precipitación mensual.



**Figura 4-19.** Precipitación incremental y acumulada marzo 2022 Estación Marianza Bajo.  
Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 4-8 muestra la profundidad máxima registrada para cada una de las estaciones, siendo la estación de Marianza Bajo la que presenta el valor más alto teniendo una precipitación de 3.6mm en 5 minutos. Se calculó la máxima intensidad de precipitación en función de los datos medidos a 5 minutos en las estaciones obteniendo una intensidad pico de 43.2 mm/h. La Tabla 4-8 muestra intensidad de precipitación para diferentes intervalos de tiempo. La hora del registro de máxima intensidad coincide para las 3 estaciones produciéndose alrededor de las 15:50 del 27 de marzo de 2022.

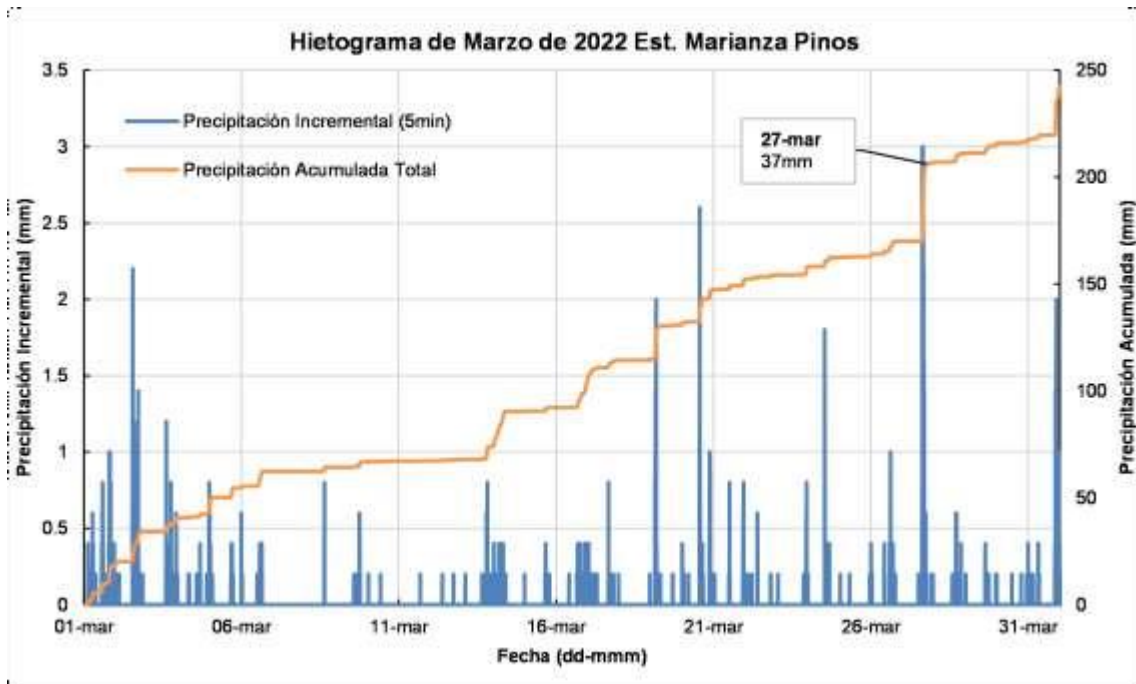


Figura 4-20. Precipitación incremental y acumulada marzo 2022 Estación Marianza Pinos. Fuente: Elaboración Propia

Estación	Profundidad Máxima 5 minutos (mm)	Intensidad Máxima 5 minutos (mm/h)	Intensidad Máxima 30 minutos (mm/h)	Intensidad Máxima 1 hora (mm/h)	Intensidad Máxima 2 horas (mm/h)
Marianza Alto	2.8	33.6	26.4	20.4	14.1
Marianza Bajo	3.6	43.2	28.8	26.8	19.2
Marianza Pinos	3.0	36.0	24.0	23.0	16.8

Tabla 4-8. Profundidad e intensidad máxima para las estaciones durante el evento del 27 de marzo de 2022. Fuente: Elaboración Propia

La comparativa de precipitación acumulada durante el mes de marzo de 2022 en las estaciones de Marianza Alto, Bajo y Pinos se puede observar en la Figura 4-21. Los resultados obtenidos muestran que todas las estaciones poseen un comportamiento similar con variabilidad en la cantidad de precipitación registrada. Es importante recalcar que las diferentes estaciones presentan condiciones topográficas y de cobertura vegetal diferentes siendo parte de las causas por la que esto ocurre.

La estación de Marianza bajo es la que presenta un mayor registro de precipitaciones mientras que la medición menor se la registra en la estación de Marianza Pinos. Esta variabilidad está presente a lo largo de los diferentes análisis hidrológicos realizados y es considerada para la aplicación de los datos de precipitación en subcapítulos posteriores.

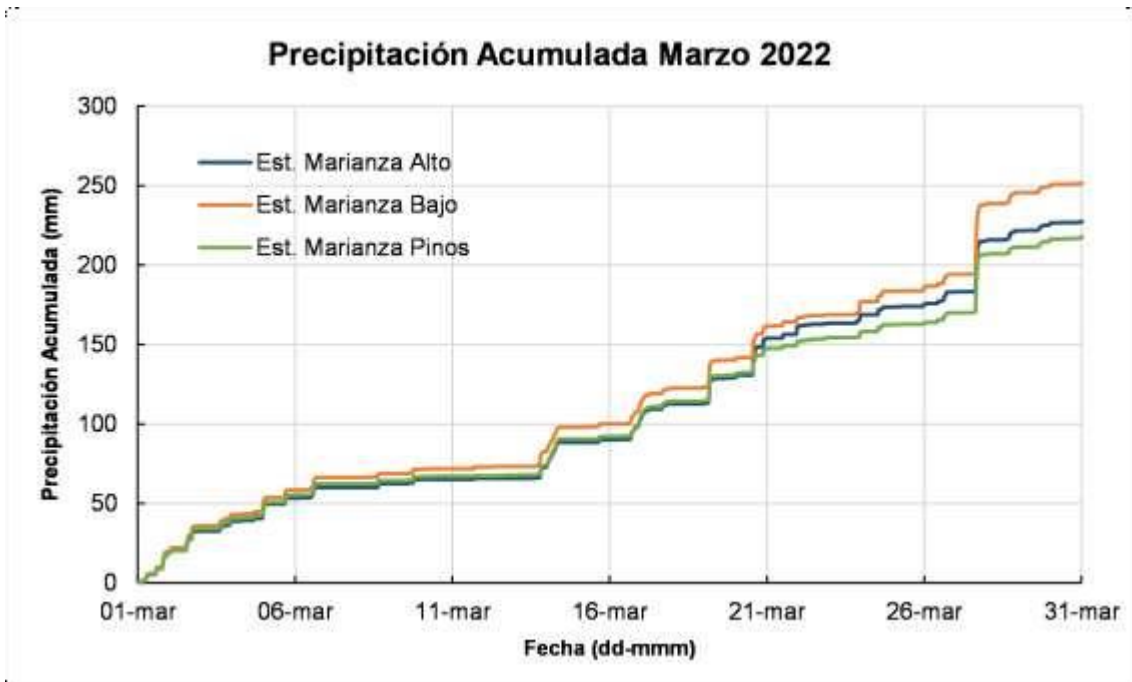


Figura 4-21 Precipitación acumulada para el mes de marzo de 2022 en las estaciones de registro.  
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4.4 Curva de variación estacional

Se han determinado las curvas de variación estacional para las diferentes estaciones mediante percentiles obtenidos a partir de datos de precipitación de lluvia mensual para todo el periodo de registro. Los resultados obtenidos comparten características en cuanto a la estacionalidad de la precipitación a lo largo del año. La Figura 4-22 muestra el resultado con datos de la estación Marianza Alto en donde se puede observar dos estaciones con menor y mayor precipitación. Los meses de junio hasta septiembre presentan la menor precipitación mientras que existen un aumento entre los meses de octubre hasta mayo.

Esta información es similar con los resultados obtenidos para la estación de Marianza Bajo (Figura 4-23) y Marianza Pinos (Figura 4-24). Cabe recalcar que el periodo de mayor precipitación tiene su pico durante los meses de marzo y abril, además se puede ver que el registro de precipitación para el mes de marzo de 2022 obtenido previamente presenta valores que son superiores a la probabilidad de excedencia del 10% haciendo de este mes un registro particularmente alto a lo largo del tiempo de análisis.



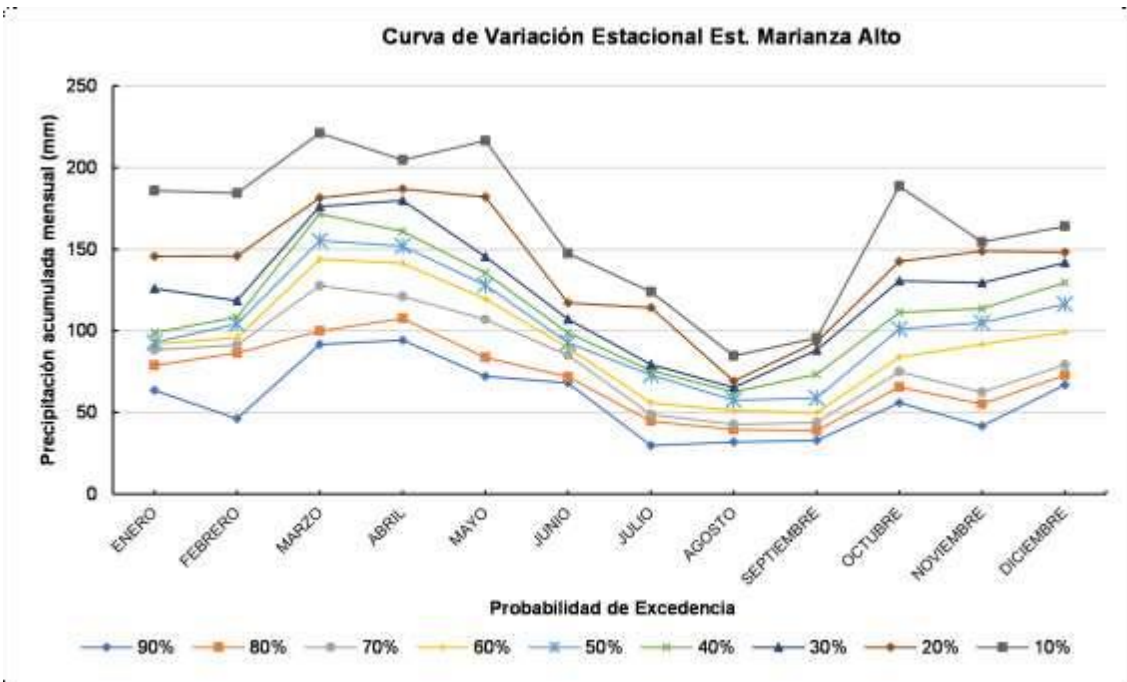


Figura 4-22. Análisis de estacionalidad Estación Marianza Alto. Fuente: Elaboración Propia

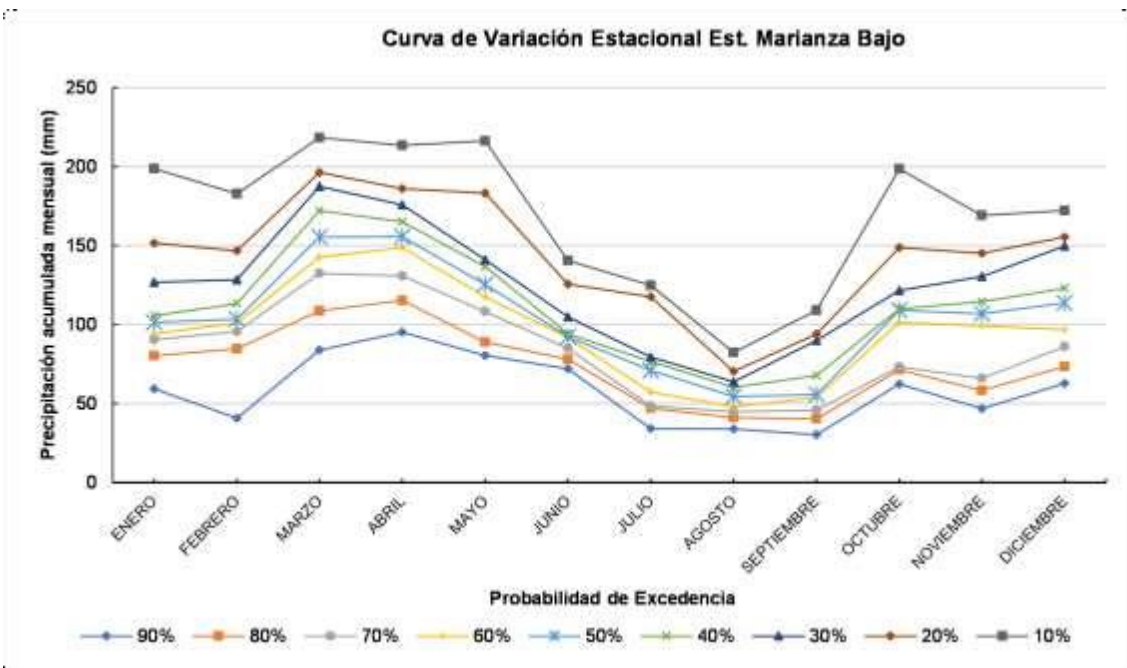


Figura 4-23. Análisis de estacionalidad Estación Marianza Bajo. Fuente: Elaboración Propia

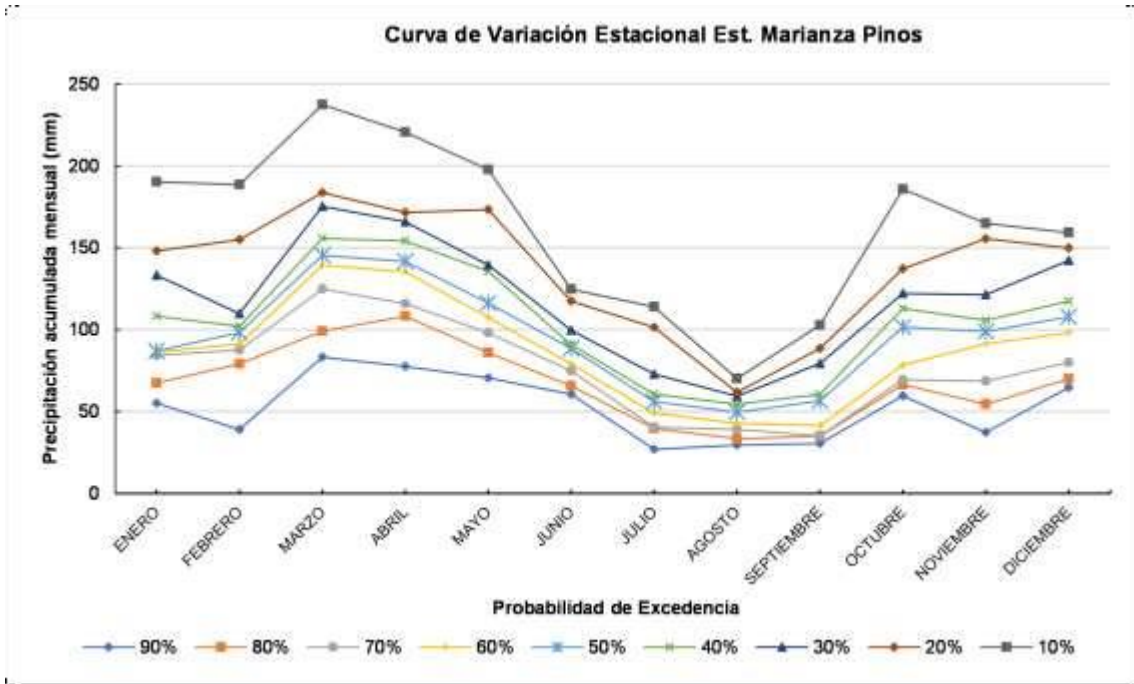


Figura 4-24. Análisis de estacionalidad Estación Marianza Pinos. Fuente: Elaboración Propia

#### 4.4.5 Eventos extremos

La Figura 4-25 muestra los resultados obtenidos para un periodo de tres horas en donde existen valores que sobresalen como son los correspondientes a 2013, 2014 y 2022. Este periodo de análisis se lo estableció en base a la duración aproximada del evento presentado el 27 de marzo de 2022. El valor obtenido de precipitación máxima en tres horas del mes de marzo del 2022 corresponde a la fecha del día del evento a partir de las 15:00 horas. Además, La estación de Marianza bajo registra el valor extremo más alto para el periodo de análisis, los resultados son consistentes tanto para la estación Marianza Alto y Marianza Pinos.

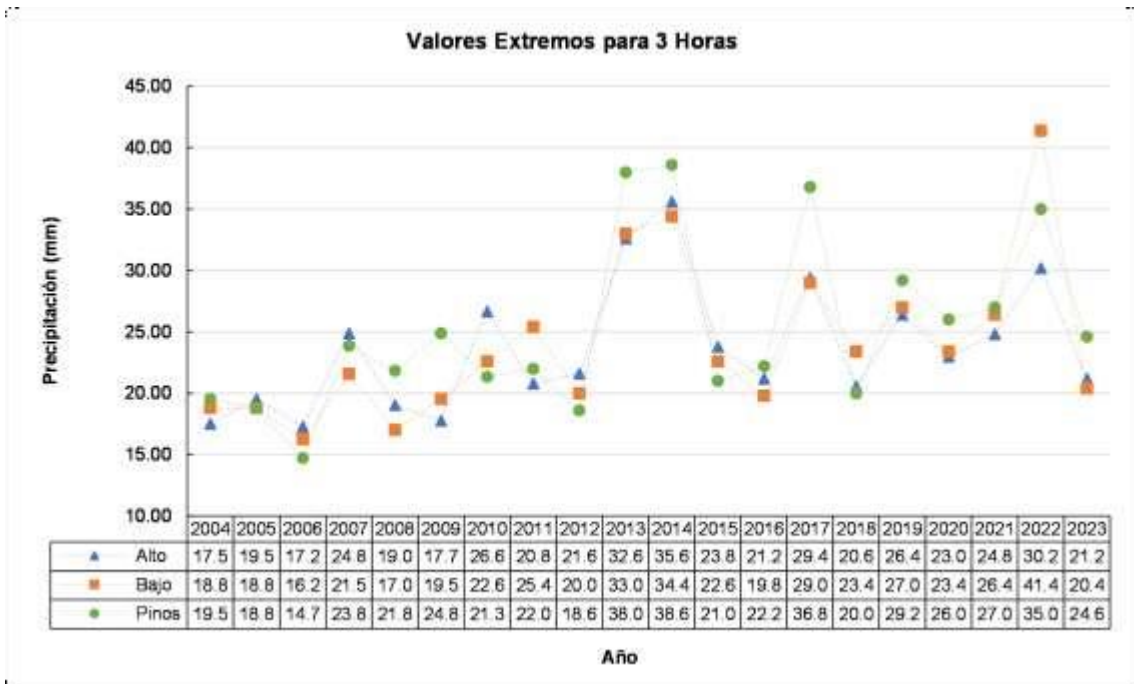


Figura 4-25. Resultados de valores extremos para un periodo de 3 horas entre los años de 2004 hasta 2023. Fuente: Elaboración Propia



Figura 4-26. Resultados de valores extremos para un periodo de 24 horas entre los años de 2004 hasta 2023. Fuente: Elaboración Propia

La Figura 4-26 muestra los resultados para los valores extremos obtenidos en un periodo de 24 horas. Se tiene una mayor consistencia entre los valores de las 3 estaciones disponibles para casi la totalidad de los registros que presentan un pico claro en el año 2014 en donde se captó aproximadamente 70mm de precipitación en un periodo de 24 horas. Los valores correspondientes al año 2022 de igual forma

corresponden a la fecha del 27 de marzo iniciando alrededor de las 15:00. Se puede observar que dicho valor es similar a los registrados en años anteriores.

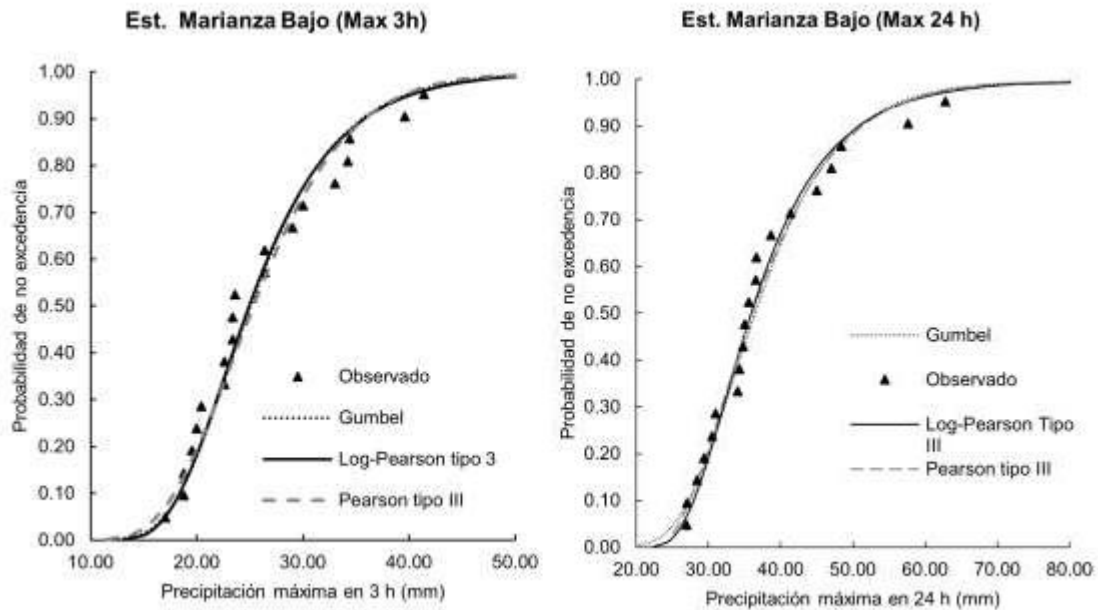
#### 4.5 Ajuste de lluvia extrema a funciones de distribución de probabilidad

Se realizó el ajuste de precipitación máxima en 3h y 24h para las estaciones Marianza Alto, Marianza Bajo y Marianza Pinos. La evaluación de ajustes por medio del test Kolmogórov-Smirnov a las funciones de distribución de probabilidad Gumbel, Pearson tipo 3 y Log-Pearson tipo 3 se muestran en la Tabla 4-9. Según el parámetro estadístico  $D_{\alpha,n}$  se determinó que todos los ajustes son apropiados para las estaciones ubicadas en el sector Marianza. Para determinar el mejor ajuste en cada caso y estación, se seleccionó el ajuste con menor distancia.  $D_n$ .

Función de distribución de probabilidad	Estación Marianza Bajo		Estación Marianza Alto		Estación Marianza Pinos		Estadístico de la prueba Kolmogórov-Smirnov ( $n=20$ , $\alpha=0.05$ )
	Precipitación Máxima en 3h	Precipitación Máxima en 24h	Precipitación Máxima en 3 h	Precipitación Máxima en 24 h	Precipitación Máxima en 3 h	Precipitación Máxima en 24 h	
	$D_n$	$D_n$	$D_n$	$D_n$	$D_n$	$D_n$	
Gumbel	0.1116	0.1160	0.1040	0.0938	0.1296	0.1173	0.2941
Pearson Tipo 3	0.0953	0.1235	0.1089	0.0976	0.1201	0.1795	0.2941
Log-Pearson Tipo 3	0.1080	0.0870	0.0984	0.0798	0.1260	0.1314	0.2941

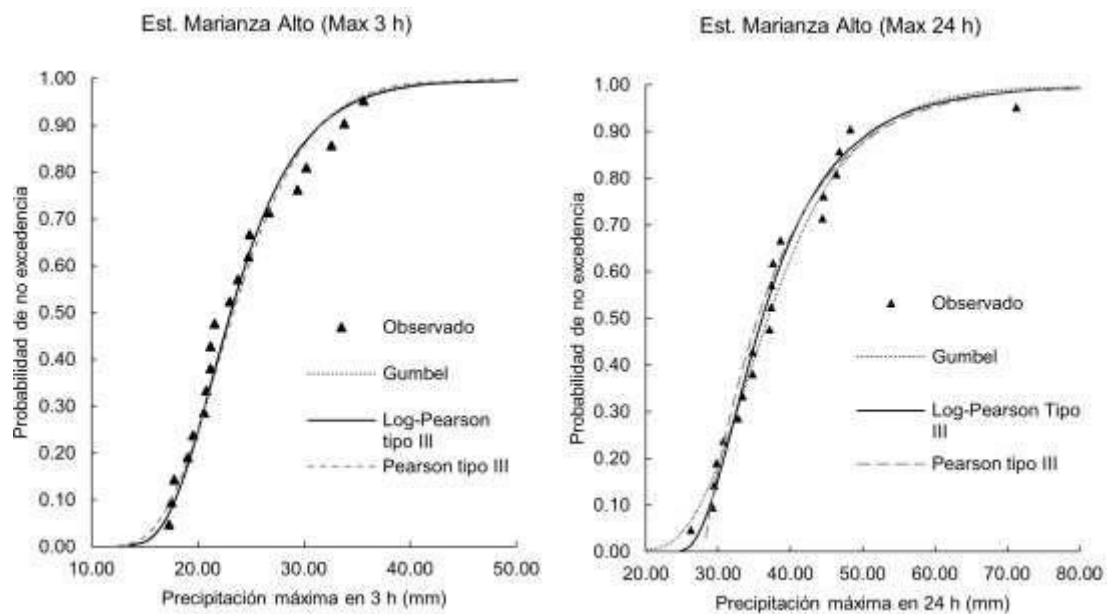
**Tabla 4-9.** Test Kolmogórov-Smirnov ajuste de funciones de distribución de probabilidad a precipitación máxima en 3h y 24 h. Fuente: Elaboración Propia

El ajuste a las funciones de distribución de probabilidad para la estación Marianza Bajo se ilustra en la Figura 4-17. Se seleccionó la distribución Pearson Tipo 3 para evaluar la precipitación máxima en un periodo de 3 horas, mientras que se seleccionó la distribución Log-Pearson Tipo 3 para el periodo de 24 horas.



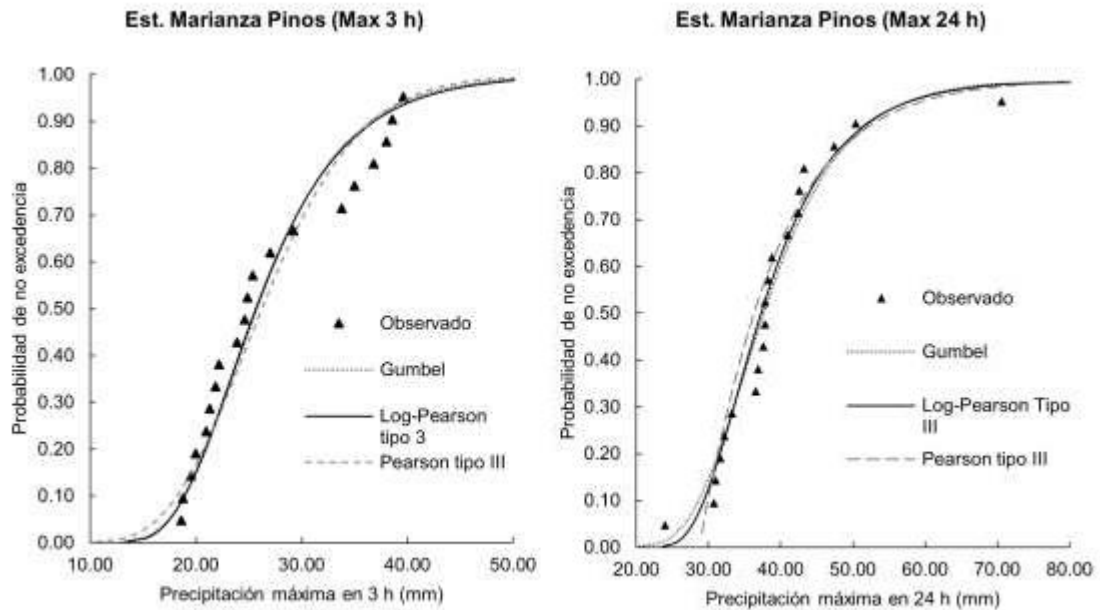
**Figura 4-27.** Ajuste de precipitación extrema estación Marianza Bajo a funciones de distribución de probabilidad. Fuente: Elaboración Propia.

El ajuste de valores extremos de precipitación para la estación Marianza Alto se ilustra en la Figura 4-18. Para los periodos de 3 y 24 horas se seleccionó la distribución Log-Pearson tipo 3.



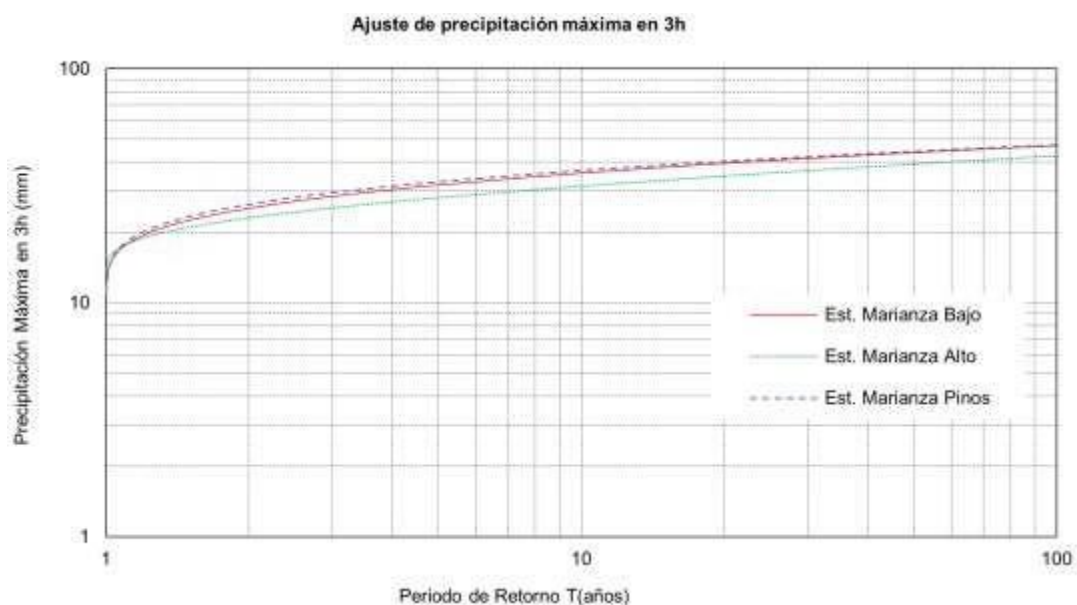
**Figura 4-28.** Ajuste de precipitación extrema estación Marianza Alto a funciones de distribución de probabilidad. Fuente: Elaboración Propia.

El ajuste para precipitación extrema de la estación Marianza Pinos, se ilustra en la Figura 4-19. Para un periodo de 3 horas se seleccionó la distribución Pearson tipo 3 y para un periodo de 24 horas se seleccionó la distribución Gumbel.



**Figura 4-29.** Ajuste de precipitación extrema estación Marianza Pinos a funciones de distribución de probabilidad. Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 4-30 presenta el ajuste realizado para los valores de precipitación máxima acumulada en un periodo de 3 horas. Durante el evento del 27 de marzo de 2022 en el sector Marianza, las estaciones pluviométricas registraron una precipitación máxima acumulada en 3 horas que osciló entre 30mm y 42mm. Según el análisis realizado, se determinó que estas lluvias tienen un período de retorno de 8 años para la estación Marianza Alto y Marianza Pinos, y para la estación Marianza Bajo, esta lluvia tiene un período de retorno de 30 años.



**Figura 4-30.** Ajuste de precipitación máxima en 3h sector Marianza. Fuente: Elaboración Propia.

De igual manera, los resultados de ajuste de precipitación máxima acumulada en 24 h se muestran en la Figura 4-31. En un periodo de 24 horas la precipitación máxima registrada el 27 de marzo del 2022 fue de 41 a 44mm en el sector. Según el análisis realizado, se determinó que estas lluvias tienen un período de retorno de 3 a 6 años.

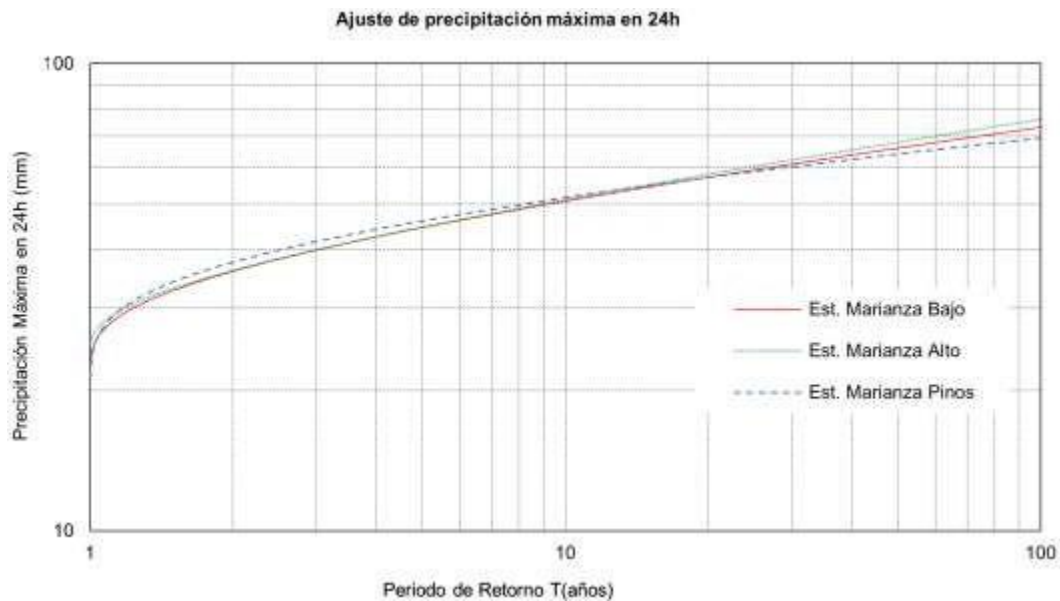


Figura 4-31. Ajuste de precipitación máxima en 24 h sector Marianza. Fuente: Elaboración Propia

#### 4.6 Modelación lluvia-escorrentía de dos microcuencas.

Con el uso del software HEC-HMS se obtuvo los resultados correspondientes al hidrograma y caudal pico registrados durante el evento del 27 de marzo de 2022. La modelación se realizó en base a la metodología indicada en la sección 3.8 para la microcuenca de Marianza y la microcuenca Marianza Aledaña. Los resultados reflejan 2 consideraciones con respecto a las condiciones antecedentes de humedad y el periodo de análisis para cada simulación, mismos que se explicarán en subcapítulos posteriores.

##### 4.6.1 Grupo hidrológico del suelo y número de curva

Los resultados de la clasificación del HSG se presentan en la Figura 4-32 conforme la metodología de la sección 3.8.2.1, de igual manera la clasificación del número de curva se presenta en la Figura 4-33 conforme lo establecido en la sección 3.8.2.3.

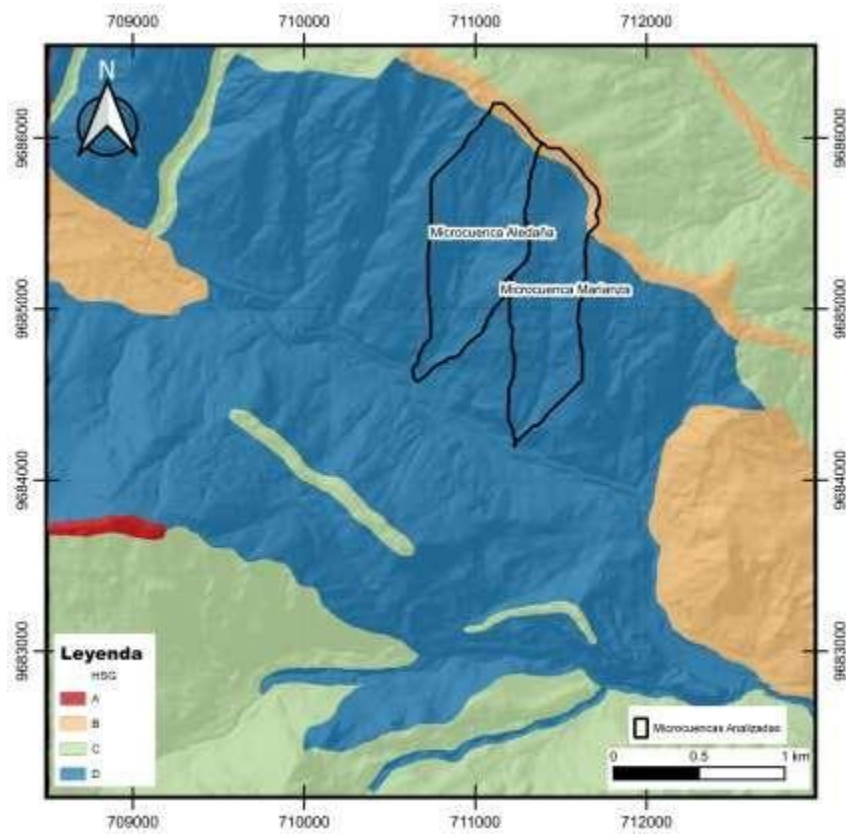


Figura 4-32. Grupo hidrológico de suelo. Parroquia Sayausí, WGS84/Zona 17S. Fuente. Elaboración Propia.

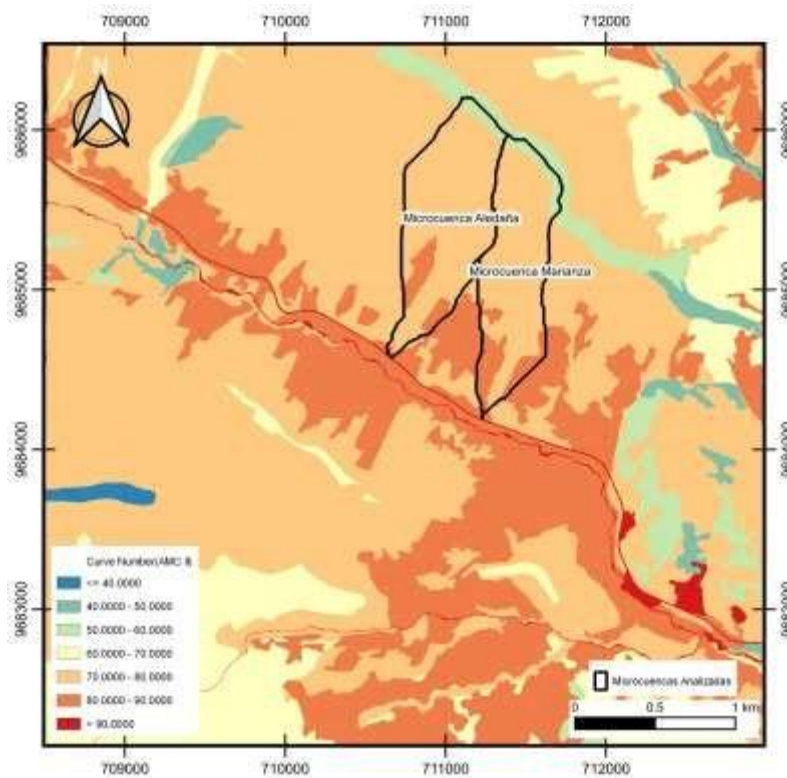
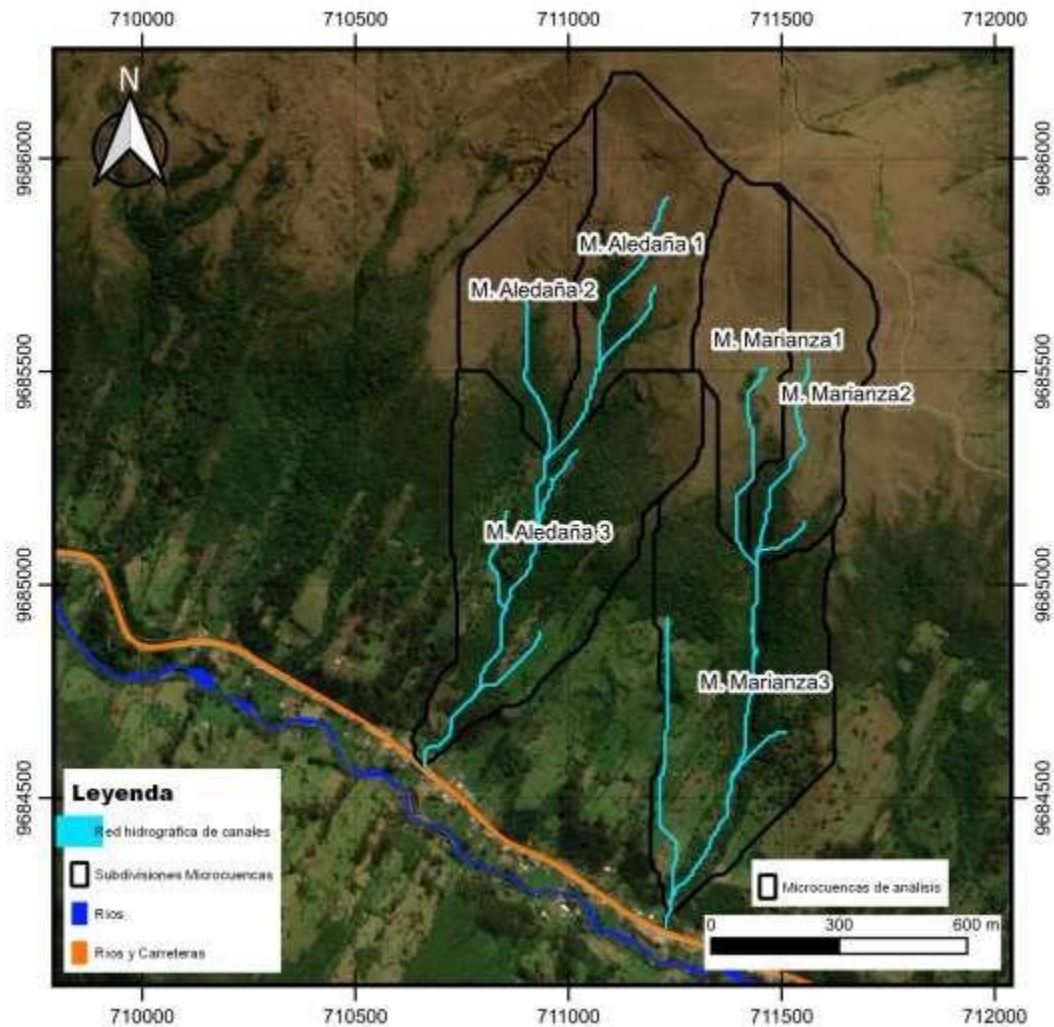


Figura 4-33. Número de Curva (AMC II). Parroquia Sayausí, WGS84/Zona 17S. Fuente. Elaboración Propia.



#### 4.6.2 Subdivisión de microcuencas

La Figura 4-34 permite observar la división de las subcuencas proporcionada por el software HEC-HMS, así como las redes de flujo en cada una de ellas.



**Figura 4-34.** Divisiones de microcuenca empleando HEC-HMS. Parroquia Sayausí, WGS84/Zona 17S  
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.6.3 Condiciones antecedentes de humedad (AMC)

Las condiciones antecedentes de humedad reflejan la cantidad de precipitación registrada a lo largo de los 5 días previos al evento de análisis. Para determinar esta cantidad se tomó los datos de precipitación obtenidos a partir de las diferentes consideraciones respecto al inverso de la distancia y la reducción por precipitación promedio en un área. La distancia determinada para cada microcuenca se muestra en la Tabla 4-10.

Estación	Distancia al centroide (m)	
	Microcuenca de Marianza	Microcuenca Aledaña
Marianza Alto	2777	2889
Marianza Bajo	2924	2966
Marianza Pinos	1989	2158

**Tabla 4-10.** Distancia euclidiana entre las estaciones pluviométricas y el centroide de las microcuencas de análisis

Con base en las consideraciones mencionadas previamente se obtiene los datos de precipitación antecedente determinando la cantidad acumulada en los 5 días previos. Se obtiene una precipitación acumulada de 21.11mm lo cual indica que las microcuencas de análisis se encontraban en condiciones antecedentes de humedad tipo I al ser este valor acumulado menor a 35mm. Sin embargo, al analizar los valores para cada una de las estaciones por separado se puede observar valores cercanos a condiciones antecedentes de humedad tipo II, es decir que son cercanos a 35mm o superan a este. Es el caso de la estación Marianza Bajo que presenta un valor de 27.2mm en los 5 días previos. Esto hace que exista una incertidumbre sobre las condiciones reales de la microcuenca al momento del evento. Por tal motivo se realizaron 2 simulaciones para los siguientes casos:

Caso 1: simulación continúa tomando en cuenta la precipitación acumulada en los 5 días previos al evento para condiciones antecedentes de humedad tipo I.

Caso 2: simulación puntual considerando la precipitación registrada durante el evento del 27 de marzo de 2022 para condiciones antecedentes de humedad tipo II.

#### 4.6.4 Modelo de Cuenca Hidrográfica

Mediante el delineado de la microcuenca de Marianza y la microcuenca Aledaña se ha definido los elementos hidrológicos que conforman el modelo (ver. Figura 4-34). Se obtuvo tres subcuencas para cada caso, dos de estas localizadas en la parte superior que convergen en una unión (junction). Esta indica el inicio de un canal (reach) que conduce el caudal hasta un punto de convergencia final (sink) que permite identificar el caudal de la subcuenca en la parte inferior en conjunto con el caudal a través del canal. Los esquemas propios de los elementos hidrológicos en cada microcuenca se muestran en la Figura 4-35.

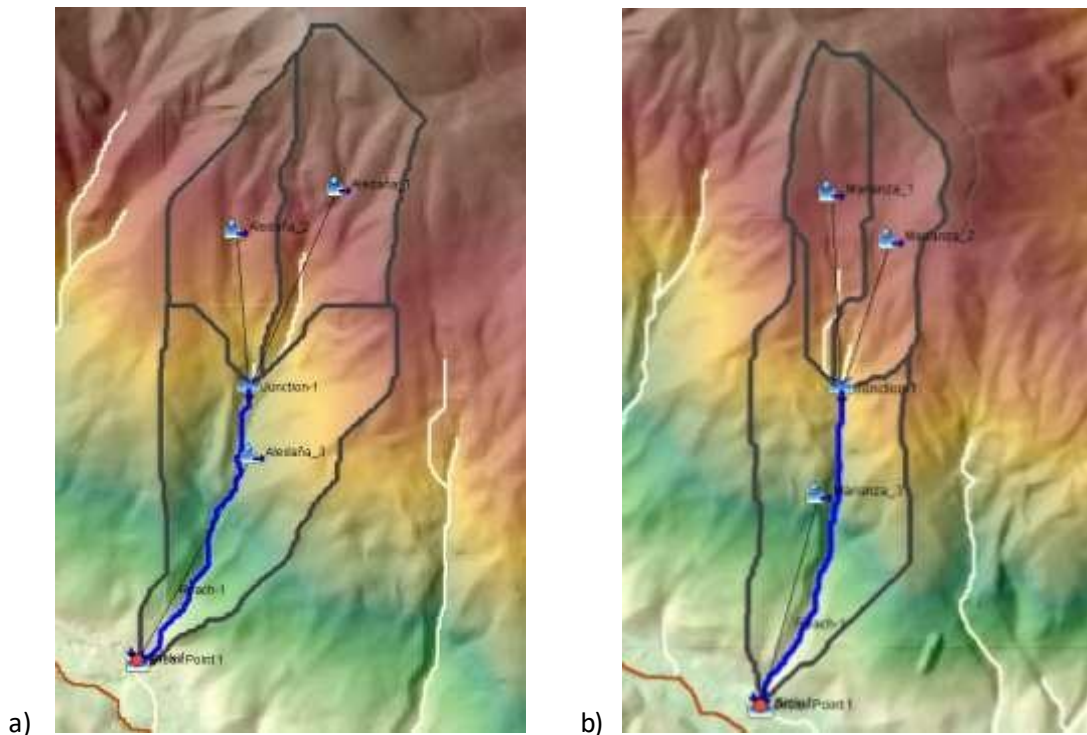


Figura 4-35. Esquema de elementos hidrológicos a) Microcuenca Marianza Aledaña. B) Microcuenca Marianza. Fuente: Elaboración Propia

Las propias herramientas integradas en el software HEC-HMS permitieron determinar parámetros característicos de las microcuencas de análisis. La Tabla 4-11 muestra las características definidas mediante herramientas de HEC-HMS.

Subcuenca	Longest Flowpath Length (km)	Longest Flowpath Slope	10-85 Flowpath Length (km)	10-85 Flowpath Slope	Basin Slope	Basin Relief (m)	Relief Ratio
Marianza 1	1.051	0.383	0.789	0.364	0.434	404.575	0.385
Marianza 2	1.003	0.391	0.752	0.368	0.470	393.083	0.392
Marianza 3	1.446	0.453	1.085	0.479	0.667	655.599	0.453
Aledaña 1	1.097	0.497	0.823	0.547	0.646	554.915	0.506
Aledaña 2	0.958	0.552	0.719	0.555	0.608	528.742	0.552
Aledaña 3	1.318	0.469	0.989	0.473	0.660	625.820	0.475

Tabla 4-11. Características de las microcuencas de análisis.

Para el cálculo de pérdidas se aplicó el método del número de curva SCS el cual requirió de parámetros entre los que se encuentra las abstracciones iniciales, el número de curva y la impermeabilidad de la cuenca. Los parámetros introducidos en el programa se muestran en la

Subcuenca	Abstracciones Iniciales $I_a$ (mm)	Número de Curva (AMC I)
-----------	------------------------------------	-------------------------

<b>Marianza 1</b>	38.14	57.116
<b>Marianza 2</b>	44.60	53.25
<b>Marianza 3</b>	34.21	59.76
<b>Aledaña 1</b>	41.03	55.32
<b>Aledaña 2</b>	35.72	58.71
<b>Aledaña 3</b>	36.05	58.49

Tabla 4-12. Se consideró un 2% de impermeabilidad en las microcuencas ante la presencia de rocas expuestas en el cauce que si bien no son cuantificables es necesario evidenciar su influencia.

<b>Subcuenca</b>	<b>Abstracciones Iniciales <math>I_a</math> (mm)</b>	<b>Número de Curva (AMC I)</b>
<b>Marianza 1</b>	38.14	57.116
<b>Marianza 2</b>	44.60	53.25
<b>Marianza 3</b>	34.21	59.76
<b>Aledaña 1</b>	41.03	55.32
<b>Aledaña 2</b>	35.72	58.71
<b>Aledaña 3</b>	36.05	58.49

Tabla 4-12. Parámetros para el cálculo de pérdidas en las microcuencas de Marianza y Aledaña caso 1

El caso 2 correspondiente a condiciones antecedentes de humedad tipo II. Los valores se calculados para este caso se muestran en la Tabla 4-13.

<b>Subcuenca</b>	<b>Abstracciones Iniciales <math>I_a</math> (mm)</b>	<b>Número de Curva (AMC II)</b>
<b>Marianza 1</b>	16.02	76.03
<b>Marianza 2</b>	18.73	73.06
<b>Marianza 3</b>	14.37	77.95
<b>Aledaña 1</b>	17.23	74.67
<b>Aledaña 2</b>	15.00	77.2
<b>Aledaña 3</b>	15.14	77.04

Tabla 4-13. Parámetros para el cálculo de pérdidas en las microcuencas de Marianza y Aledaña caso 2

Para el proceso de transformación se ha empleado el método del hidrograma unitario SCS. El único parámetro necesario para la aplicación de este método es el tiempo de retardo en cada una de las subcuencas. La Tabla 4-14 muestra el tiempo de retardo calculado en base a la formulación de Kirpich para el tiempo de concentración en cada una de las subcuencas que componen el modelo.

<b>Subcuenca</b>	<b>Tiempo de Retardo (min)</b>
<b>Marianza 1</b>	3.66

<b>Marianza 2</b>	3.52
<b>Marianza 3</b>	4.21
<b>Aledaña 1</b>	3.24
<b>Aledaña 2</b>	2.90
<b>Aledaña 3</b>	3.94

Tabla 4-14. Tiempo de retardo para las subcuencas de análisis

El canal presente en cada una de las microcuencas fue modelado mediante el método de Muskingum y requirió dos parámetros conocidos como K y X, estos se pueden observar en la Tabla 4-15. Por otro lado, el flujo base fue definido con un valor constante de 10l/s a lo largo del mes de marzo.

Reach	K (horas)	X
<b>Marianza</b>	0.09379	0.35
<b>Aledaña</b>	0.08778	0.35

Tabla 4-15 Parámetros para modelación con método de Muskingum

#### 4.6.5 Modelo meteorológico, series de tiempo y especificaciones de control

Se obtuvo 4 series de tiempo diferentes de precipitación incremental en un intervalo de tiempo de 1 minuto. El caso 1 aplica el hietograma de diseño que comprende los datos de precipitación iniciando 5 días antes del evento y finalizando a las 19:00 del 27 de marzo de 2022. Mientras que el caso 2 aplica datos del hietograma de diseño del evento del 27 de marzo de 2022 con intervalos de tiempo de 1 minuto. La Figura 4-36 muestra el hietograma de diseño del evento en intervalos de 5 minutos.

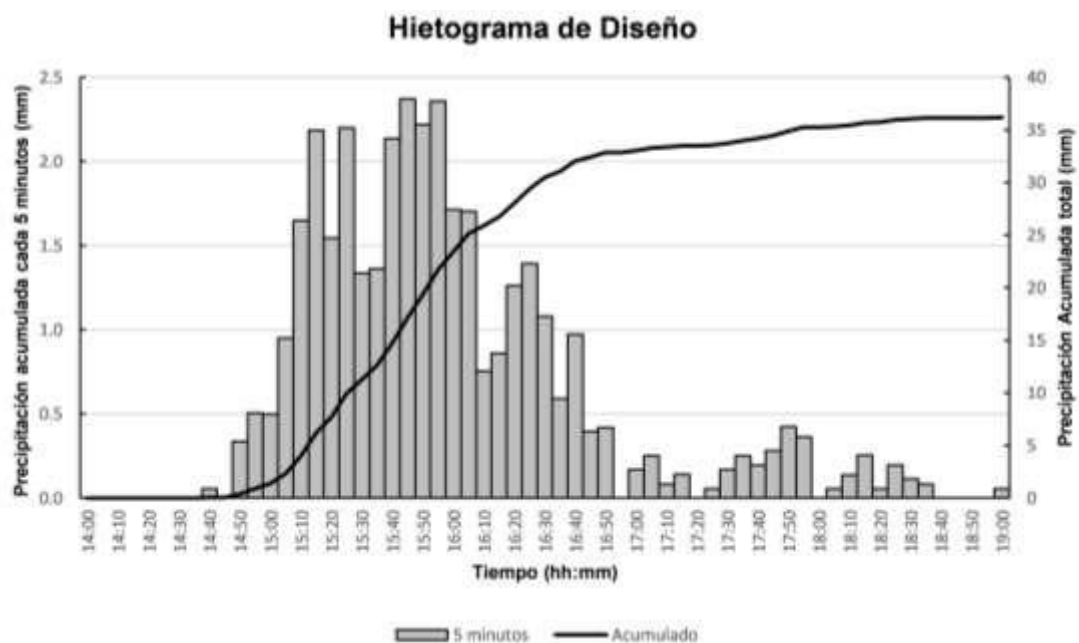


Figura 4-36. Hietograma de diseño del sector Marianza para el 27 de marzo del 2022 definido para modelación lluvia-escorrentía. Fuente: Elaboración Propia.

Las especificaciones de control se establecieron desde el inicio del hietograma para cada caso hasta las 12:00 del 28 de marzo de 2022. Se seleccionó este periodo a fin de poder observar y medir la totalidad de la escorrentía generada durante la simulación. Se obtuvo los resultados en intervalos de tiempo de 1 minuto, permitiendo una mayor aproximación al instante de caudal pico.

#### 4.6.6 Hidrogramas y caudales pico

Se han obtenido los hidrogramas de caudal para la microcuenca de Marianza y la microcuenca Aledaña durante el evento del 27 de marzo de 2022. Los resultados muestran los caudales para 2 casos de análisis, cada uno de estos con sus propias condiciones. Los caudales obtenidos corresponden a los elementos hidrológicos integrados en el modelamiento. Para cada elemento se obtiene el caudal pico, la hora a la que se produjo y el volumen desplazado. Además, se generan los datos de caudal por minuto mediante los cuales se construyen los gráficos de lluvia-escorrentía.

##### 4.6.6.1 Caso 1: Microcuenca Marianza

La simulación correspondiente al caso 1 toma en cuenta datos de precipitación de los 5 días previos al 27 de marzo de 2022. El número de curva se calculó para condiciones antecedentes de humedad tipo I. Los resultados más significativos se dan en los elementos hidrológicos junction (Figura 4-37) y sink (Figura 4-38) ya que concentran la escorrentía de las subcuencas que componen el modelo. La Tabla 4-16 muestra un resumen de resultados para toda la microcuenca de Marianza en donde se puede observar el área de aporte, el caudal pico y la hora a la que se produjo.

Elemento Hidrológico	Área de Drenaje (km <sup>2</sup> )	Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s)	Fecha y hora (Caudal Pico)	Volumen (1000*m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
Marianza 1	0.1366	0.0901	27mar.2022, 16:31	6.0	6000
Marianza 2	0.1378	0.0502	27mar.2022, 16:35	5.9	5900
Junction	0.2744	0.1400	27mar.2022, 16:31	11.9	11900
Reach	0.2744	0.1364	27mar.2022, 16:38	11.9	11900
Marianza 3	0.3162	0.2582	27mar.2022, 16:04	6.9	6900
Sink	0.5906	0.3767	27mar.2022, 16:35	18.8	18800

Tabla 4-16. Resumen de resultados microcuenca de Marianza (Caso 1)

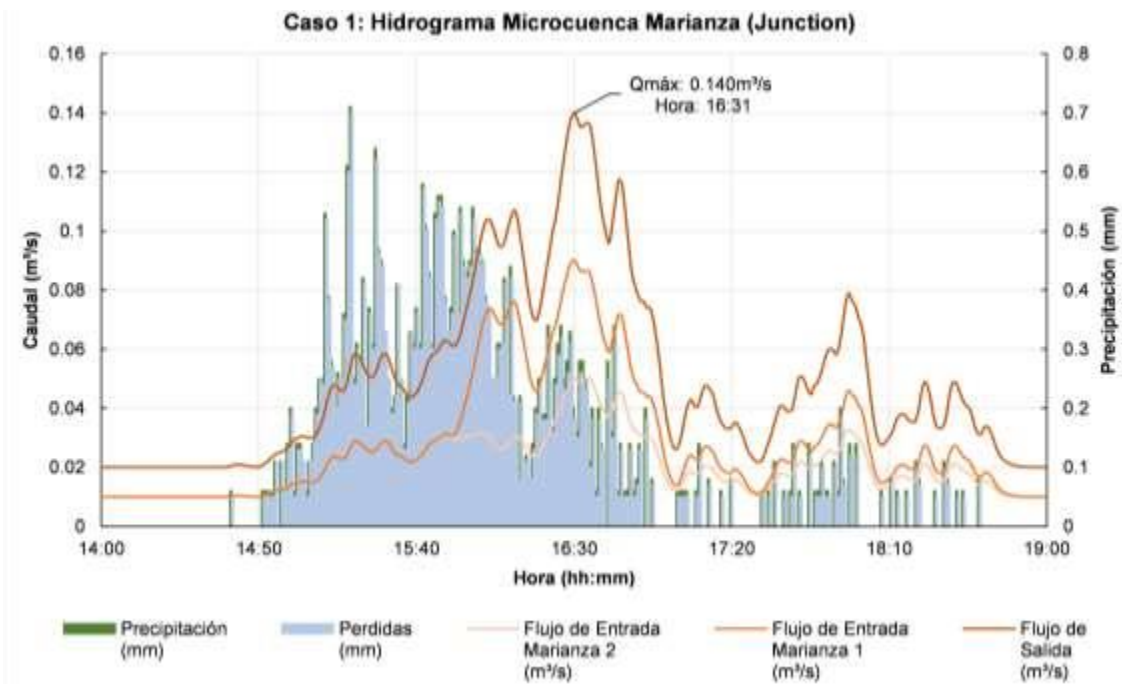


Figura 4-37 Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico junction (Caso 1). Fuente: Elaboración Propia

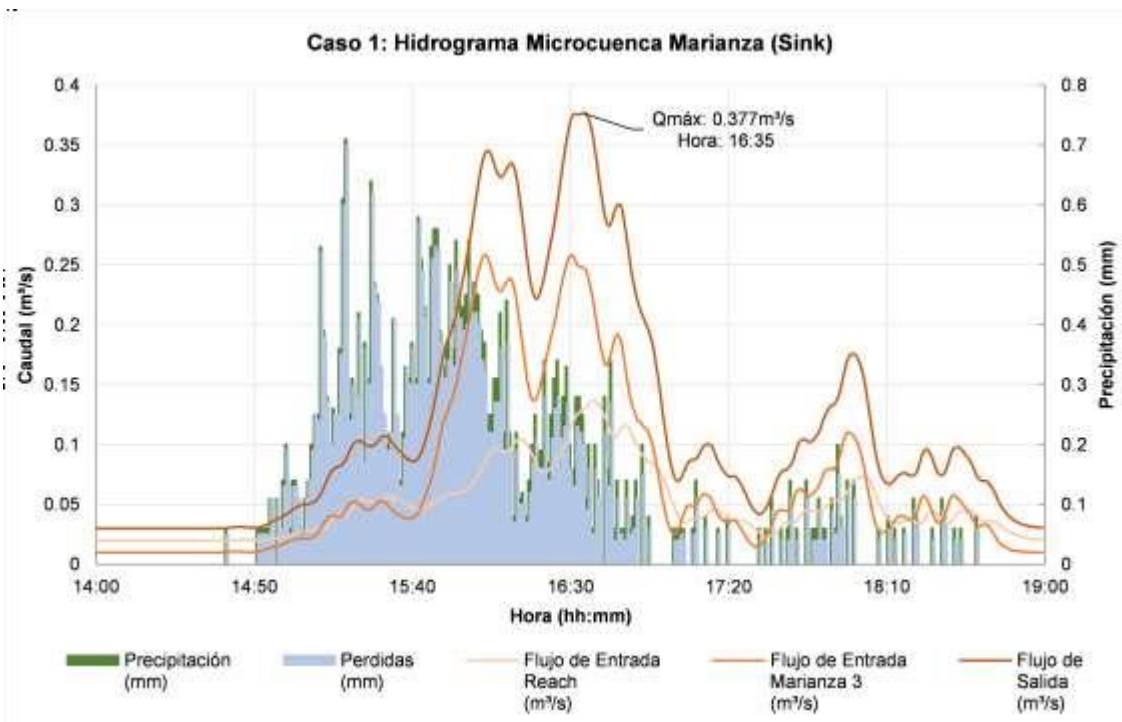


Figura 4-38. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico sink (Caso 1). Fuente: Elaboración Propia

**4.6.6.2 Caso 1: Microcuenca Aledaña**

La microcuenca aledaña comparte características como el hietograma de precipitación y las condiciones antecedentes de humedad. Del mismo modo la simulación se la realizó

para estas condiciones obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 4-17. Se graficó la precipitación y el caudal para los elementos de interés los cuales corresponden al junction (Figura 4-39) y al sink (Figura 4-40).

Elemento Hidrológico	Área de Drenaje (km <sup>2</sup> )	Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s)	Fecha y hora (Caudal Pico)	Volumen (1000*m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
Aledaña 1	0.1965	0.0944	27mar.2022, 16:30	6.10	6100
Aledaña 2	0.1443	0.1083	27mar.2022, 16:30	6.10	6100
Junction	0.3408	0.2027	27mar.2022, 16:30	12.19	12190
Reach	0.3408	0.1941	27mar.2022, 16:38	12.19	12190
Aledaña 3	0.3213	0.2208	27mar.2022, 16:31	6.70	6700
Sink	0.6621	0.4010	27mar.2022, 16:32	18.89	18890

Tabla 4-17. Resumen de resultados microcuenca aledaña (Caso 1)

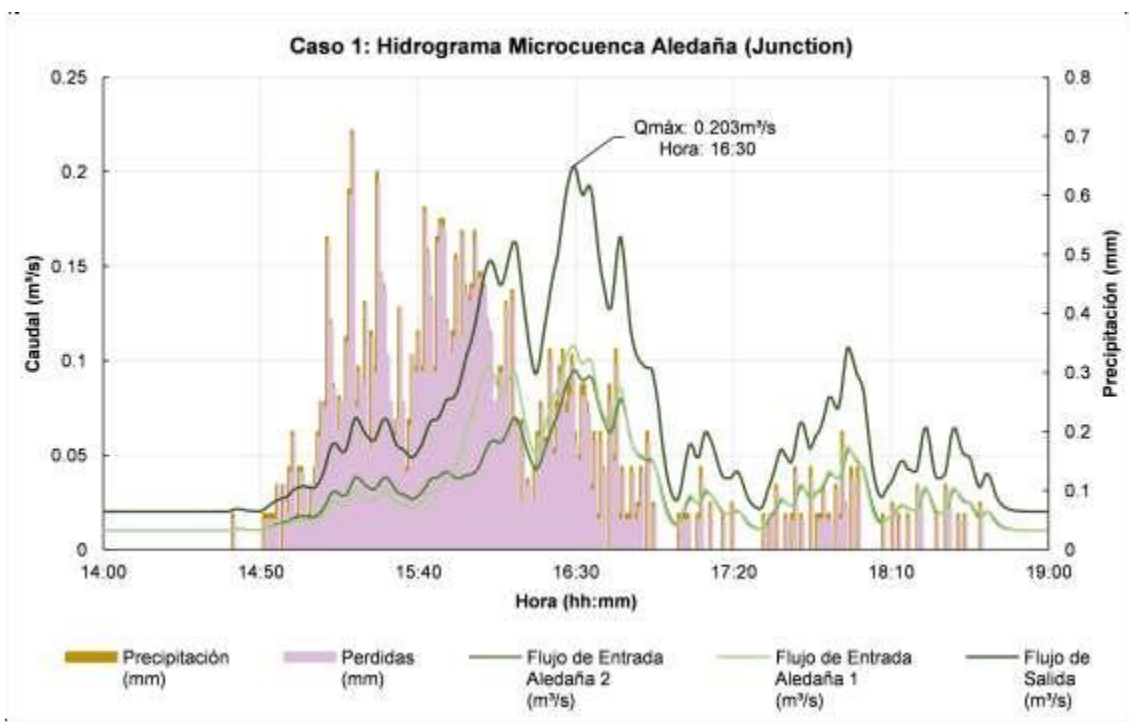


Figura 4-39. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico junction (Caso 1)



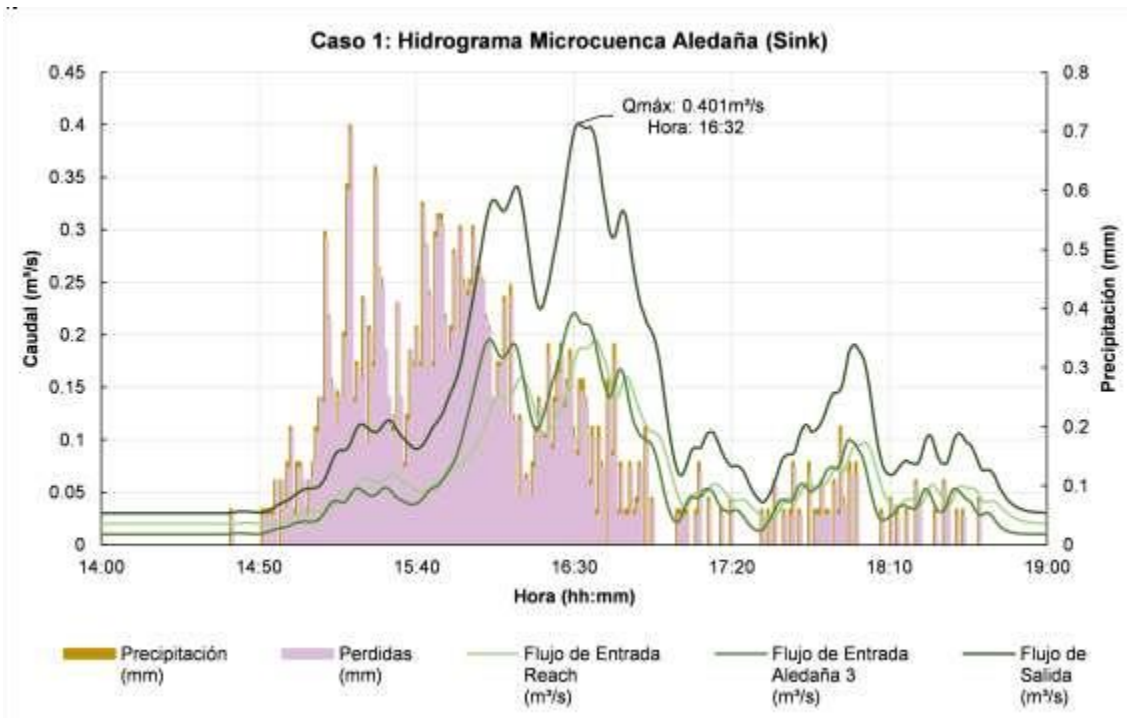


Figura 4-40 Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico sink (Caso 1)

**4.6.6.3 Caso 1: Caudal Específico**

Con base en los resultados de caudal pico en cada una de las microcuencas es posible determinar el caudal específico que se aporta por unidad de área en la microcuenca. El valor obtenido corresponde a la división entre el caudal obtenido y el área de la cuenca, tal como se muestra en la Tabla 4-18

Microcuenca	Caudal (m³/s)	Área (km²)	Caudal Especifico (m³/s/km²)
Marianza	0.3767	0.5906	0.6378
Aledaña	0.4010	0.6621	0.6056

Tabla 4-18 Caudal específico en las microcuencas de análisis (Caso 1)

**Caso 2: Microcuenca de Marianza**

La segunda simulación realizada presenta condiciones antecedentes de humedad tipo II y utiliza solo los datos de precipitación del hietograma de tormenta para el evento del 27 de marzo de 2022. Del mismo modo el programa HEC-HMS presenta un resumen de resultados para los diferentes elementos hidrológicos como se muestra en la Tabla 4-19. Se han representado gráficamente los resultados del elemento junction (Figura 4-41) y el elemento sink (Figura 4-42).

Elemento Hidrológico	Área de Drenaje (km²)	Caudal Pico (m³/s)	Fecha y hora (Caudal Pico)	Volumen (1000*m³)	Volumen (m³)
Marianza1	0.1366	0.1754	27mar.2022, 16:31	1.5	1500
Marianza2	0.1378	0.1333	27mar.2022, 16:31	1.3	1300
Junction	0.2744	0.3086	27mar.2022, 16:31	10.2	10200
Reach	0.2744	0.2969	27mar.2022, 16:38	10.2	10200
Marianza3	0.3162	0.4569	27mar.2022, 16:31	8.68	8680
Sink	0.5906	0.7167	27mar.2022, 16:35	9.39	9390

Tabla 4-19. Resumen de resultados microcuencia de Marianza (Caso 2)

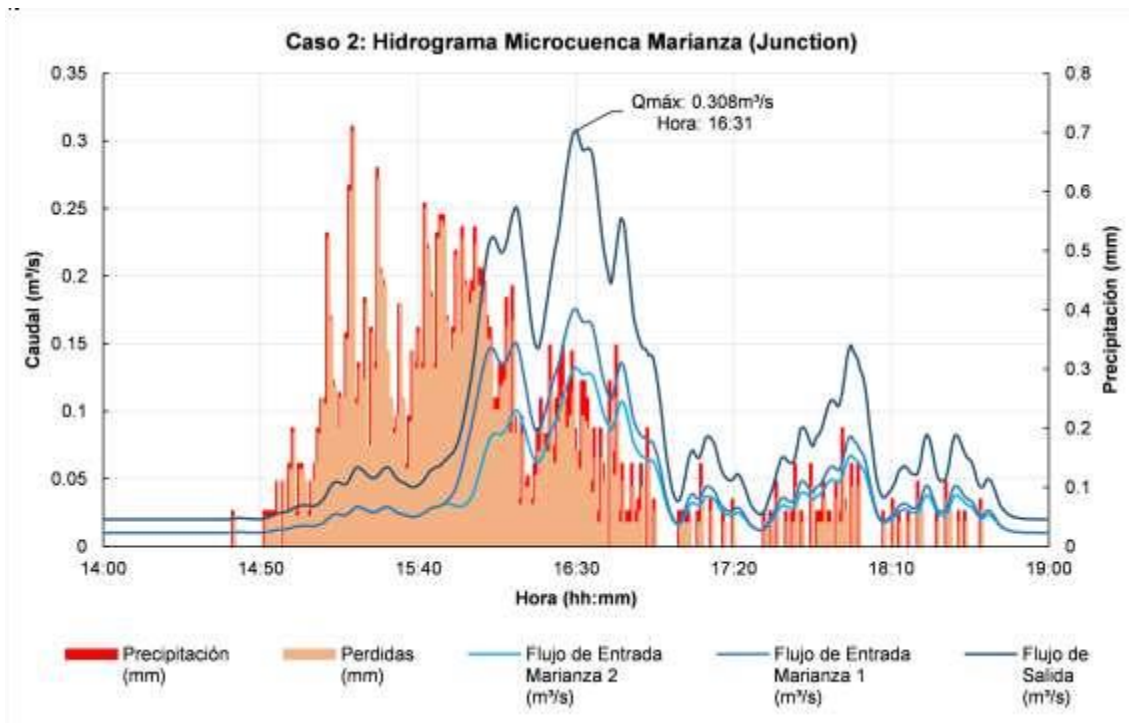


Figura 4-41. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico junction (Caso 2)

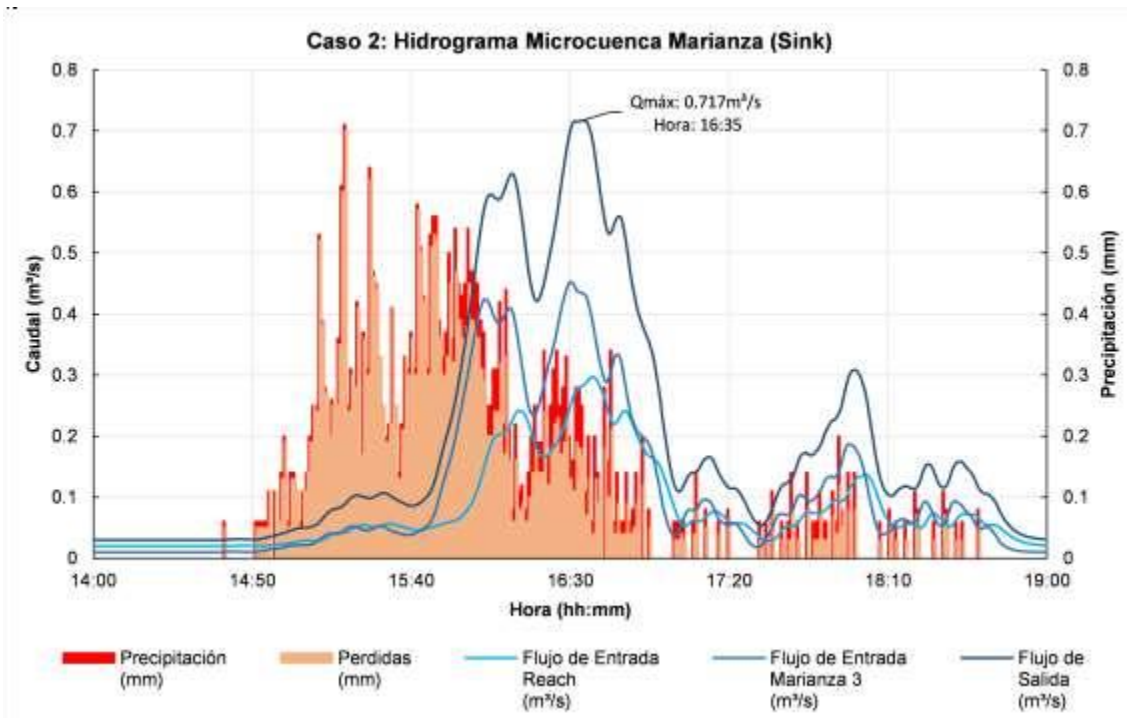


Figura 4-42. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico sink (Caso 2)

**Caso 2: Microcuenca Aledaña**

La microcuenca aledaña comparte las condiciones aplicadas en la microcuenca de Marianza para el caso 2, recalcando que el hietograma de diseño en este caso presente ligeras diferencias debido a la distancia de la microcuenca con las estaciones de registro. La Tabla 4-20 muestra los resultados para caudales en los elementos hidrológicos que componen este modelo. Mientras que la Figura 4-43 y Figura 4-44 presentan los resultados de forma gráfica para el elemento junction y sink respectivamente.

	Área de Drenaje (km <sup>2</sup> )	Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s)	Fecha y hora (Caudal Pico)	Volumen (1000*m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
Aledaña 1	0.1965	0.2211	27mar.2022, 16:30	1.7	1700
Aledaña 2	0.1443	0.2098	27mar.2022, 16:30	1.6	1600
Junction	0.3408	0.4738	27mar.2022, 16:30	3.3	3300
Reach	0.3408	0.409	27mar.2022, 16:37	3.3	3300
Aledaña 3	0.3213	0.4334	27mar.2022, 16:31	2.7	2700
Sink	0.6621	0.8441	27mar.2022, 16:32	6	6000

Tabla 4-20. Resumen de resultados microcuenca aledaña (Caso 2)

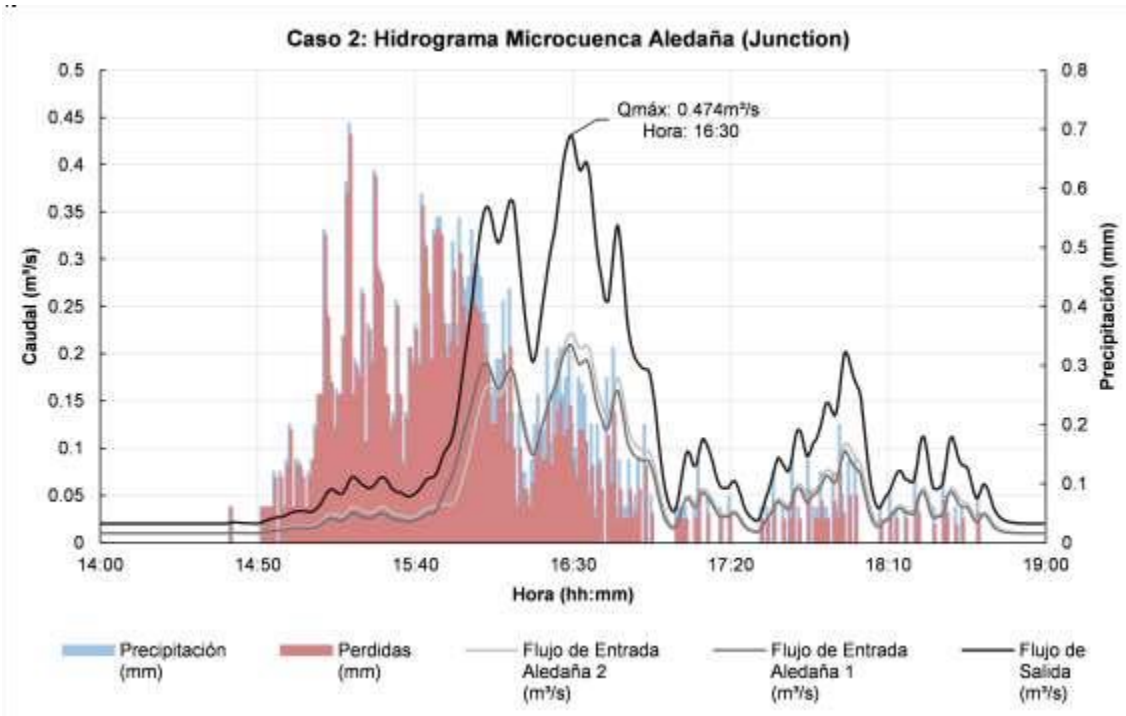


Figura 4-43. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico junction (Caso 2)

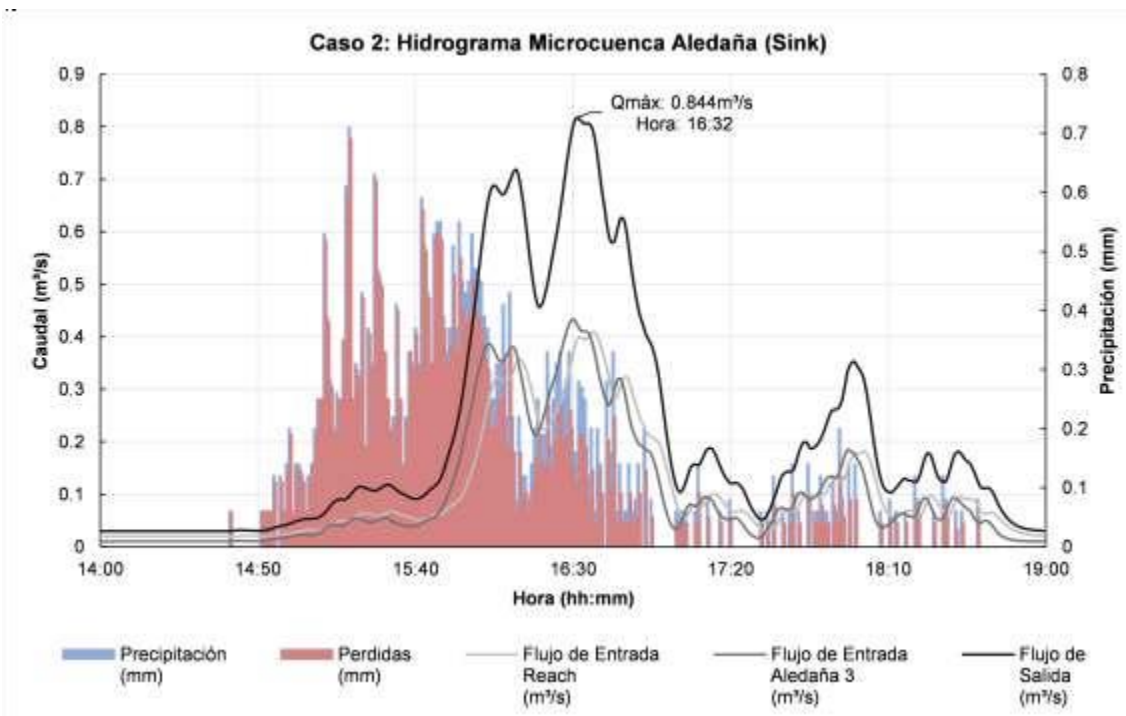


Figura 4-44. Resultados de simulación del evento del 27 de marzo 2022 en el elemento hidrológico sink (Caso 2)

#### 4.6.6.4 Caso 2: Caudal Especifico

El caudal específico obtenido para las microcuencas de análisis bajo las condiciones del caso 2 se muestran en la Tabla 4-20. El aumento en el caudal obtenido hace que el

caudal específico aumente. Para ambos casos de análisis el caudal pico es mayor en la microcuenca aledaña ya que posee un área de aporte ligeramente mayor y por lo tanto mayores caudales.

Microcuenca	Caudal (m³/s)	Área (km²)	Caudal Específico (m³/s/km²)
Marianza	0.7167	0.5906	1.2135
Aledaña	0.8441	0.6621	1.2748

Tabla 4-20. Caudal específico en las microcuencas de análisis (Caso 2)

#### 4.6.6.5 Resumen de caudales

Una vez obtenidos los resultados para cada una de las microcuencas de análisis se muestra un resumen de los valores en la Tabla 4- 21. Los resultados corresponden a los caudales pico registrados en el elemento hidrológico junction y sink para las condiciones de los dos casos simulados. Esto con la finalidad de facilitar la comparativa de resultados para su posterior análisis y discusión.

Caso	Elemento Hidrológico	Caudal Pico (m³/s)			
		Microcuenca de Marianza	Hora	Microcuenca Aledaña	Hora
1	Junction	0.140	16:31	0.203	16:30
	Sink	0.377	16:35	0.401	16:32
2	Junction	0.308	16:31	0.474	16:30
	Sink	0.717	16:35	0.844	16:32

Tabla 4- 21. Resumen de caudales obtenidos mediante modelación lluvia-escorrentía

#### 4.7 Aplicación de la metodología RES en dos microcuencas de montaña

La matriz de interacción de la Tabla 4-22 fue obtenida, considerando la influencia mutua entre los parámetros condicionantes a la ocurrencia de flujo de detritos. Los términos fuera de la diagonal principal se codificaron en base a investigaciones (Bonetto et al. 2021; Rozos et al. 2008; Vianello et al. 2022) y condiciones en el área de estudio.

Una vez codificada la matriz de interacción, se sumó los valores resultantes de causa y efecto de los 7 parámetros y se los representa en un diagrama causa-efecto (ver. Figura 4-45). Se observa que la distancia de red de canal es el parámetro más interactivo (C+E=26) mientras que la Litología (C+E=10) es el menos interactivos. Por otra parte, la Pendiente es el parámetro más dominante (C-E=14), mientras que los menos dominantes corresponden al parámetro Cobertura vegetal y uso de suelo (C-E=5) y al Tipo de suelo hidrológico (C-E=5).

Matriz de Interacción										
Factor/ Factor	1	2	3	4	5	6	7	C	C+E	$a_i$
1	Geología/ Litología	2	3	0	0	3	1	9	10	1.92
2	0	Pendiente	4	2	3	2	3	14	23	4.42
3	0	3	Red de Canal	2	3	2	2	12	26	5.00
4	0	2	4	Curvatura	3	2	2	13	22	4.23
5	1	1	1	2	Geomorfología	1	1	7	17	3.27
6	0	0	1	1	0	Tipo de Suelo Hidrológico	3	5	15	2.88
7	0	1	1	2	1	0	Uso de Suelo	5	17	3.27
E	1	9	14	9	10	10	12	65	130	25.00

Tabla 4-22. Matriz de interacción metodología RES sector Marianza. Fuente: Elaboración propia

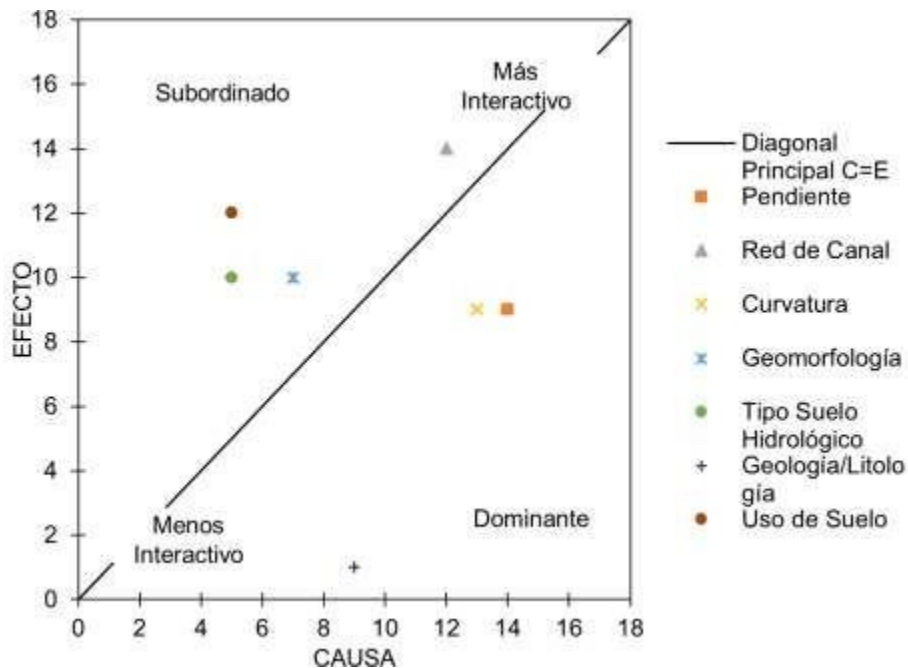


Figura 4-45. Diagrama causa vs efecto de los factores condicionantes de la matriz de interacción del procedimiento RES. Fuente: Elaboración Propia.

El coeficiente  $a_i$  se calculó según lo establecido en la sección 2.7 y en base a la matriz de interacción de la Tabla 4-22. Por consiguiente, para el cálculo del  $DfPi$  se empleó la ecuación (2-34) y la caracterización de la Tabla 4-23. Este procedimiento se aplicó a escala de pixel con una resolución de 3x3m alineado al sistema de coordenadas UTM WGS/84 en la zona 17 sur. Todo el procedimiento, así como el manejo de calculadora ráster se aplicó en el software QGIS (3.28) como se estableció en la sección 3.4.5.

<b>Matriz de Interacción</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Clase</b>	<b>P<sub>ik</sub></b>	<b>P<sub>ik</sub> × a<sub>i</sub></b>
Geología/Litología	Depósitos Fluvio glaciares	0	0.00
	Depósitos Coluviales/Depósitos Coluvio-Aluviales	1	1.92
	Depósitos de Ladera	2	3.85
	Formación Tarqui	3	5.77
	Formación Celica	4	7.69
Pendiente	0-8°	0	0.00
	8-15°	1	4.42
	15-25°	2	8.85
	25-35°	3	13.27
	>35°	4	17.69
Red de Canal	0-10m	4	20.00
	10-25m	3	15.00
	25-50m	2	10.00
	50-100m	1	5.00
	>100	0	0.00
Curvatura	Cóncavo	4	16.92
	Plano	1	4.23
	Convexo	2	8.46
Geomorfología	Superficies de aplanamiento	1	3.27
	Relieve Escarpado	2	6.54
	Relieve Montañoso	3	9.81
	Valles Encañonados	4	13.08
	Vertientes Convexas	4	13.08
Tipo de Suelo Hidrológico	A	1	2.88
	B	2	5.77
	C	3	8.65
	D	4	11.54
Uso de Suelo	Área poblada/ Cuerpo de Agua/Infraestructura Antrópica	0	0.00
	Plantación Forestal/Bosque Nativo	1	3.27
	Vegetación Arbustiva	2	6.54
	Páramo	3	9.81
	Pastizal	4	13.08

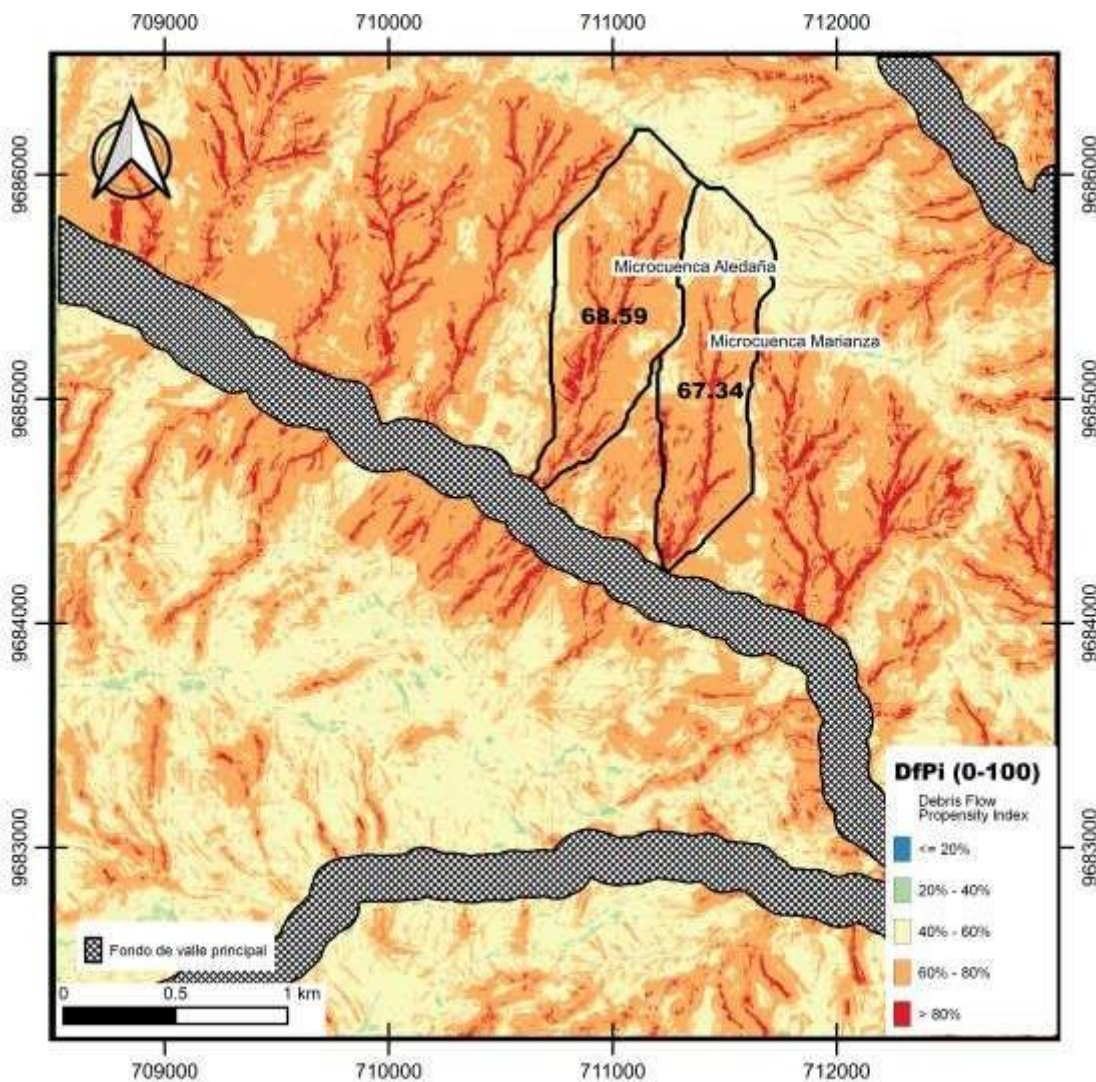
**Tabla 4-23.** Clasificación y puntuación de los factores condicionantes considerados en la matriz de interacción para aplicar la metodología RES.

La aplicación de la metodología RES dió como resultado un mapa de susceptibilidad ante flujos de detritos a escala de pixel de 3x3m en el área de estudio (ver. Figura 4-46). Esta metodología pone en manifiesto que las zonas de susceptibilidad a los flujos de detritos se concentran generalmente a lo largo de los valles principales. Existe una concentración destacada de zonas de alta susceptibilidad cerca a la red de canales y a

lo largo de las laderas colindantes. Especialmente las intermediaciones laterales a la arteria vial Cuenca-Molleturo-El Empalme presenta una elevada propensión a este fenómeno.

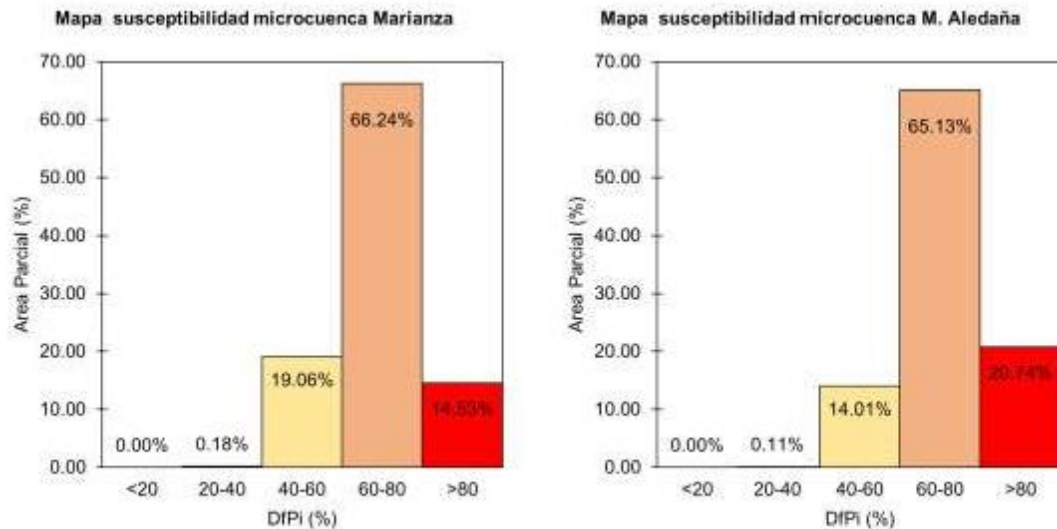
La microcuenca Marianza presenta un  $DfPI$  de 67.34%, a su vez a la microcuenca Marianza aledaña le corresponde un  $DfPI$  de 68.59%. En función de la escala, las microcuencas se encuentran en un rango de susceptibilidad muy alta entre (60-80).

En la Figura 4-47 se muestra el rango de susceptibilidad del área parcial acumulada en base a la clasificación RES para cada microcuenca de análisis.



**Figura 4-46.** Mapas de susceptibilidad a flujos de detritos obtenidos con el método RES. La cuenca delimitada por líneas negras continuas se refiere a las microcuencas estudiadas. Los números negros son los  $DfPI$  globales evaluados para las microcuencas en el sector Marianza. WGS 84/Zona 17S. Fuente: Elaboración Propia





**Figura 4-47.** Rango de susceptibilidad ante flujo de detritos en microcuencas en el sector Marianza.  
Fuente: Elaboración Propia

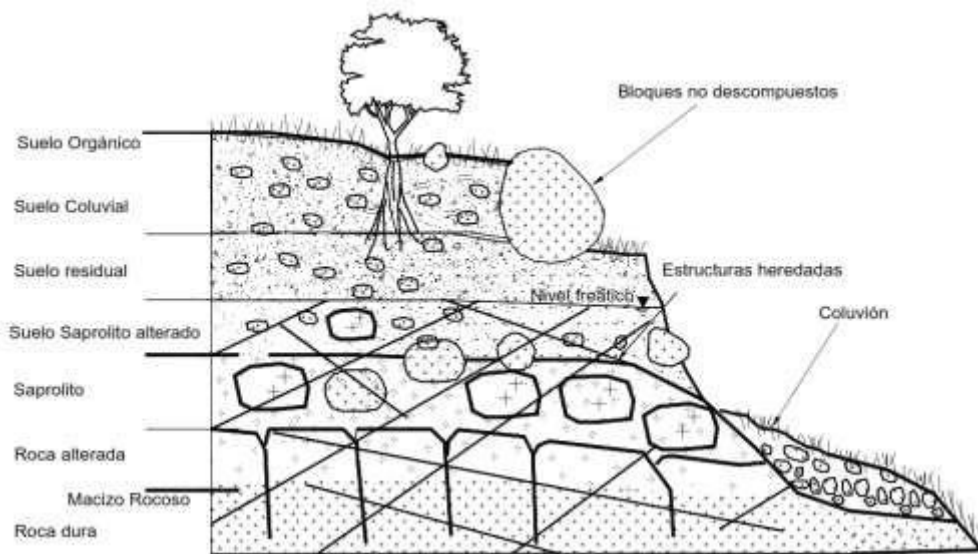
## 4.8 Discusión y comparación de resultados

### 4.8.1 Geología

En el sector Marianza las formaciones rocosas presentes en la zona son predominantemente arcillosas, lo que conlleva a la formación de suelos con alta capacidad de retención de agua. Esta característica aumenta la susceptibilidad a la acumulación de agua en el terreno y, por lo tanto, incrementa la posibilidad de desencadenar flujos de detritos.

Además, la presencia de formaciones rocosas arcillosas en el sector Marianza puede influir en la estabilidad del terreno. Los suelos arcillosos son conocidos por su baja resistencia al corte y su alta plasticidad, lo que los hace propensos a la deformación y al deslizamiento. Estas características aumentan la posibilidad de que se produzcan movimientos en masa y flujos de detritos en respuesta a la saturación del suelo (Wells 1987).

En la microcuenca Marianza, se evidenciaron paredes verticales de afloramientos rocosos fracturados. Estas características geológicas facilitan la formación de coluviones y flujos de detritos debido a la presencia de un lecho rocoso duro poco fragmentado con una capacidad de infiltración limitada. Esto provoca la existencia de zonas de infiltración subsuperficial poco profundas, lo que contribuye a una mayor saturación del suelo (Suárez 1998). Por otra parte, en la microcuenca Aledaña no existen afloramientos rocosos y paredes verticales a lo largo del cauce principal.



**Figura 4-48.** Suelo con superficie de base de manto rocoso. Fuente (Suarez 1998)

Mediante visitas periódicas al cauce de la microcuenca Marianza después del evento ocurrido en marzo de 2022, se pudo observar una superficie de base compuesta por litología y roca madre expuestas, las cuales se encontraban cubiertas por una capa de suelo de 2-5 metros de espesor como la mostrada en la Figura 4-48. Este suelo está compuesto principalmente por materiales provenientes de fragmentación de las formaciones geológicas Tarqui y Celica, presentando un plano de estratificación irregular con canales internos bien definidos los mismos que existían previamente al evento.

Además, los depósitos presentes en la zona han experimentado procesos de compactación y suelen mostrar una mayor resistencia a la erosión. Sin embargo, cuando se encuentran expuestos a escorrentías, se facilita la erosión y se generan drenajes en forma de V, lo que puede dar lugar a la reactivación de movimientos de masas. Estos depósitos carecen de un sistema de drenaje bien desarrollado, lo cual los hace susceptibles a la erosión hídrica, deslizamientos y flujos de detritos (GADP Sayausí 2018). Según se observa en la Figura 4-49 existen movimientos de tierra en la parte alta del sector de estudio, específicamente en las intermediaciones de las redes hidrológicas de descarga.



**Figura 4-49.** Microcuencas en el sector Mariana, parroquia Sayausí (abril 2023). Fuente: Elaboración Propia

En base a la visita al sector en la parte superior y a lo largo del cauce de la microcuenca Mariana, se observó fragmentos de roca desprendidos del lecho rocoso, con diámetros que oscilan entre 2 y 5 metros. Estos fragmentos se encuentran apoyados en una matriz de suelo conocida como matriz soportada o saprolito. Esto se evidenció después del evento ocurrido el 27 de marzo, donde existieron grandes bloques rocosos depositados en la vía Cuenca-Molleturo-El Empalme (ver. Figura 4-50a).

Sin embargo, en la actualidad, persiste un riesgo latente debido a las lluvias recurrentes, que provocan el lavado del material en la parte superior de las microcuencas y ocasionan el desplazamiento de rocas de gran tamaño y suelo desde áreas más altas hacia el fondo del valle principal (ver. Figura 4-50b). Esto pone de manifiesto el riesgo de desprendimiento de material y la posibilidad de que se repita el suceso ocurrido en marzo de 2022. Estos procesos continuos de desprendimiento y reiteración del evento ponen en peligro las áreas habitadas y las infraestructuras antrópicas presentes en el fondo del valle.



**Figura 4-50.** a) Material transporta y rocas luego del evento del 27 de marzo del 2022. Fuente: (El Universo 2022), b) Roca caída en una vivienda en el sector Marianza. Fuente: (Orellana 2023)

#### 4.8.2 Geomorfología

Los valles fluvio-glaciares ejercen una influencia significativa en la ocurrencia de flujos de detritos, ya que su formación resulta de la interacción entre glaciares y ríos, lo que genera una configuración geomorfológica particular que favorece la génesis y desencadenamiento de estos eventos. De igual manera los flujos contribuyen en gran medida a moldear los paisajes del territorio del área de estudio con la formación de depósitos de deslizamientos, sectores con rocas fracturados y taludes (Guzzetti and Cardinali 1991). Durante las visitas realizadas en el área de estudio, se pudo constatar la presencia de numerosas quebradas que desempeñan un papel fundamental en el transporte de agua y sedimentos.

Es importante destacar que las pendientes pronunciadas y las vertientes cóncavas accidentadas son propicias para la generación de flujos de detritos (Turner 1996). Las microcuencas analizadas son de tipo endorreico, es decir, no desembocan en el mar, sino que su flujo se dirige hacia un río principal. Además, se consideran microcuencas de alta montaña, con una importante contribución al río Tomebamba.

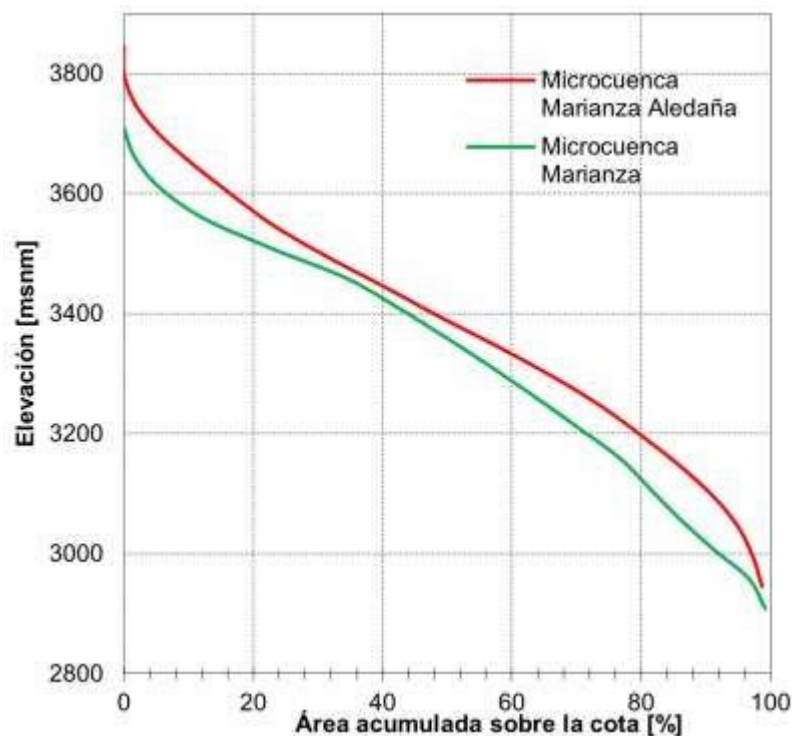
En relación con la morfología los resultados presentados en la Tabla 4-3 muestran los parámetros morfométricos calculados para las microcuencas de análisis. En cuanto al factor de forma ( $F_c$ ), que es inferior a 0.4, indica que las microcuencas son alargadas y estrechas, lo que provoca que el flujo de agua se concentre en una dirección principal. Además, la relación entre el perímetro y el área es alta, lo que implica una mayor influencia de factores lineales, como los arroyos.

En relación con el índice de circularidad ( $K_c$ ), que es menor a 0.4, se puede concluir que las microcuencas son moderadamente alargadas o menos circulares. Además, presentan una mayor irregularidad en su forma. Por lo general, en este tipo de cuencas, el flujo de agua es más rápido a lo largo del cauce principal.

En cuanto al índice de elongación ( $Re$ ), las microcuencas se consideran altamente alargadas, ya que la longitud máxima es significativamente mayor que el ancho máximo. Tanto la microcuenca Marianza como la microcuenca Marianza Aledaña exhiben un índice de compacidad ( $K_c$ ) con forma alargada, ya que ambos tienen un valor mayor a 1.6. En términos del rectángulo equivalente, las microcuencas presentan una forma alargada, con valores similares tanto para el lado mayor como para el lado menor.

En base a estos resultados, se puede concluir que tanto la microcuenca Marianza como la microcuenca Marianza Aledaña presentan una forma alargada y son comparables en términos de los parámetros morfométricos calculados.

La curva hipsométrica de la microcuenca Marianza y de la microcuenca Marianza Aledaña reflejan un estado de juventud y con un gran potencial erosivo, según se observa en la Figura 4-51.



**Figura 4-51.** Comparaciones curvas hipsométricas microcuenca Marianza vs microcuenca Marianza Aledaña

Generalmente este tipo de microcuencas presenta un alto riesgo a la formación de ductos concentrados. Según Suarez (1998) el agua al fluir por ductos concentrados

dentro del suelo produce erosión interna la cual da origen a derrumbamientos o colapsos que pueden generar un hundimiento en el terreno o la formación de una cárcava según se observa en la Figura 4-52. Además, la microcuenca Marianza presenta un índice de pendiente mayor a la microcuenca Marianza Aledaña.

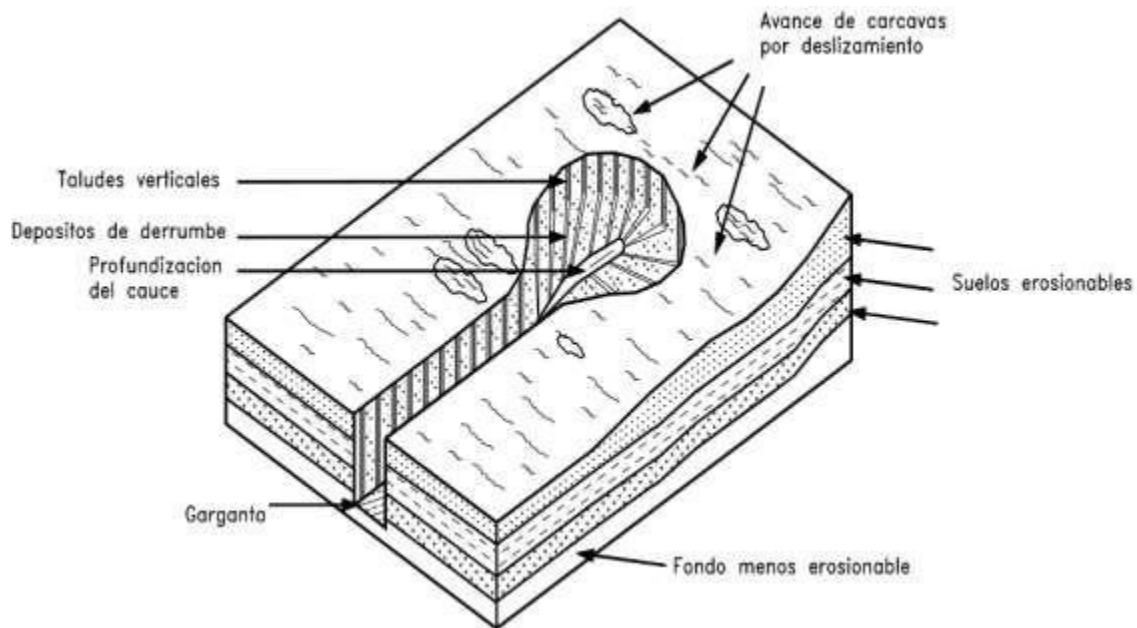
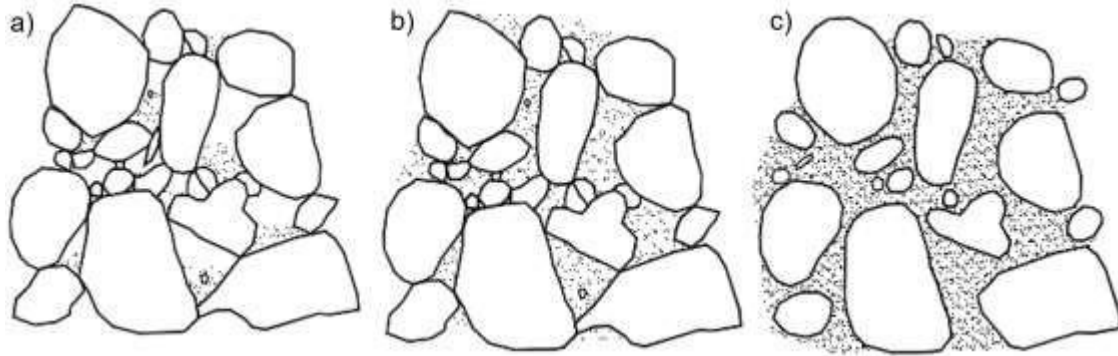


Figura 4-52. Esquema general de cárcava de erosión. Fuente: (Suarez 1998)

### 4.8.3 Ensayos de Laboratorio

Los resultados presentados en la Tabla 4-4, revelan una clara diferencia en la distribución de la matriz de suelo entre la parte media-baja y la parte alta. Se observó que a medida que se ascendió en elevación la cantidad de matriz fina de suelo incrementó.

El suelo ensayado en la parte de elevación media y baja de las dos microcuencas comprendió la cantidad de suelo entre fracturas, fisuras y poros de las rocas conformadas por una pequeña capa en contacto con la superficie de la roca. Según [Suarez \(1998\)](#) este tipo de suelo es clasificado como matriz soportado conforme se observa en la Figura 4-53. Los coluviones clasto soportados generalmente son más estables que la matriz soportados (Suarez 1998).



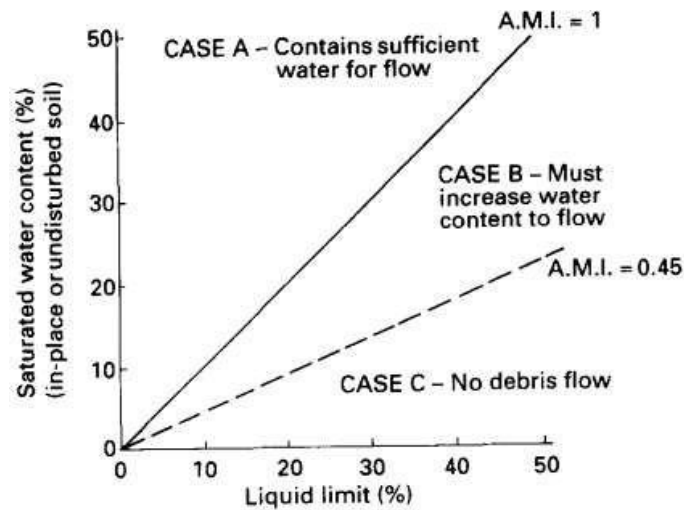
**Figura 4-53.** Clasificación de coluviones según su estructura de soporte: a) Clastos soportado, b) intermedio, c) matriz soportado. Fuente: (Suárez 1998)

La matriz de suelo ensayada en las dos microcuencas fue clasificada como grava limo arcillosa con arena o arena limo arcillosa con grava con un porcentaje importante de material fino de 15-38% en su extensión.

Las partes altas presentaron una mayor humedad natural al momento de la extracción a comparación con las muestras de la parte media y baja. Estas muestras fueron extraídas en estado líquido según sus índices de liquidez (ver. Tabla 4-5). Estos resultados son consistentes tanto para la microcuenca Marianza como para la microcuenca Marianza Aledaña.

Según Suarez (1998) los suelos con contenidos importantes de arcilla tienen a fluir al aumentar su contenido de agua, especialmente cuando están cerca del límite líquido. Además, presentan una baja permeabilidad, pero alta porosidad con la capacidad almacenar grandes cantidades de agua.

Los resultados del índice aproximado de movilidad (IMA) se discuten en base en las investigaciones de Ellen y Fleming (1987). Para la Microcuenca del sector Marianza se observó que las muestras de la parte bajan y media de la microcuenca mostraron valores de IMA superiores a 1, lo que indica su capacidad para fluir sin la adición de agua y su capacidad inicial para retener más agua que su límite líquido. En contraste, la muestra de la parte alta presentó un IMA inferior a 1, lo que indica que solo puede fluir si se añade agua (ver. Figura 4-35) (Harper 1997). En relación con el IMA de la microcuenca Marianza Aledaña, la matriz de suelo presenta el mismo comportamiento en las zonas media bajas y altas que la microcuenca Marianza.



**Figura 4-54.** Relación entre el contenido de agua saturada del suelo in situ o inalterado y el límite líquido de Atterberg para suelos que se movilizaron como flujos de detritos durante el temporal de 1982 en la bahía de San Francisco. Fuente: (Ellen and Fleming 1987)

Según investigaciones de Turner 1996) la presencia de arcilla en los suelos es un factor clave para la ocurrencia y mantenimiento de los flujos de detritos. Estos eventos suelen ocurrir en áreas con lechos rocosos que contienen una cantidad significativa de arcilla. Además, se observa que los suelos con un alto contenido de arcilla (superior al 10%) requieren un mayor tiempo de humectación antes de que comiencen a fluir, y esto puede ser influenciado por la presencia de escorrentía superficial, que contribuye a la erosión e infiltración del agua (Chen et al. 2010)

A pesar de ser necesarios una mayor cantidad de ensayos y muestras para caracterizar la zona, los resultados proporcionados en esta sección proveen una evaluación rápida del comportamiento de la matriz de suelo en el sector Marianza.

#### 4.8.4 Precipitación

El ajuste de datos de precipitación efectuado mediante el método de la curva doble masa indica coeficientes de proporcionalidad para cada una de las posibles combinaciones entre las estaciones disponibles. La estación de Marianza Bajo y Marianza Alto muestra la mayor proporcionalidad entre los datos siendo el coeficiente muy cercano a 1. Mientras la estación de Marianza pinos presenta la mayor variación con los datos de las otras estaciones siendo su coeficiente de 0.96 y 0.95 con Marianza Alto y Marianza Bajo respectivamente.

Las variaciones indican que los registros de la estación Marianza Pinos son menores a los de otras estaciones y podrían deberse a su ubicación, variación en altura y la presencia de cobertura vegetal. Como se pudo constatar la estación este situada en medio de un bosque lo cual reduce la capacidad de captación de lluvia siendo la principal



causa de estas variaciones. Cabe recalcar que las curvas indican registros consistentes y proporcionales entre sí, validando los datos de precipitación para su uso en los posteriores análisis tal como se indica en el manual de (Searcy and Hardison 1960).

Los datos de precipitación corregidos y ajustados permitieron construir hietogramas de precipitación a diferentes escalas. Estos dan una perspectiva más amplia de las particularidades y características del evento presentado el 27 de marzo de 2022. Los resultados de la sección 4.4.2 correspondiente al hietograma mensual durante el periodo de registro muestran que en el año 2022 se presentó el mes de marzo con mayor precipitación para datos de todas las estaciones. La precipitación acumulada durante marzo de 2022 representa el máximo valor registrado en la estación de Marianza Bajo con 277.4mm. En las estaciones de Marianza Alto y Marianza Pinos el valor fue de 253.6mm y 242mm respectivamente, siendo en este caso el segundo mes con más lluvia acumulada registrado. Es remarcable la extrema cantidad de precipitación registrada en marzo de 2022 ya que al presentar un valor poco común hace del sector Marianza más vulnerable ante eventos geodinámicos.

Un análisis particular de la precipitación durante el mes de marzo de 2022 en base a los resultados de la sección 4.4.3 indican que el mayor incremento en la precipitación acumulada mensual se produjo el día 27 de marzo. Este día el evento producido entre las 14:30 y las 18:30 es el que aporta con casi la totalidad de la lluvia registrada y con alrededor del 15% de la precipitación mensual de marzo de 2022.

Se registró una profundidad máxima de 3.6mm en 5 minutos en la estación de Marianza Bajo resultando en una intensidad pico de 43.2mm/h. Este pico se produce de manera simultánea en las 3 estaciones de registro aproximadamente a las 15:50 del 27 de marzo de 2022. Reportes periodísticos indican que la primera llamada a los servicios de emergencia se reportó a las 15:52 coincidiendo con el intervalo de tiempo de mayor intensidad registrado (Orellana 2022; Pazan 2022).

Se observa que los hietogramas de marzo de 2022 en las 3 estaciones muestran picos cercanos de lluvia incremental a 5 minutos a lo largo del mes. Sin embargo, la curva de precipitación acumulada indica que la duración de estos eventos fue menor a la presentada el día 27. La comparativa entre la precipitación acumulada de las 3 estaciones en marzo de 2022 respalda la proporcionalidad obtenida mediante la curva doble masa ya que la estación de Marianza Pinos es la que presenta valores menores y Marianza Bajo los mayores. Las 3 estaciones presentan un comportamiento igual para todo el mes con variaciones en la cantidad de precipitación registrada.

El análisis de variación estacional obtenido en la sección 4.4.4 brinda información relevante sobre los periodos más lluviosos registrados. La época de mayor precipitación en el sector corresponde a los meses de marzo, abril y mayo siendo el primero el mes en donde se han registrado las mayores precipitaciones. Aunque el mes de marzo es usualmente el más lluvioso, marzo de 2022 registro valores que presentan una probabilidad de excedencia menor al 10%. Esto hace que la precipitación registrada sea poco probable y que este periodo sea uno de los más extremos.

La determinación de eventos extremos para periodos de 24 y 3 horas en la sección 4.4.5 sustenta lo expuesto previamente. Los eventos extremos para el año 2022 en ambos periodos de análisis muestran que estos se produjeron el 27 de marzo. El análisis a 24 horas indica que si bien el valor registrado en 2022 es alto no representa el pico de precipitación siendo este el valor correspondiente al año 2014. Sin embargo, en el caso de eventos extremos en intervalos de 3 horas es claro que el valor más alto desde 2004 hasta la actualidad es el registrado por la estación Marianza Bajo el 27 de marzo de 2022 a partir de las 15:00 con 41.4mm. De igual forma el valor máximo registrado en 3 horas corresponde a esta fecha y hora para las estaciones de Marianza alto y Marianza Pinos.

#### **4.8.5 Lluvia extrema en el sector Marianza**

En relación con los mecanismos de activación de los flujos de detritos en el sector Marianza, se observa que las altas intensidades de lluvia en cortos periodos de tiempo desempeñan un papel crucial. Estas intensidades pueden generar una concentración de agua en ciertas áreas del coluvión, formando bolsas de agua, mientras que la presencia de canales internos en la base del coluvión puede generar corrientes o áreas de acumulación. Es importante destacar que la lluvia intensa es uno de los principales mecanismos de activación de los flujos de detritos, como se ha documentado en estudios anteriores (Suarez, 1998).

Un análisis de datos satelitales reveló la existencia de micro deslizamientos en la parte superior de la microcuenca Marianza antes del evento ocurrido en marzo de 2022. Asimismo, se observó que la acumulación de lluvias máximas en un periodo de 3 horas en el sector Marianza representó aproximadamente del 70% al 93% de las lluvias máximas registradas en 24 horas, que se produjeron en el mismo día, específicamente el 27 de marzo de 2022. Estos porcentajes indican que la intensidad de la lluvia en el periodo de 3 horas fue significativa en comparación con la precipitación total diaria.

Además, se constató que el mes de marzo fue el período más lluvioso, alcanzando un máximo histórico según la Figura 4-21. Esta información demuestra que las condiciones

climáticas durante ese mes fueron excepcionalmente húmedas, lo que resultó en proporciones significativas de humedad en el suelo.

En general la gran cantidad de lluvia en cortos periodos de tiempo, registrado en 3 horas fue algo inusual con un periodo de retorno máximo de 30 años. Por otra parte, las máximas lluvias registradas en 24 hora son más comunes con periodos de retorno de 6 años. Esto quiere decir que las inusuales intensidades fueron fundamentales en la ocurrencia del flujo de detritos en marzo del 2022.

#### **4.8.6 Modelación lluvia - escorrentía**

El modelo lluvia-escorrentía presenta resultados para 2 casos de análisis en la microcuenca de Marianza y la microcuenca Aledaña. Estos casos presentan variabilidad en el número de curva y en la serie de tiempo correspondiente a los datos de precipitación. Se pueden observar diferencias en los resultados de hidrograma obtenidos en la sección 4.6.6 para cada caso de análisis.

Tanto para el caso 1 y 2 el caudal pico se presenta minutos después de las 16:30 en los elementos hidrológicos junction y sink. El tiempo que demora en presentarse este caudal pico entre ambos elementos es de 4 y 2 minutos para la microcuenca de Marianza y la microcuenca Aledaña respectivamente. Los caudales obtenidos para el caso 2 son mayores en ambas microcuencas debido a que se considera un número de curva mayor y por lo tanto las abstracciones iniciales son menores. Esto hace que se infiltre una menor cantidad de lluvia y el potencial de generar escorrentía aumente.

Si bien el máximo valor de caudal se registra aproximadamente a las 16:30 para todos los casos, los hidrogramas obtenidos muestran picos considerables a las 16:04 y 16:12 aproximadamente. Estos picos presentan valores de caudal cercanos a los máximos obtenidos durante el evento. Es remarcable que para el caso 1 en la microcuenca de Marianza la subcuenca Marianza 3 presenta su pico máximo a las 16:04. Según información proporcionada por el servicio de emergencias ECU 911 la primera llamada de alerta se dio a las 15:52 (Orellana 2022) mientras que este mismo ente reportó la ocurrencia de un evento geodinámico a las 16:21 del 27 de marzo de 2022 (Pazan 2022). Por lo tanto, los caudales presentados durante este periodo tienen un rol fundamental como uno de los factores causantes del movimiento de masas.

El caudal registrado en el elemento hidrológico junction es de gran relevancia ya que es un punto de convergencia entre las subcuencas de la parte alta. Las imágenes satelitales consultadas y las visitas realizadas indican que este fue el punto de partida para el flujo de detritos. Además, en este punto se aprecia la existencia de un

deslizamiento previo que ante la presencia de caudales considerables pudo proveer de material saturado que desencadenó el evento. Para este elemento hidrológico el caso 1 presenta un caudal pico de  $0.140\text{m}^3/\text{s}$  mientras que en el caso 2 se obtiene  $0.308\text{m}^3/\text{s}$  para la microcuenca de Marianza. Estos caudales podrían superar la descarga crítica para desencadenar un evento de flujo de detritos la cual puede estar entre  $0.03$  y  $0.16\text{m}^3/\text{s}$  siendo una cantidad relativamente baja de agua la necesaria para movilizar sedimentos en canales de microcuencas con un área similar a las del sector Marianza (Pastorello et al. 2020). Por lo que precipitaciones con una intensidad y duración suficiente para producir este tipo de caudales podrían representar un riesgo para la zona.

El comportamiento en las microcuencas de análisis es similar ya que los caudales analizados en los elementos hidrológicos relevantes presentan gráficas que siguen una misma tendencia. Los caudales pico registrados en el elemento hidrológico sink, en donde converge la escorrentía de toda la microcuenca, son similares para los casos en donde ambas cuencas comparten las mismas condiciones. La microcuenca de Marianza presenta un caudal pico de  $0.377\text{m}^3/\text{s}$  mientras que en la aldeaña se obtiene  $0.401\text{m}^3/\text{s}$  para el caso 1. De igual manera en el caso 2 los caudales son similares obteniéndose  $0.717\text{m}^3/\text{s}$  en la microcuenca de Marianza y  $0.844\text{m}^3/\text{s}$  en la Aldeaña. Para ambos casos de simulación el caudal específico de las microcuencas se aproxima haciendo que estas sean comparables al estar sometidas a condiciones de lluvia-escorrentía similares durante el evento.

El modelo lluvia – escorrentía no fue validado ante la carencia de datos de una estación de medición de caudal en la microcuenca de Marianza o Aldeaña. Dicho modelo presenta incertidumbres en la determinación de los parámetros necesarios para la estimación de la escorrentía. La mayor fuente de error proviene de la determinación de la precipitación y el número de curva ya que solo la comparación entre el caudal estimado y medido permiten validar estos parámetros (NRCS 2004).

El análisis de condiciones antecedentes de humedad también introduce incertidumbre en el modelo ya que se establecen condiciones predefinidas que no toman en consideración que tan cercano al límite se encuentra la precipitación acumulada en días previos. Si bien la cantidad de precipitación en días previos indica AMC tipo I estas asumen un que el suelo está seco y hay un bajo potencial de escorrentía. Sin embargo, se sabe que el mes de marzo de 2022 es uno de los más lluviosos registrados por lo que un contraste con resultados que consideren AMC tipo II es válido ya que consideran que la cuenca se encuentra en sus condiciones normales (SCS 1972). Estas

perspectivas permiten analizar y entender el comportamiento de este tipo de microcuencas ante condiciones diferentes.

#### **4.8.7 Cobertura vegetal y actividades antrópicas**

La cobertura vegetal desempeña un papel crucial en la ocurrencia de flujos de detritos. La presencia de una vegetación densa y saludable actúa como una barrera natural que ayuda a reducir la erosión del suelo y la movilidad de los sedimentos. Las raíces de las plantas ayudan a estabilizar el suelo, evitando su deslizamiento y la formación de torrentes de agua en superficie (Suarez 1998).

Cuando la cobertura vegetal es escasa o se encuentra degradada, el suelo queda expuesto a la acción directa de la lluvia, lo que aumenta la erosión y la probabilidad de desprendimientos de tierra. Además, la falta de vegetación impide la absorción y retención del agua en el suelo, lo que incrementa la escorrentía superficial y la generación de flujos de detritos (Turner 1996).

El área de la microcuenca del sector Marianza ha reducido su cobertura vegetal, principalmente por la actividad humana (GADP Sayausí 2018). La vegetación arbustiva y forestal ha sido talada y reemplazada por pastizales, específicamente para el desarrollo de actividades agrícolas y cría de animales. La falta de vegetación en pendientes pronunciadas facilita la generación de flujos de detritos al no contar con una protección natural contra la erosión. Se evidenció la presencia de escarpes pronunciados y micro deslizamientos en los terrenos a medida que se ascendió al lugar.

De igual manera, los sectores adyacentes a la red estatal han experimentado un notable crecimiento urbano que ha generado una expansión de la frontera agrícola y ganadera (GADP Sayausí 2015). Esta expansión ha resultado en la deforestación de vegetación nativa y la adecuación de laderas con altas pendientes para la agricultura y la cría de animales (Gomezcoello 2020). Por lo mencionado investigaciones indican que las pérdidas asociadas a flujos de detritos están vinculadas con el crecimiento poblacional y asentamientos urbanos en zonas en pie de montañas inestables con altas pendientes (Desai et al. 2015).

También es notorio que, en las zonas altas, las quebradas de las microcuencas sean empleadas como sistemas de captación. Continuas tuberías e instalaciones fueron encontradas en base a las visitas al lugar.

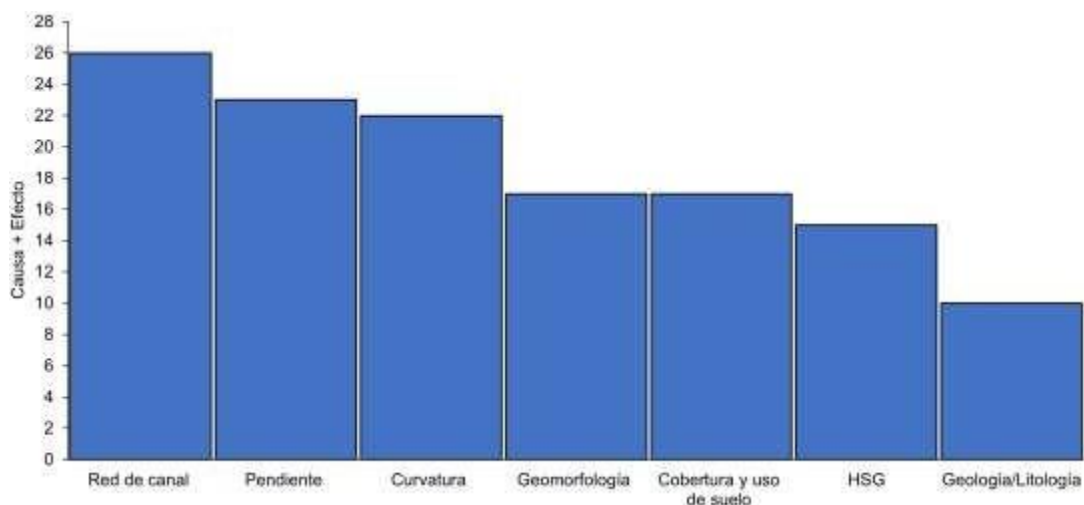
En el sector Marianza, existe un riesgo inminente asociado a la ocurrencia de incendios, especialmente durante épocas secas. Esta situación se debe a la presencia de vegetación arbustiva, bosques y pajonales, los cuales representan un potencial

combustible en caso de incendios. La presencia de fuego en estas áreas aumenta la susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos, ya que los materiales vegetales quemados pueden ser movilizados por la acción del agua y generar eventos de deslizamientos y arrastres de sedimentos (Wells 1987).

#### 4.8.8 Metodología RES (Mapa de susceptibilidad ante flujo de detritos)

A partir de los factores condicionantes obtenidos de portales gubernamentales y herramientas de fácil acceso en QGIS (3.28) se aplicó la metodología RES para obtener un mapa de susceptibilidad de deslizamientos a flujo de detritos en el sector Marianza.

En el diagrama mostrado en la Figura 4-45, se puede observar que la distribución de puntos se extiende perpendicularmente a la diagonal principal  $C = E$ . Esto indica que los parámetros no presentan una amplia dispersión en su nivel de interactividad, es decir, en sus valores  $C + E$ . Esta característica difiere de otros sistemas en los que los puntos de los parámetros se agrupan a lo largo de la diagonal principal, con algunos parámetros mostrando una interacción muy baja y otros siendo altamente interactivos. Cuanto más interactivo es un sistema, mayor es su potencial de inestabilidad, ya que pequeñas variaciones en un parámetro pueden tener un impacto significativo en el comportamiento del sistema (Mazzoccola and Hudson 1996).



**Figura 4-55.** Histograma de intensidad de interactividad. Fuente: Elaboración Propia.

El histograma presentado en la Figura 4-55 muestra una distribución gradual hacia la derecha con la mayoría de los parámetros centrados alrededor del valor medio. Por lo tanto, no se puede afirmar que solo unos pocos parámetros sean importantes para definir la interactividad del sistema, ni que los demás carezcan de influencia. Se concluye que los 7 parámetros seleccionados actúan como criterios en el proceso de determinar la susceptibilidad a los flujos de detritos en el área de estudio. Se justifica

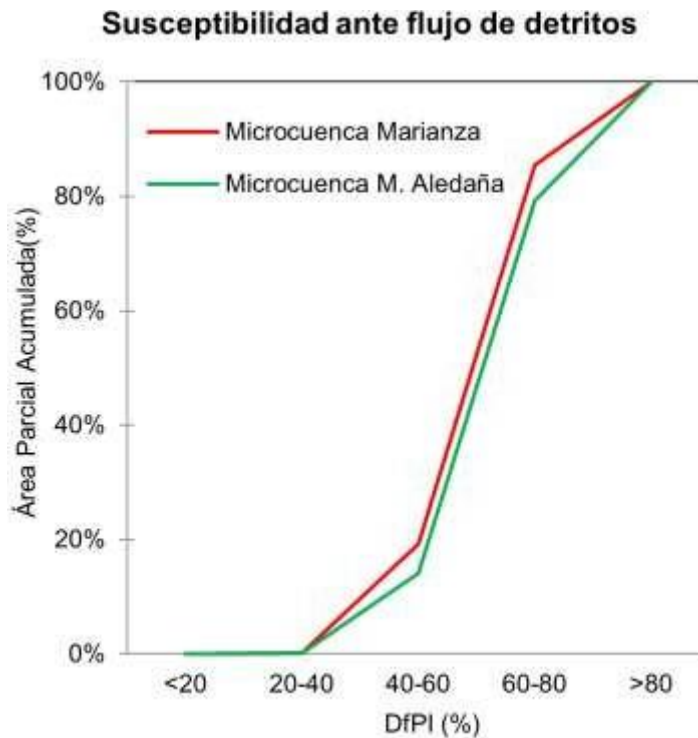
que todos estos parámetros sean considerados en el cálculo del índice  $DfPI$ , ya que cada uno de ellos contribuye de manera significativa a la evaluación de la susceptibilidad del área de estudio.

A pesar de que a nivel provincial no existe un registro de deslizamientos ni en particular una descripción que detalle los ocurridos, la metodología RES resultó ser eficaz al mostrar zonas susceptibles a partir de la información analizada del fenómeno ocurrido en marzo del 2022. Según [Vianello et al. \(2022\)](#) señala que la metodología RES es la más precisa al momento de predecir zonas susceptibles a flujos de detritos

En base a los resultados obtenidos, las áreas más susceptibles corresponden a sectores de alta elevación conformadas por vertientes encañonadas, laderas escarpadas y redes de canal bien establecidos a lo largo de la red estatal Cuenca-Molleturo-El Empalme. Esta información se corrobora con los resultados obtenidos en investigaciones donde los factores de mayor influencia en la susceptibilidad corresponden a la red hidrológica de canales, curvatura y la pendiente (Bonetto et al. 2021; Vianello et al. 2022).

Por otra parte, las zonas con menor susceptibilidad ante flujo de detritos comprenden áreas con alta capacidad de drenaje, cobertura de suelo forestal, sin vertientes pronunciadas ni depresiones excesivas.

En términos de la evaluación de las dos microcuencas en el área de estudio, se observa que la microcuenca Marianza Aledaña presenta un  $DfPI$  global ligeramente mayor que la microcuenca Marianza. Esto se debe a que tiene una mayor cantidad de área influenciada por píxeles con un  $DfPI$  en el rango de alto y muy alto. Sin embargo, si se analiza el área parcial acumulada en función de un rango de  $DfPI$ , se observa que la microcuenca Marianza tiene un área parcial acumulada con un  $DfPI$  más alto (ver. Figura 4-56). Además, se destaca que la microcuenca Marianza tiene una red de canales bien definida y profunda en comparación con la microcuenca Marianza Aledaña.



**Figura 4-56.** Susceptibilidad ante flujo de detritos en el sector Marianza mediante RES. Fuente: Elaboración Propia

La metodología RES implementada en este estudio demostró ser eficiente y económica, ya que permitió identificar áreas con diferentes niveles de susceptibilidad para la ocurrencia de flujos de detritos. Estos hallazgos coinciden con los lugares potenciales de amenaza para flujos y deslizamientos establecidos por el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de la parroquia de Sayausí a lo largo de la red estatal Cuenca-Molleturo-El Empalme.

#### 4.8.9 Descripción evento de flujo de detritos 27 de marzo del 2022

En la presente investigación, se determinó que el flujo de detritos ocurrido en la microcuenca Marianza el 27 de marzo de 2022 fue resultado de factores interrelacionados. La alta intensidad de lluvia registrada en un corto período de tiempo saturó el suelo y generó una significativa escorrentía superficial. Además, la acumulación de sedimentos en las intermediaciones del canal previo al deslizamiento posiblemente obstruyó el cauce principal en la parte superior, lo que favoreció la erosión y el transporte del material hasta la base.

El pico de intensidad de 43.2mm/h de lluvia se registró a las 15:50 ocasionando picos con un caudal de 0.225m<sup>3</sup>/s y 0.250m<sup>3</sup>/s entre las 16:05 y las 16:12 respectivamente en la parte alta de la microcuenca. Estos picos llegaron 4 minutos después a la base de la microcuenca con valores entre 0.590m<sup>3</sup>/s y 0.625m<sup>3</sup>/s. Cabe recalcar que estos valores



se dieron antes del pico máximo de caudal el cual indica caudales de  $0.308\text{m}^3/\text{s}$  en la parte alta y de  $0.717\text{m}^3/\text{s}$  en la base registrados a las 16:31 y 16:35 respectivamente. Si bien el caudal máximo se presentó a las 16:30 los picos registrados pocos minutos después de las 16 horas fueron los desencadenantes del flujo de detritos ya que según la información consultada el evento ocurrió entre las 15:52 y las 16:21. Los datos de caudal analizados previamente corresponden a la simulación del caso 2 el cual considera la precipitación solo del evento del 27 de marzo de 2022 para condiciones antecedentes de humedad tipo 2. Se analizaron estas condiciones ya que el mes de marzo de 2022 registra la mayor precipitación mensual del periodo de registro. De igual forma el día 27 presenta los valores picos en intervalos de 3 horas por lo que se puede considerar a la microcuenca en condiciones normales de humedad.

Además, la geomorfología de Marianza también influyó en la generación del flujo de detritos. Las pronunciadas pendientes y las vertientes cóncavas accidentadas presentes en la zona proporcionaron las condiciones propicias para la formación y movilización del material. Estas características topográficas permitieron que el material se deslizara y se transportara rápidamente por la acción de la gravedad, aumentando la magnitud y la velocidad del flujo.

La geología de la región también desempeñó un papel importante en la ocurrencia del flujo de detritos. La presencia de formaciones rocosas, superficie base rocosa y suelos arcillosos en Marianza contribuyó a una mayor acumulación de agua en el terreno, lo que incrementó la susceptibilidad a los flujos. Esto sumado a depresiones en la parte superior causaron una acumulación de agua y favorecieron la infiltración del suelo pendiente abajo. Estos suelos arcillosos, al saturarse con la lluvia, perdieron su capacidad de retención y absorción de agua, generando un aumento en la escorrentía superficial y contribuyendo así al flujo de detritos.

En relación con la microcuenca Marianza Aledaña, se observó una alta susceptibilidad ante la ocurrencia de flujos de detritos debido a la interacción de diversos factores geológicos, geomorfológicos y de cobertura vegetal. Aunque no se registraron deslizamientos previos ni una pérdida significativa de cobertura vegetal en las cercanías del canal, se identificaron diferencias con respecto a la microcuenca Marianza. Por un lado, la microcuenca Marianza Aledaña presenta un menor índice de pendiente, lo que implica una menor inclinación del terreno y, potencialmente, una menor capacidad de transporte de sedimentos. Además, no se observaron depresiones en su parte superior, lo que limita la acumulación de agua y la infiltración adecuada. Estas características contribuyen a su susceptibilidad ante flujos de detritos en comparación con la

microcuenca Marianza. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar las particularidades de cada microcuenca al evaluar su susceptibilidad ante flujos de detritos.

En este estudio se evidenció que las lluvias registradas en marzo fueron las más intensas en los últimos 19 años, lo que indica la presencia de eventos extremos de precipitación con potencial repetición en el futuro. Es importante destacar que se identificó un evento de precipitación extrema dentro de dicho mes, con un período de retorno de 30 años. La precipitación previa al evento contribuyó a la saturación del terreno y a la mayor vulnerabilidad frente a flujos de detritos. Este tipo de eventos podrían volver a ocurrir en la zona con posibilidad de lluvias más frecuentes y de menor periodo de retorno, lo que podría generar daños significativos.

Es fundamental tomar medidas de prevención y gestión adecuada de los riesgos asociados a los flujos de detritos, incluyendo la microcuenca Marianza, debido a que el flujo y desprendimiento de material en las partes altas de las microcuencas podrían volverse recurrente. Estos hallazgos resaltan la importancia de implementar estrategias de mitigación para reducir el impacto de estos eventos en la zona de estudio.

#### **4.9 Resumen**

En este estudio se llevó a cabo una caracterización geológica y geomorfológica detallada del área de estudio en el sector Marianza. Se identificaron dos formaciones rocosas predominantes y se evidenció la presencia de valles glaciares en forma de "U". Además, se analizaron los datos de precipitación acumulada, destacando marzo de 2022 como el mes con mayor precipitación y la identificación de eventos extremos en intervalos de 24 y 3 horas. Se determinó que la geología, geodinámica y geomorfología son factores clave en la susceptibilidad a los flujos de detritos, con la presencia de suelos arcillosos y formaciones rocosas arcillosas. La cobertura vegetal y las actividades humanas también desempeñan un papel importante en la ocurrencia de estos eventos. Se generó un mapa de susceptibilidad de deslizamientos por flujo de detritos en el sector Marianza, resaltando zonas de alta elevación y laderas escarpadas como las más susceptibles. Estos resultados subrayan la importancia de considerar las características específicas de cada microcuenca al evaluar la susceptibilidad y adoptar medidas preventivas y de gestión adecuadas para minimizar los riesgos asociados a los flujos de detritos.

## Capítulo 5

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 5.1 Cumplimiento de objetivos de la investigación

El objetivo central de la investigación fue estudiar el flujo de detritos ocurrido el 27 de marzo del 2022 en el sector Marianza e identificar la relación entre los factores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos que desencadenaron este movimiento geodinámico. Además de proyectar esta relación en una microcuenca colindante de montaña para evaluar su susceptibilidad geodinámica por medio de un modelo heurístico. Para cumplir este propósito se llevaron a cabo las siguientes actividades:

Se realizó una caracterización, geológica, geomorfológica y clasificación de suelos en dos microcuencas del sector Marianza. Además, se desarrolló un modelo de lluvia-escorrentía para examinar la respuesta hidrológica del área frente a precipitaciones intensas. Este modelo permitió simular la escorrentía superficial y analizar el caudal pico en la generación de flujos de detritos en el sector de estudio.

Se llevó a cabo un análisis de la combinación de factores que condicionan la ocurrencia de un flujo de detritos en el sector Marianza utilizando la metodología RES. Este análisis permitió identificar los factores clave que influyen en la susceptibilidad a los flujos de detritos. Además, se proyectó la combinación de factores condicionantes en la ocurrencia de movimientos geodinámicos en el área de estudio permitiendo obtener información valiosa de la susceptibilidad del sector.

Este trabajo ha logrado cumplir con los objetivos planteados, proporcionando una comprensión de los factores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos que desencadenaron el movimiento geodinámico de marzo del 2022 en la microcuenca Marianza.

#### 5.2 Resumen de los principales hallazgos

Durante la evaluación geomorfológica del sector, se pudo constatar la presencia de microcuencas alargadas con pendientes superiores a 45° y curvaturas cóncavas, que dan origen a una red de canales bien definida. Se observaron obstrucciones en las partes altas de estos canales, posiblemente debido a deslizamientos ocurridos en las áreas circundantes antes del evento de marzo de 2022. Estas obstrucciones probablemente ocasionaron el taponamiento y acumulación de agua en la zona. Además, se evidenció la existencia de superficies cóncavas en la parte superior de las

microcuencas, lo que facilita la infiltración del agua hacia los suelos ubicados en elevaciones inferiores.

La caracterización geológica realizada en el sector reveló la presencia de formaciones rocosas meteorizadas con una matriz de suelo arcilloso, así como la existencia de un manto superficial base de suelo rocoso con baja permeabilidad. Estas características contribuyen a una mayor retención de agua en el terreno, lo que aumenta la susceptibilidad a los deslizamientos durante eventos de lluvias intensas.

Se evidenció que en las áreas de mayor elevación de la microcuenca Marianza se presenta suelo con una alta susceptibilidad al flujo en condiciones de saturación. Estos suelos están compuestos principalmente por sistemas de soporte clástico con una matriz compuesta por grava y arena limo arcillosa, lo que los hace propensos a procesos de meteorización y erosión hídrica.

Se constató que el evento ocurrido en marzo del 2022 fue causado por una precipitación extrema de 41.4 mm en 3h con una intensidad máxima medida en 5 minutos de 43.2 mm/h, con un periodo de retorno de 30 años. Además, se pudo confirmar que el área de estudio fue impactada por una precipitación antecedente acumulada de marzo de 210 mm, considerada como el mes más lluvioso registrado en los últimos 19 años.

En base a la modelación lluvia-escorrentía se pudo corroborar que la hora a la que se producen picos en los caudales en la parte superior de la microcuenca Marianza coincide con la hora en la que se registró el flujo de detritos en la zona. En las partes superiores de las microcuencas caudales superiores a  $0.225\text{m}^3/\text{s}$  representan una amenaza al ser capaces de saturar y movilizar material a través del cauce de la microcuenca.

Se observó una reducción de la cobertura vegetal arbustiva y forestal en las áreas adyacentes a las redes de drenaje de las microcuencas en el sector Marianza. Esta disminución se atribuye principalmente a la expansión de actividades agrícolas y de pastoreo en terrenos con pendientes pronunciadas. Como resultado, se han producido deslizamientos que afectan la integridad de las redes de drenaje.

Mediante la aplicación de la metodología RES, se identificó la presencia de microcuencas en el sector Marianza que presentan condiciones similares e incluso más críticas a la microcuenca donde ocurrió el evento de marzo de 2022, lo que las hace altamente propensas a experimentar flujos de detritos. Estas microcuencas se ubican a lo largo de la vía Cuenca-Molleturo-El Empalme y exhiben un Índice de (DFPI) en el rango de elevado a extremo.

Finalmente, se destacó la importancia de implementar medidas de manejo sostenible del suelo y del agua para mitigar los impactos de las lluvias intensas y prevenir eventos catastróficos relacionados con los flujos de detritos. Se resaltó la posibilidad de que se repitan deslizamientos similares en caso de ocurrencia de eventos de alta precipitación, lo cual se corroboró con lluvias posteriores que causaron el desprendimiento de material en la parte superior.

### **5.3 Respuesta a la pregunta de investigación**

Mediante el desarrollo de este trabajo, se proporcionó evidencias para responder las preguntas investigación planteadas. Se ha evidenciado que lluvias torrenciales en periodos cortos de tiempo, combinadas con condiciones geomorfológicas desfavorables, suelos arcillosos, y cobertura vegetal desprotegida pueden ocasionar flujos de detritos. Los hallazgos identificaron que la cantidad de lluvia extrema con altas intensidades se considera como uno de los factores desencadenantes clave, junto con las características geomorfológicas del sector Marianza. Además, se ha identificado la existencia de microcuencas en el sector que presentan condiciones similares a la microcuenca Marianza donde ocurrió el evento de marzo del 2022, lo que las hace propensas a la ocurrencia de flujos de detritos. Estos resultados brindan una respuesta concluyente a las preguntas de investigación.

### **5.4 Contribuciones, limitaciones y posibles aplicaciones de los hallazgos del trabajo de investigación**

Este estudio ha contribuido a identificar los factores que desencadenaron y condicionaron el flujo de detritos suscitado en el sector Marianza en marzo del 2022. Los resultados obtenidos resaltan la importancia de considerar las condiciones geomorfológicas, la intensidad de la lluvia, el uso del suelo y la capacidad de retención del suelo en la planificación y gestión de riesgos naturales relacionados con flujos de detritos. Además, se ha realizado una caracterización detallada de las microcuencas y se ha proyectado la información en una microcuenca aledaña. Estos hallazgos son relevantes para fortalecer la planificación y gestión del riesgo de desastres en áreas propensas a flujos de detritos y permiten aumentar el conocimiento de microcuencas de montaña

Una dificultad encontrada durante el desarrollo de este trabajo fue la obtención de datos precisos y completos de caudales en el sector Marianza para validar los modelos de lluvia-escorrentía. La incertidumbre en la determinación de los tiempos de concentración y la falta de registros hidrológicos limitaron la capacidad de verificar la precisión de los

resultados. A pesar de ello, se tomaron precauciones adicionales y se emplearon métodos alternativos para estimar los caudales.

Además, la complejidad del terreno y la dificultad para acceder a algunas áreas del estudio representaron desafíos adicionales en la recopilación de las muestras de suelo. A pesar de que estas limitaciones pudieron afectar la precisión de los resultados, se realizaron esfuerzos exhaustivos para recopilar y analizar la información disponible, lo que permitió obtener hallazgos significativos en relación con los objetivos planteados.

Los hallazgos obtenidos en este estudio ofrecen una base sólida para comprender el flujo de detritos ocurrido en el sector Marianza. La identificación y comprensión de las condiciones geomorfológicas, hidrológicas y geológicas permiten implementar medidas preventivas y estrategias de mitigación. Estos hallazgos pueden ser utilizados para fortalecer la planificación urbana, evitar la construcción en áreas de alto riesgo y garantizar una gestión adecuada del uso de suelo. Asimismo, los resultados respaldan la implementación de un sistema de alerta temprana en el sector que permitan una respuesta rápida y oportuna ante eventos de lluvias intensas.

Además, la difusión de esta información a la comunidad y la educación sobre los riesgos asociados a los flujos de detritos pueden fomentar la adopción de prácticas sostenibles y reducir la vulnerabilidad de la población. De esta manera la aplicación de los hallazgos del presente estudio contribuirá a una gestión más efectiva de la amenaza ante flujo de detritos en el sector Marianza y promoverá la seguridad y resiliencia de la comunidad frente a eventos futuros.

### **5.5 Futuras Líneas de Investigación**

Esta sección provee recomendaciones para futuras líneas de investigación relacionadas con este trabajo.

- Verificar los movimientos lentos de tierra en la parte superior y en las intermediaciones de los canales principales en las microcuencas del sector Marianza por medio de metodología DInSar, de modo que se pueda ver la rata de movimiento por año y determinar zonas con altos desplazamiento generalmente, más susceptibles.
- Implementar un sistema de monitoreo instantáneo remoto de precipitación, medición de caudales y sistemas de alerta temprana en el sector Marianza para mitigar el impacto de movimientos geodinámicos.

- Estudiar la influencia de la humedad de los suelos en las partes altas de las microcuencas en el sector Marianza en la generación de flujo subsuperficial y flujos de detritos.
- Implementar la metodología RES en el área de estudio modificando la matriz de interacción calibrada en función de las condiciones del sector Marianza y tomando en cuenta factores hidrológicos para su aplicación.
- Generar modelos lluvia escorrentía calibrados para microcuencas de montaña en el sector Marianza.
- Realizar investigaciones sobre medidas de prevención y mitigación como redirección de caudales, colocación de geomembranas, excavación de túneles, instalación de mallas para evitar flujos de detritos en las microcuencas de la red estatal Cuenca-Molleturo-El Empalme.

### Referencias Bibliográficas

- Argles, D. T. W., D. D. A. Rothery, and P. R. A. Spicer. 2010. *Geological Field Techniques*. United Kingdom: The Open University.
- ASTM. 1998. *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*.
- ASTM. 2018. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.
- ASTM. 2019. *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*.
- ASTM. 2020. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.
- ASTM. 2023. *Standard Practices for Preserving and Transporting Soil Samples (Withdrawn 2023)*.
- Bartles, M., T. Brauer, D. Ho, M. Fleming, G. Karlovits, J. Pak, N. Van, and J. Willis. 2022. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*. US Army Corps of Engineers.
- Basabe, P., B. Künzi, A. Neumann, M. Ronquillo, J. Cherres, F. Astudillo, and R. Cevallos. 1998. *Proyecto PREOCUPA: Prevención de desastres naturales en la cuenca del río Paute*.
- Bates, R. L., and J. A. Jackson. 1987. "Glossary of geology." Elsevier Science Pub. Co. Inc., New York, NY.
- Berger, V. W., and Y. Zhou. 2014. "Kolmogorov-Smirnov Test: Overview." *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Bonetto, S., P. Mosca, F. Vagnon, and D. Vianello. 2021. "New application of open source data and Rock Engineering System for debris flow susceptibility analysis." *J. Mt. Sci.*, 18 (12): 3200-3217. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6814-3>.
- Bravo-López, E., T. Fernández Del Castillo, C. Sellers, and J. Delgado-García. 2022a. "Landslide Susceptibility Mapping of Landslides with Artificial Neural Networks: Multi-Approach Analysis of Backpropagation Algorithm Applying the Neuralnet Package in Cuenca, Ecuador." *Remote Sensing*, 14 (14): 3495. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/rs14143495>.
- Bravo-López, E., T. Fernández Del Castillo, C. Sellers, and J. Delgado-García. 2022b. "Landslide Susceptibility Mapping of Landslides with Artificial Neural Networks: Multi-Approach Analysis of Backpropagation Algorithm Applying the Neuralnet Package in Cuenca, Ecuador." *Remote Sensing*, 14 (14): 3495. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/rs14143495>.
- Buckley, A. 2010. "Understanding curvature rasters." *ArcGIS Blog*. Accessed June 25, 2023. <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/understanding-curvature-rasters/>.
- Carpio Moreta, P. S. 2020. "Análisis de deslizamientos mediante interferometría radar en la ciudad de Cuenca-Ecuador." bachelorThesis. Universidad de Cuenca.
- Chen, N. Sh., W. Zhou, Ch. L. Yang, G. Sh. Hu, Y. Ch. Gao, and D. Han. 2010. "The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content." *Geomorphology*, 121 (3): 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.017>.
- Chow, V. T. 1988. *Applied Hydrology*. New York.
- Clavijo, G. 2022. "Aluvión de Sayausí - Diario El Mercurio." April 3, 2022.
- Comunidad Andina. 2009. *Atlas de las dinámicas del territorio Andino: población y bienes expuestos a amenazas naturales*. 192. Cali, Colombia: Secretaría General de la Comunidad Andina.
- Das, B. M. 2019. *Advanced Soil Mechanics, Fifth Edition*.
- Donald, H., C. Cynthia, Foster Richard, Chatoian John, Fincher James, Strenger Steven, Keys James, Maxwell James, and King Thomas. 1998. "A Geomorphic Classification System."



- El Universo. 2022. "Un nuevo deslave se registró en Sayausí; esta vez no hubo víctimas mortales ni damnificados." *El Universo*. Accessed June 28, 2023. <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/un-nuevo-deslave-se-registro-en-sayausi-esta-vez-no-hubo-victimas-mortales-ni-damnificados-nota/>.
- Ellen, S. D., and R. W. Fleming. 1987. "Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bayregion, California." *Debris Flows/Avalanches*, J. E. Costa, and G. F. Wieczorek, eds., 0. Geological Society of America.
- EO Browser. 2023. "Sentinel-hub EO-Browser3." Accessed June 26, 2023. <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>
- Erazo, M. 1975. "Problemas de Geotecnia Relacionados con la Inestabilidad del Suelo." Faramarzi, F., H. Mansouri, and M. A. Ebrahimi Farsangi. 2013. "A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60: 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2012.12.045>.
- GADP Sayausí. 2015. *Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia Sayausí del 2015*.
- GADP Sayausí. 2018. *ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL 2015 ALINEACION DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LA PARROQUIA SAYAUSI AL NUEVO PLAN DE DESARROLLO NACIONAL 2017-2021*. 135. Cuenca: GADP Sayausí.
- Gomezcoello, C. A. 2020. "Resiliencia de la microcuenca del río Matadero frente a riesgos exógenos." bachelorThesis. Universidad de Cuenca.
- Gregoretto, C., and G. D. Fontana. 2008. "The triggering of debris flow due to channel-bed failure in some alpine headwater basins of the Dolomites: analyses of critical runoff." *Hydrological Processes*, 22 (13): 2248-2263. <https://doi.org/10.1002/hyp.6821>.
- Guzzetti, F., and M. Cardinali. 1991. "Debris-flow phenomena in the Central Apennines of Italy." *Terra Nova*, 3 (6): 619-627. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1991.tb00204.x>.
- Harper, S. B. 1997. "Use of approximate mobility index to identify areas susceptible to landsliding by rapid mobilization to debris flows in southern Thailand."
- Houlding, S. W. 1994. "The Geological Characterization Process." *3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization*, S. W. Houlding, ed., 7-26. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hudson, J. A., and J. P. Harrison. 1992. "A new approach to studying complete rock engineering problems." *QJEGH*, 25 (2): 93-105. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1992.025.02.03>.
- IIGE. 2007. "Hoja Geológica Cuenca 53." Cuenca.
- Keefer, D. K., and M. C. Larsen. 2007. "Assessing Landslide Hazards." *Science*, 316 (5828): 1136-1138. American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.1143308>.
- Mahala, A. 2020. "The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings." *Appl Water Sci*, 10 (1): thirty-three. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>.
- Maidment, D. R. 1993. *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill Education.
- Martínez Bravo, E., C. Coello, and J. Feyen. 2017. "Análisis comparativo del comportamiento de la escorrentía de tres microcuencas andinas con diferente régimen de precipitación y cobertura vegetal." *MASKANA*, 8: 129-144. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.01.12>.
- Mazzoccola, D. F., and J. A. Hudson. 1996. "A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability." *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29 (1): 37-56. The Geological Society of London. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1996.029.P1.03>.

- Merriam, C. 1937. "A comprehensive study of the rainfall on the Susquehanna Valley." *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 18 (2): 471-476. <https://doi.org/10.1029/TR018i002p00471>.
- MTOP. 2022a. "Trabajos en Marianza tienen un avance del 25% – Ministerio de Transporte y Obras Públicas." Accessed April 7, 2023. <https://www.obraspublicas.gob.ec/trabajos-en-marianza-tienen-un-avance-del-25/>.
- MTOP. 2022b. "MTOP continúa labores para desalojar material en el sector de Gulag - Marianza - Ministerio de Transporte y Obras Públicas." Accessed April 6, 2023. <https://www.obraspublicas.gob.ec/mtop-continua-labores-para-desalojar-material-en-el-sector-de-gulag-marianza/>.
- Natural Resources Conservation Service. 2004. "Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall." *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*.
- NRCS. 2007. "Hydrologic Soil Groups." *Chapter 7: Hydrology National Engineering Handbook*.
- Ntelis, G., S. Maria, and L. Efthymios. 2019. "Landslide Susceptibility Estimation Using GIS. Evritania Prefecture: A Case Study in Greece." *GEP*, 07 (08): 206-220. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.78015>.
- Orellana, F. 2022. "Emergencia en Sayausí por lluvia y deslizamientos." *Diario El Mercurio*. Accessed July 9, 2023. <https://elmercurio.com.ec/2022/03/28/emergencia-en-sayausi-por-lluvia-y-deslizamientos/>.
- Orellana, F. 2023. "Roca de gran tamaño se desprende de parte alta de Marianza y cae en una vivienda." May 26, 2023.
- Ortigao, J. A. R., and A. S. F. J. Sayao. 2004. *Handbook of Slope Stabilisation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Pastorello, R., V. D'Agostino, and M. Hürlimann. 2020. "Debris flow triggering characterization through a comparative analysis among different mountain catchments." *CATENA*, 186: 104348. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104348>.
- Paulhus, J. L. H., and M. A. Kohler. 1952. "INTERPOLATION OF MISSING PRECIPITATION RECORDS." *Monthly Weather Review*, 80 (8): 129-133. American Meteorological Society. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2).
- Pazan, C. 2022. "Un fallecido tras derrumbe que se registró en Sayausí, Cuenca." *El Comercio*. Accessed July 9, 2023. <https://www.elcomercio.com/actualidad/cuenca/fallecido-derrumbe-sayausi-cuenca.html>.
- Primicias. 2022. "Aluviones alteraron cuencas de cuatro quebradas que alimentan al río Tomebamba." *Primicias*. Accessed April 6, 2023. <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/aluviones-alteran-cuencas-rio-tomebamba/>.
- Regmi, N. R., J. R. Giardino, and J. D. Vitek. 2010a. "Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA." *Geomorphology*, 115 (1-2): 172-187. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.002>.
- Regmi, N. R., J. R. Giardino, and J. D. Vitek. 2010b. "Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA." *Geomorphology*, 115 (1): 172-187. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.10.002>.
- Remaître, A., J.-P. Malet, and O. Maquaire. 2011. "Geomorphology and kinematics of debris flows with high entrainment rates: A case study in the South French Alps." *Comptes Rendus Geoscience*, 343 (11): 777-794. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2011.09.007>.
- Romera, E. R., and M. M. Santos. 2015. "Hidrología Aplicada: Escorrentía."

- Rozos, D., G. D. Bathrellos, and H. D. Skillodimou. 2011. "Comparison of the implementation of rock engineering system and analytic hierarchy process methods, upon landslide susceptibility mapping, using GIS: a case study from the Eastern Achaia County of Peloponnesus, Greece." *Environ Earth Sci*, 63 (1): 49-63. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0687-z>.
- Rozos, D., L. Pyrgiotis, S. Skias, and P. Tsagaratos. 2008. "An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential of natural slopes in Greek territory. An application in Karditsa County." *Landslides*, 5 (3): 261-270. <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0117-4>.
- Santander, C. 2019. "METODOLOGÍA ROCK ENGINEERING SYSTEM PARA DETERMINAR ESTABILIDAD GEOMECÁNICA EN TALUDES MINEROS." Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- SCS. 1972. *SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. The Service.
- Searcy, J. K., and C. H. Hardison. 1960. "Double-Mass Curves."
- Sellers, C., R. Rodas, N. P. Carrasco, R. De Stefano, D. Di Martire, and M. Ramondini. 2021. "Ground Deformation Monitoring of a Strategic Building Affected by Slow-Moving Landslide in Cuenca (Ecuador)." *European Workshop on Structural Health Monitoring, Lecture Notes in Civil Engineering*, P. Rizzo and A. Milazzo, eds., 149-158. Cham: Springer International Publishing.
- Sepúlveda, S. 1998. "METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL PELIGRO DE FLUJOS DE DETRITOS EN AMBIENTES MONTAÑOSOS: APLICACIÓN EN LA QUEBRADA LO CAÑAS, REGIÓN METROPOLITANA." Accessed April 9, 2023. [https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay/alma991006174839703936/56UDC\\_INST:56UDC\\_INST](https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay/alma991006174839703936/56UDC_INST:56UDC_INST).
- Singh, V. P. 1998. "Log-Pearson Type III Distribution." *Entropy-Based Parameter Estimation in Hydrology*, Water Science and Technology Library, V. P. Singh, ed., 252-274. Dordrecht: Springer Netherlands.
- SNGRE. 2022. *Informe Nro. 053 Época Lluviosa a nivel Nacional del 01 de enero al 31 de marzo de 2022*. Informe.
- Stancanelli, L. M., D. J. Peres, A. Cancelliere, and E. Foti. 2017. "A combined triggering-propagation modeling approach for the assessment of rainfall induced debris flow susceptibility." *Journal of Hydrology*, 550: 130-143. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.038>.
- Suárez, J. 1998. "Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales." *EROSION.COM.CO :: SITIO WEB DEL ING. JAIME SUÁREZ*. Accessed April 9, 2023. <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales/>.
- Suarez, J. 1998. *Estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia.
- Timbe, L. M., P. J. Crespo Sánchez, and J. J. Cabrera-Balarezo. 2019. "Evaluation of the HEC-HMS model for the hydrological simulation of a paramo basin." *DYNA*, 86 (210): 338-344. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.70738>.
- Torres-Ramos, I., and B. Roldan-Rodríguez. 2019. "Distribución de gumbel: Antecedentes y aplicación."
- Turner, A. K. 1996. "Colluvium and talus." *Landslides investigation and mitigation. Special Report*, 247: 525-554.
- U. S. Weather Bureau, L. L. 1958. "Rainfall Intensity -Frequency Regime."
- US. Army Corps of Engineers. 1994. *FLOOD-RUNOFF ANALYSIS*. 1110-2-1417. Manual. Whashington, DC 20314-1000: U.S. Army Corps of Engineers.
- USDA. 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. United States Department of Agricultura.
- Vianello, D., F. Vagnon, S. Bonetto, and P. Mosca. 2022. "Debris flow susceptibility mapping using the Rock Engineering System (RES) method: a case study." *Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01985-6>.

- Wang, P.-L., and J. J. Feddema. 2020. "Linking Global Land Use/Land Cover to Hydrologic Soil Groups From 850 to 2015." *Global Biogeochemical Cycles*, 34 (3): e2019GB006356. <https://doi.org/10.1029/2019GB006356>.
- Wei, T. C., and J. McGuinness. 1973. "Reciprocal distance squared method, a computer technique for estimating areal precipitation."
- Wells, W. G., II. 1987. "The effects of fire on the generation of debris flows in southern California." *Debris Flows/Avalanches*, J. E. Costa, and G. F. Wieczorek, eds., 0. Geological Society of America.
- Winter, M., F. Macgregor, and L. Shackman. 2005. *Scottish Road Network Landslides Study*.
- Zêzere, J. L. 2002. "Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal)." *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2 (1/2): 73-82. <https://doi.org/10.5194/nhess-2-73-2002>.
- Zhang, Y., J. Chen, Q. Wang, C. Tan, Y. Li, X. Sun, and Y. Li. 2022. "Geographic information system models with fuzzy logic for susceptibility maps of debris flow using multiple types of parameters: a case study in Pinggu District of Beijing, China." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22: 2239-2255. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2239-2022>.
- Zhao, Y., X. Meng, T. Qi, G. Chen, Y. Li, D. Yue, and F. Qing. 2021. "Modeling the Spatial Distribution of Debris Flows and Analysis of the Controlling Factors: A Machine Learning Approach." *Remote Sensing*, 13 (23): 4813. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/rs13234813>.