



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DEL NIVEL DE EROSIÓN POTENCIAL EN LAS
MICROCUENCAS ALTOANDINAS DEL RIO ATILLO,
OZOGOCHÉ Y YASEPAN EN LA ZONA SUR ORIENTAL DE LA
PROVINCIA DE CHIMBORAZO PARA EL USO Y
APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL RECURSO SUELO**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR: CARLOS ISRAEL IMBAQUINGO CANGAS

DIRECTORA: ING. JOHANA ELIZABETH AYALA IZURIETA MsG.

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Carlos Israel Imbaquingo Cangas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Carlos Israel Imbaquingo Cangas, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Aquellos textos de otras fuentes están correctamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos presentes en este Trabajo de Integración Curricular, el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 01 de diciembre de 2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Carlos Imbaquingo", enclosed within a stylized, circular scribble.

Carlos Israel Imbaquingo Cangas
040197648-5

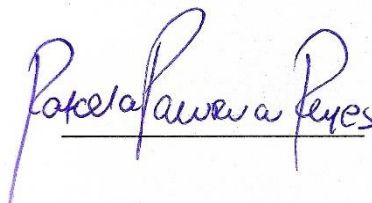
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación , **EVALUACIÓN DEL NIVEL DE EROSIÓN POTENCIAL EN LAS MICROCUENCAS ALTOANDINAS DEL RIO ATILLO, OZOGOCHÉ Y YASEPAN EN LA ZONA SUR ORIENTAL DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO PARA EL USO Y APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DEL RECURSO SUELO**, realizado por el señor: **CARLOS ISRAEL IMBAQUINGO CANGAS**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Ana Rafaela Pacurucu Reyes.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



2023-12-01

Ing. Johanna Elizabeth Ayala Izurieta.
DIRECTORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2023-12-01

Ing. Andrés Agustín Beltrán Dávalos.
ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR



2023-12-01

DEDICATORIA

Dedico este trabajo investigativo a todos quienes han iluminado mi camino. En esta travesía de descubrimiento y aprendizaje, mi motivación se encuentra en la ciencia y en los grandes que dejaron una huella imborrable en la historia. La búsqueda constante del conocimiento, la pasión por explorar lo desconocido y la dedicación de los pioneros en la ciencia son fuentes inagotables de inspiración. Me siento parte de una tradición que valora la curiosidad, la investigación y la contribución al entendimiento del mundo. Expreso unas palabras llenas de profundo aprecio a mis padres, cuyo incansable esfuerzo y sacrificio han sido la base fundamental de mi trayectoria académica. A mis queridas hermanas, les agradezco de corazón su apoyo incondicional y la compañía constante en este significativo viaje que hemos compartido. A mis amigos, les agradezco sinceramente por ser parte integral de mi vida académica, por compartir risas, superar desafíos juntos, crear anécdotas imborrables y por ser testigos de los momentos inolvidables que han marcado mi carrera. Cada uno de ustedes ha dejado una huella imborrable en mi corazón, y por eso, mi gratitud es eterna.

Carlos

AGRADECIMIENTO

Manifiesto mi profunda gratitud a la Facultad de Ciencias y a mis profesores, quienes con su dedicación y entusiasmo han sido fundamentales para cultivar y fortalecer mi amor por la ciencia a lo largo de mi carrera académica. Un reconocimiento especial dirigido a los técnicos del grupo GISOCH, cuya experiencia, guía y amistad fueron esenciales en mi desarrollo. Además, agradezco de manera particular a mi directora y asesor de tesis por su orientación y valiosa contribución a este trabajo de investigación. Sus conocimientos y guía desempeñaron un papel fundamental en el proceso de investigación, enriqueciendo mi experiencia académica. A todos ustedes, gracias por ser parte integral de mi viaje académico y por el valioso apoyo brindado en cada paso. Esta dedicación simboliza la luz de aquellos que, como astros en mi cosmos, han guiado cada aspecto de mi travesía, lo que me ha permitido explorar interestelarmente los límites de mi conocimiento y orientándome para querer trascender en las fronteras del saber.

Carlos

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xxi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxiv
RESUMEN.....	xxv
ABSTRACT.....	xxvi
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 <i>Objetivo general</i>.....	6
1.3.2 <i>Objetivo específicos</i>.....	6

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Antecedentes.....	7
2.2 Referencias teóricas.....	8
2.2.1 <i>Efectos causas y consecuencias de la erosión hídrica</i>.....	8
2.2.2 <i>Cuencas hidrográficas en zona altoandina del Ecuador</i>.....	10
2.2.3 <i>Ecosistemas en zonas altoandinas del Ecuador</i>.....	10
2.2.4 <i>Cobertura de cobertura vegetal y uso del suelo en la zona altoandina de la provincia de Chimborazo</i>.....	12
2.2.5 <i>Aplicaciones para monitorear variables ambientales, climatológicas y cambios y alteraciones del suelo</i>.....	13
2.2.5.1 <i>Fuentes de datos satelitales</i>.....	14
2.2.5.2 <i>Plataformas de descarga de información geográfica y análisis geoespacial</i>.....	16
2.2.5.3 <i>Procesamiento de imágenes satelitales</i>.....	17
2.3 Bases teóricas.....	20
2.3.1 <i>Características generales de una cuenca hidrográfica</i>.....	20

2.3.1.1	<i>Tipos de cuencas</i>	20
2.3.1.2	<i>Partes de una cuenca hidrográfica</i>	23
2.3.1.3	<i>Componentes del sistema fluvial en una cuenca hidrográfica</i>	24
2.3.1.4	<i>Clasificación de cuencas hidrográficas por el sistema de drenaje</i>	26
2.3.2	<i>Características de la red hidrográfica</i>	27
2.3.2.1	<i>Delimitación de una cuenca hidrográfica</i>	28
2.3.2.2	<i>Dirección de los flujos</i>	29
2.3.2.3	<i>Acumulación de los flujos</i>	29
2.3.2.4	<i>Jerarquización de la red fluvial</i>	29
2.3.3	<i>Geomorfometría de una cuenca hidrográfica</i>	30
2.3.3.1	<i>Parámetros físicos de la cuenca</i>	30
2.3.3.2	<i>Parámetros de forma de la cuenca</i>	31
2.3.3.3	<i>Parámetros de relieve de una cuenca</i>	32
2.3.3.4	<i>Altimetría de la cuenca</i>	34
2.3.4	<i>Hidromorfometría de una cuenca hidrográfica</i>	35
2.3.4.1	<i>Características de la red de drenaje</i>	35
2.3.4.2	<i>Hidráulica de la red fluvial</i>	36
2.3.4.3	<i>Altimetría del río</i>	38
2.3.5	<i>Comportamiento bioclimático</i>	39
2.3.5.1	<i>Precipitación media</i>	39
2.3.5.2	<i>Temperatura media</i>	39
2.3.5.3	<i>Sistema de Holdridge</i>	39
2.3.6	<i>Erosión hídrica del suelo</i>	43
2.3.6.1	<i>Etapas de erosión hídrica</i>	44
2.3.6.2	<i>Proceso de erosión hídrica en zonas altoandinas</i>	46
2.3.7	<i>Ecuación universal de pérdida de suelo revisada</i>	48
2.3.7.1	<i>Factor R</i>	48
2.3.7.2	<i>Factor K</i>	49
2.3.7.3	<i>Factor L.S</i>	51
2.3.7.4	<i>Factor C</i>	51

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	53
3.1	Zona de Estudio	53
3.1.1	<i>Localización de la zona de estudio</i>	53

3.2	Corrección y depuración de un modelo de elevación digital	54
3.3	Análisis de la red hidrográfica de las unidades hidrográficas	55
3.3.1	<i>Delimitación de las unidades hidrográficas de Atillo, Ozogoché y Yasepan</i>	55
3.3.2	<i>Demarcación de la red hidrográfica</i>	56
3.3.3	<i>Jerarquización de la red fluvial</i>	56
3.4	Estimación de las geomorfometrías de las unidades hidrográficas	57
3.4.1	<i>Determinación de parámetros físicos</i>	57
3.4.1.1	<i>Cálculo del área (A), perímetro (P) y centroides (C)</i>	58
3.4.1.2	<i>Estimación de longitud axial de la cuenca (Lax)</i>	58
3.4.1.3	<i>Cálculo de ancho de la cuenca (W)</i>	59
3.4.2	<i>Determinación de parámetros de forma</i>	59
3.4.2.1	<i>Cálculo del coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)</i>	59
3.4.2.2	<i>Valoración del factor de forma (Kf)</i>	60
3.4.2.3	<i>Cálculo del coeficiente de masividad (Km)</i>	61
3.4.3	<i>Determinación de parámetros de relieve</i>	62
3.4.3.1	<i>Aproximación de la pendiente media de la cuenca (Pmc)</i>	62
3.4.3.2	<i>Caracterización del tipo de relieve</i>	63
3.4.3.3	<i>Estimación de curva hipsométrica (Hc)</i>	64
3.4.3.4	<i>Aproximación de la elevación mediana de la cuenca (Emc)</i>	65
3.4.4	<i>Determinación de la altimetría de la cuenca hidrográfica</i>	65
3.4.4.1	<i>Cota mínima (Hmin) y cota máxima (Hmax) de la cuenca</i>	65
3.4.4.2	<i>Cálculo del desnivel altitudinal (Dac)</i>	65
3.4.4.3	<i>Aproximación de la altitud media (Hmc)</i>	66
3.5	Estimación de las hidromorfometrías de las unidades hidrográficas	66
3.5.1	<i>Caracterización y análisis de la red de drenaje</i>	66
3.5.1.1	<i>Cálculo de la longitud del cauce principal (Lcp)</i>	67
3.5.1.2	<i>Cálculo de la longitud de la red hídrica (Lrh)</i>	67
3.5.1.3	<i>Aproximación de la pendiente media del cauce principal (Pmcp)</i>	67
3.5.1.4	<i>Representación del perfil longitudinal (Pl)</i>	69
3.5.2	<i>Determinación de la hidráulica de la red fluvial</i>	69
3.5.2.1	<i>Cuantificación del número de cauces o tributarios (Nc)</i>	69
3.5.2.2	<i>Determinación de la densidad de drenaje (Dd)</i>	69
3.5.2.3	<i>Estimación del tiempo de concentración (Tc)</i>	70
3.5.2.4	<i>Determinación de la sinuosidad de las corrientes (Sc)</i>	71
3.6	Determinación del comportamiento bioclimático de la región de estudio	72
3.6.1	<i>Estimación de la precipitación media</i>	72

3.6.2	<i>Estimación de temperatura media</i>	73
3.6.3	<i>Aplicación del sistema de Holdridge</i>	74
3.6.4	<i>Estimación de la biotemperatura media anual</i>	74
3.6.5	<i>Cálculo de la evapotranspiración potencial y razón de evapotranspiración</i>	76
3.7	Determinación de los factores del modelo RUSLE	78
3.7.1	<i>Determinación del Factor R</i>	78
3.7.1.1	<i>Estimación del Índice modificado de Fournier</i>	79
3.7.2	<i>Determinación del factor K</i>	80
3.7.2.1	<i>Caracterización de la taxonomía de los suelos</i>	81
3.7.2.2	<i>Selección del estrato de suelo</i>	83
3.7.2.3	<i>Determinación del tipo de textura en los suelos</i>	84
3.7.2.4	<i>Cuantificación de las propiedades físicas y químicas del suelo</i>	87
3.7.3	<i>Determinación del factor L.S</i>	89
3.7.3.1	<i>Cálculo de factor L</i>	90
3.7.3.2	<i>Cálculo del factor S</i>	91
3.7.4	<i>Determinación del Factor C</i>	92
3.7.4.1	<i>Adquisición de datos y corrección de imágenes satelitales</i>	92
3.7.4.2	<i>Aplicación del enmascaramiento de nubes en SNAP</i>	93
3.7.4.3	<i>Selección del método para calcular el factor C</i>	93
3.7.5	<i>Determinación del Factor P</i>	95
3.7.5.1	<i>Enfoque con prácticas de conservación</i>	96
3.7.5.2	<i>Enfoque con diferentes prácticas o sin prácticas de conservación</i>	97
3.7.6	<i>Determinación de la pérdida de suelo por del modelo RUSLE</i>	97
3.8	Determinación de estadísticos de cada uno de los factores determinados	99
3.8.1	<i>Estadísticos temporales (2002-2021) para variables con series de tiempo</i>	99
3.8.2	<i>Estadísticos extraídos de las propiedades de cada raster</i>	99

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	101
4.1	Interpretación de las geomorfometrías de las unidades hidrográficas	101
4.1.1	<i>Análisis de parámetros físicos de las unidades hidrográficas</i>	101
4.1.1.1	<i>Resultados del cálculo del área (A)</i>	101
4.1.1.2	<i>Resultados del cálculo del perímetro (P)</i>	101
4.1.1.3	<i>Interpretación de la estimación de longitud axial de las cuencas (Lax)</i>	101
4.1.1.4	<i>Resultados del cálculo de ancho de las cuencas (W)</i>	102

4.1.1.5	<i>Comparación de los parámetros físicos de las unidades hidrográficas</i>	102
4.1.2	Análisis de parámetros de forma de las unidades hidrográficas	102
4.1.2.1	<i>Resultados del cálculo del coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)</i>	102
4.1.2.2	<i>Interpretación del valor del factor de forma (Kf)</i>	103
4.1.2.3	<i>Resultados del cálculo del coeficiente de masividad (Km)</i>	103
4.1.2.4	<i>Comparación de los parámetros de forma de las unidades hidrográficas</i>	104
4.1.3	Interpretación de la altimetría de la cuenca hidrográfica	104
4.1.3.1	<i>Resultados de la cota mínima (Hmin) y cota máxima (Hmax) de las cuencas</i>	105
4.1.3.2	<i>Interpretación del cálculo del desnivel altitudinal (Dac)</i>	105
4.1.3.3	<i>Resultados de la aproximación de la altitud media (Hmc)</i>	105
4.1.3.4	<i>Comparación de los parámetros de altimetría de las unidades hidrográficas</i>	106
4.1.4	Análisis de parámetros de relieve de las unidades hidrográficas	106
4.1.4.1	<i>Interpretación de la aproximación de la pendiente media de la cuenca (Pmc)</i>	106
4.1.4.2	<i>Análisis de la caracterización del tipo de relieve</i>	107
4.1.4.3	<i>Resultados de la estimación de curva hipsométrica (Hc)</i>	107
4.1.4.4	<i>Comparación de los parámetros de relieve de las unidades hidrográficas</i>	115
4.2	Cuantificación de las hidromorfometrías de las unidades hidrográficas	115
4.2.1	Análisis y evaluación de la red de drenaje	116
4.2.1.1	<i>Resultados del cálculo de la longitud del cauce principal (Lcp)</i>	116
4.2.1.2	<i>Resultados del cálculo de la longitud de la red hídrica (Lrh)</i>	116
4.2.1.3	<i>Interpretación de la estimación de la pendiente media del cauce principal (Pmcp)</i>	116
4.2.1.4	<i>Representación del perfil longitudinal (Pl)</i>	117
4.2.1.5	<i>Comparación de los parámetros la red de drenaje de las unidades hidrográficas</i> ...	119
4.2.2	Interpretación de la altimetría de los ríos	120
4.2.2.1	<i>Resultado de la cota mínima (Hmin) y cota máxima (Hmax)</i>	120
4.2.2.2	<i>Interpretación del cálculo del desnivel altitudinal (Dar)</i>	121
4.2.2.3	<i>Resultado de la aproximación de la altitud media de los ríos (Hmr)</i>	121
4.2.2.4	<i>Cálculo de la altitud mediana de los ríos (Hmr)</i>	121
4.2.2.5	<i>Comparación de los parámetros de altimetría de los ríos</i>	121
4.2.3	Cuantificación de la hidráulica de la red fluvial	122
4.2.3.1	<i>Resultado de la cuantificación del número de cauces o tributarios (Nc)</i>	122
4.2.3.2	<i>Cuantificación de la densidad de drenaje (Dd)</i>	122
4.2.3.3	<i>Estimación del tiempo de concentración (Tc)</i>	123
4.2.3.4	<i>Evaluación de la sinuosidad de las corrientes (Sc)</i>	123
4.2.3.5	<i>Comparación de los parámetros de la hidráulica de la red fluvial</i>	124

4.3	Evaluación integral de las características geomorfológicas y hidromorfológicas de las microcuencas	125
4.4	Interpretación del comportamiento bioclimático de la región de estudio	126
4.4.1	Análisis de la precipitación media (PM)	126
4.4.1.1	<i>Análisis de la precipitación media en la microcuenca de Atillo</i>	126
4.4.1.2	<i>Análisis de la precipitación media en la microcuenca de Ozogoche</i>	130
4.4.1.3	<i>Análisis de la precipitación media en la microcuenca de Yasepan</i>	134
4.4.1.4	<i>Análisis global de la precipitación media en las unidades hidrológicas</i>	138
4.4.2	Análisis de temperatura media (TM)	139
4.4.2.1	<i>Análisis de la temperatura media en la microcuenca de Atillo</i>	139
4.4.2.2	<i>Análisis de la temperatura media en la microcuenca de Ozogoche</i>	143
4.4.2.3	<i>Análisis de la temperatura media en la microcuenca de Yasepan</i>	146
4.4.2.4	<i>Análisis global de la distribución de la temperatura media en las unidades hidrográficas</i>	151
4.4.3	Análisis del Sistema de Holdridge	152
4.4.3.1	<i>Resultado de los componentes del sistema Holdridge en la microcuenca de Atillo.</i>	152
4.4.3.2	<i>Resultado de los componentes del sistema Holdridge en la microcuenca de Ozogoche</i>	154
4.4.3.3	<i>Resultado de los componentes del sistema Holdridge en la microcuenca de Ozogoche</i>	156
4.4.3.4	<i>Análisis global de la Evapotranspiración potencial en las unidades hidrográficas</i> .	157
4.5	Cuantificación de la erosión suelo	159
4.5.1	Cuantificación e interpretación del Factor R	159
4.5.1.1	<i>Análisis del factor R en la microcuenca de Atillo</i>	159
4.5.1.2	<i>Análisis del factor R en la microcuenca de Ozogoche</i>	160
4.5.1.3	<i>Análisis del factor R en la microcuenca de Yasepan</i>	162
4.5.1.4	<i>Análisis global del factor R de las unidades hidrográficas</i>	163
4.5.2	Cuantificación e interpretación del Factor K	166
4.5.2.1	<i>Análisis de la taxonomía de las unidades hidrográficas</i>	166
4.5.2.2	<i>Resultado de la selección del estrato de suelo</i>	169
4.5.2.3	<i>Análisis cuantitativo de las propiedades físicas y químicas del suelo en Atillo</i>	176
4.5.2.4	<i>Análisis cuantitativo de las propiedades físicas y químicas del suelo en Ozogoche</i> .	177
4.5.2.5	<i>Análisis cuantitativo de las propiedades físicas y químicas del suelo en Yasepan</i> ...	177
4.5.2.6	<i>Análisis global de las propiedades físicas y químicas del suelo en las unidades hidrográficas</i>	178
4.5.2.7	<i>Análisis textural de los suelos de la microcuenca de Atillo</i>	179

4.5.2.8	<i>Análisis textural de los suelos de la microcuenca de Ozogoche</i>	180
4.5.2.9	<i>Análisis textural de los suelos de la microcuenca de Yasepan</i>	181
4.5.2.10	<i>Análisis global del análisis textural de las unidades hidrográficas</i>	181
4.5.2.11	<i>Análisis textural global de los suelos de unidades hidrigraficas</i>	182
4.5.2.12	<i>Interpretación del análisis global del factor K en las unidades hidrográficas</i>	184
4.5.3	<i>Interpretación del factor L.S de las unidades hidrográficas</i>	185
4.5.3.1	<i>Análisis del factor L.S de la microcuenca de Atillo</i>	186
4.5.3.2	<i>Análisis del factor L.S de la microcuenca de Ozogoche</i>	188
4.5.3.3	<i>Análisis del factor L.S de la microcuenca de Yasepan</i>	190
4.5.3.4	<i>Análisis global del factor L.S de las unidades hidrográficas</i>	192
4.5.4	<i>Interpretación del Factor C de las unidades hidrográficas</i>	193
4.5.4.1	<i>Análisis del factor C de la microcuenca de Atillo</i>	194
4.5.4.2	<i>Análisis del factor C de la microcuenca de Ozogoche</i>	195
4.5.4.3	<i>Análisis del factor C de la microcuenca de Yasepan</i>	196
4.5.4.4	<i>Análisis global del factor C de las unidades hidrográficas</i>	197
4.6	Interpretación de la erosión potencial en las unidades hidrográficas	198
4.6.1	<i>Comparación de la erosión potencial con los resultados de las geomorfometrias</i> .	201
4.7	Interpretación de la erosión hídrica real del suelo de las unidades hidrográficas ...	
	202
4.7.1	<i>Comparación de la erosión hídrica real con el comportamiento bioclimático</i>	204
4.8	Comparación de los resultados de las tasas de erosión potencial con las tasas erosión hídrica real	206

CAPÍTULO V

5.	MARCO PROPOSITIVO	209
5.1	Presentación del estudio y socialización de la comunidad	209
5.1.1	<i>Obtención de permisos y autorizaciones para acceso a la comunidad</i>	209
5.1.2	<i>Contacto inicial con la comunidad para la explicación de la importancia del estudio</i>	209
5.1.3	<i>Presentación de los resultados determinados y los beneficios para la comunidad</i>	209
5.1.4	<i>Exposición de la pertinente validación del modelo RUSLE en campo y su significancia</i>	210
5.1.5	<i>Socialización sobre la relevancia del monitoreo de campo a corto y largo plazo</i> ..	210
5.1.6	<i>Establecimiento de un diálogo continuo y participación de la comunidad en el monitoreo</i>	210

5.1.7	<i>Concientización del impacto de la erosión hídrica en las microcuencas</i>	210
5.1.8	<i>Identificación de zonas erosionadas con impacto en los sistemas hídricos de la cuenca</i>	211
5.1.9	<i>Evaluación de posibles riesgos hidromorfológicos y geomorfológicos en la comunidad</i>	211
5.1.10	<i>Análisis del impacto de la erosión en los ecosistemas locales y sus consecuencias para la comunidad</i>	211
5.2	Validación y Calibración del Modelo RUSLE	212
5.2.1	<i>Preparación del equipo técnico para la validación del modelo</i>	212
5.2.2	<i>Evaluación de las condiciones de campo para la validación empírica</i>	212
5.2.3	<i>Recopilación de datos de campo para la validación del modelo</i>	212
5.2.4	<i>Comparación de datos de campo con resultados del Modelo RUSLE</i>	213
5.2.5	<i>Análisis estadístico de la precisión y exactitud del modelo RUSLE</i>	213
5.2.6	<i>Ajuste de parámetros del modelo RUSLE según resultados de la validación</i>	213
5.2.7	<i>Calibración de factores R, K y C del modelo RUSLE</i>	214
5.2.8	<i>Monitoreo de cambios temporales de erosión a corto plazo</i>	214
5.2.9	<i>Evaluación de tendencias de erosión a largo plazo</i>	214
5.2.10	<i>Evaluación de la utilidad del modelo RUSLE para pronosticar la erosión</i>	214
5.3	Diseño personalizado de terrazas de escorrentía	215
5.3.1	<i>Socialización de los beneficios y resultados a la comunidad</i>	215
5.3.2	<i>Selección estratégica de sitios y estudios topográficos</i>	215
5.3.3	<i>Diseño preciso de terrazas de escorrentía adaptadas a la geomorfología e hidromorfología</i>	216
5.3.4	<i>Evaluación de impacto ambiental y planificación en zonas críticas</i>	216
5.3.5	<i>Optimización de diseños para reducir impactos ambientales</i>	216
5.3.6	<i>Capacitación local en la construcción de terrazas de escorrentía</i>	217
5.3.7	<i>Integración de materiales de construcción locales en los diseños</i>	217
5.3.8	<i>Implementación de tecnologías de monitoreo para evaluar la efectividad</i>	217
5.3.9	<i>Evaluación continua y ajustes en el diseño según resultados en campo</i>	218
5.3.10	<i>Monitoreo y mantenimiento de las terrazas de escorrentía</i>	218
5.4	Prácticas agrícolas sostenibles y ganadería responsable	218
5.4.1	<i>Socialización integral de prácticas sostenibles a la comunidad</i>	218
5.4.2	<i>Planificación de rotación de cultivos y pastoreo para el desarrollo sostenible</i>	219
5.4.3	<i>Aplicación de técnicas de conservación del suelo</i>	219
5.4.4	<i>Zonificación de pastoreo en zonas que no generen alteración hacia las especies endémicas</i>	219

5.4.5	<i>Diversificación de cultivos resistentes al clima en función de la altura</i>	220
5.4.6	<i>Uso eficiente de recursos hídricos en la agricultura y la ganadería</i>	220
5.4.7	<i>Implementación de agricultura de conservación que minimiza la perturbación del suelo</i>	220
5.4.8	<i>Monitoreo de prácticas agrícolas y ganaderas estableciendo sistemas de seguimiento y evaluación</i>	220
5.4.9	<i>Evaluación de impacto socioeconómico que implica un enfoque sostenible y responsable</i>	221
5.4.10	<i>Educación continua a la comunidad sobre la aplicación de prácticas sostenibles</i>	221
5.5	Restauración ecológica y conservación	221
5.5.1	<i>Evaluación de sitios prioritarios para la restauración considerando la fragmentación ecosistémica y la erosión hídrica</i>	221
5.5.2	<i>Selección de métodos y estrategias de restauración adecuados para los sitios identificados</i>	222
5.5.3	<i>Implementación de prácticas de restauración ecológica en áreas fragilizadas</i>	222
5.5.4	<i>Monitoreo continuo de resultados de restauración y evaluación del impacto ambiental en ecosistemas fragmentados</i>	222
5.5.5	<i>Fomento de la biodiversidad y restauración de hábitats nativos en áreas fragmentadas</i>	223
5.5.6	<i>Participación comunitaria en programas de restauración y conservación en áreas de alto impacto de erosión</i>	223
5.5.7	<i>Utilización de técnicas de plantación y reforestación con especies nativas en zonas fragilizadas</i>	223
5.5.8	<i>Restauración de corredores ecológicos para la conexión de hábitats y la mitigación de la erosión</i>	224
5.5.9	<i>Diseño de prácticas de restauración adaptadas a la topografía, la hidromorfología del terreno y la erosión hídrica identificada</i>	224
5.5.10	<i>Monitoreo y evaluación periódica del progreso de la restauración y sus beneficios ecológicos</i>	225
5.6	Conclusiones y contribuciones a la conservación ambiental y políticas sostenibles	225
5.6.1	<i>Resumen de resultados y conclusiones generales</i>	225
5.6.2	<i>Evaluación de la influencia en políticas públicas para la conservación</i>	225
5.6.3	<i>Mejoramiento continuo del modelo RUSLE y prácticas de conservación</i>	226
5.6.4	<i>Divulgación científica y educación ambiental para la comunidad</i>	226
5.6.5	<i>Ventajas socioeconómicas derivadas de las prácticas de conservación</i>	227

5.6.6	<i>Ventajas ambientales resultantes de las prácticas de conservación</i>	227
5.6.7	<i>Consideraciones para la sostenibilidad y continuidad de las prácticas de conservación</i>	227
5.6.8	<i>Contribución a la biodiversidad y resiliencia del ecosistema local</i>	227
5.7.9	Potencial de replicación de estrategias de conservación en otras regiones.....	228
5.7.10	<i>Liderazgo en la conservación de microcuencas altoandinas y su impacto regional</i>	228

CAPÍTULO VI

6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	229
6.1	Conclusiones.....	229
6.2	Recomendaciones.....	230

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Dimensiones de las Cuencas Hidrográficas.....	21
Tabla 2-2: Tasas de erosión tolerable	48
Tabla 3-1: Características de los órdenes en la jerarquización de red fluvial	57
Tabla 3-2: Intervalos del coeficiente de compacidad.....	60
Tabla 3-3: Intervalos en la forma de la cuenca	61
Tabla 3-4: Clases de valores de masividad	62
Tabla 3-5: Clasificación del tipo de relieve en función de la pendiente media	63
Tabla 3-6: Clasificación de cauces fluviales según su evolución y características.....	64
Tabla 3-7: Características de la pendiente de un río	68
Tabla 3-8: Valores interpretativos de la densidad de drenaje	70
Tabla 3-9: Clases de tiempo de concentración.....	71
Tabla 3-10: Clasificación de la sinuosidad en una cuenca hidrográfica	72
Tabla 3-11: Clasificación de Regiones Latitudinales y Pisos Altitudinales según Altitud y Biotemperatura.....	77
Tabla 3-12: Relación entre evapotranspiración potencial y provincias de humedad	78
Tabla 3-13: Características de los suelos del Ecuador según la FAO	82
Tabla 3-14: Clasificación de Suelos según Textura y Composición.....	86
Tabla 3-15: Valores del Factor P para diferentes prácticas de conservación.....	96
Tabla 4-1: Resultados de los parámetros físicos de las microcuencas	101
Tabla 4-2: Resultados de los parámetros de forma de las microcuencas	102
Tabla 4-3: Resultados de los parámetros de altimetría de las microcuencas	105
Tabla 4-4: Resultados de los parámetros de relieve de las microcuencas.....	106
Tabla 4-5: Análisis de la curva hipsométrica y frecuencia de altimetrías en microcuenca del río Atillo.....	109
Tabla 4-6: Análisis de la curva hipsométrica y frecuencia de altimetrías en microcuenca del río Ozogoché.....	111
Tabla 4-7: Análisis de la curva hipsométrica y frecuencia de altimetrías en microcuenca del río Yasepan	113
Tabla 4-8: Parámetros de las características de red de drenaje	116
Tabla 4-9: Parámetros de la altimetría de los cuses principales.....	120
Tabla 4-10: Parámetros de la hidráulica de la red fluvial.	122
Tabla 4-11: Estadísticos de la precipitación media en la microcuenca de Ozogoché	132
Tabla 4-12: Estadísticos de la precipitación media en la microcuenca de Yasepan	136

Tabla 4-13: Estadísticos de la temperatura media en la microcuenca de Atillo	141
Tabla 4-14: Estadísticos de la temperatura media en la microcuenca de Ozogoche.....	145
Tabla 4-15: Estadísticos de la temperatura media en la microcuenca de Yasepan	149
Tabla 4-16: Componentes del diagrama de Holdridge de la microcuenca de Ozogoche.....	154
Tabla 4-17: Componentes del diagrama de Holdridge de la microcuenca de Yasepan	156
Tabla 4-18: Resultados multianuales del factor R en la microcuenca de Atillo	159
Tabla 4-19: Resultados multianuales del factor R en la microcuenca de Ozogoche	161
Tabla 4-20: Resultados multianuales del factor R en la microcuenca de Yasepan.....	162
Tabla 4-21: Resultados de la tabulación de datos de HWSD de características de los andosoles	167
Tabla 4-22: Resultados de la tabulación de datos de HWSD de características de los leptosoles	168
Tabla 4-23: Comparación entre características del suelo medidas en campo y estimadas por teledetección en diferentes estratos verticales.....	170
Tabla 4-24: Análisis estadístico del carbono orgánico determinado en campo y estimado a través de teledetección	174
Tabla 4-25: Características del suelo en el estrato (5-15) cm de la microcuenca de Atillo	176
Tabla 4-26: Características del suelo en el estrato (5-15) cm de la microcuenca de Ozogoche	177
Tabla 4-27: Características del suelo en el estrato (5-15) cm de la microcuenca de Yasepan.	178
Tabla 4-28: Clases texturales de suelos con base en las características físicas.....	183
Tabla 4-29: Competentes para la determinación del factor K de las microcuencas hidrográficas	184
Tabla 4-30: Estadísticos del factor L.S en las microcuencas de estudio.....	185
Tabla 4-31: Estadísticos del raster reclasificado del factor L.S en la microcuenca de Atillo ..	187
Tabla 4-32: Estadísticos del raster reclasificado del factor L.S en la microcuenca de Ozogoche	189
Tabla 4-33: Estadísticos multianuales del factor C en la microcuenca de Atillo.....	194
Tabla 4-34: Estadísticos multianuales del factor C en la microcuenca de Ozogoche.....	195
Tabla 4-35: Estadísticos multianuales del factor C en la microcuenca de Yasepan	196
Tabla 4-36: Resultados de la media multianual de la erosión potencial en las microcuencas de estudio.....	198
Tabla 4-37: Estadísticos de la erosión hídrica real multianual en las microcuencas de estudio	203
Tabla 4-38: Comparación de la media multianual de la erosión potencial con la erosión hídrica real.....	206

Tabla 4-39: Porcentaje de disminución de pérdida de suelo de la erosión real con respecto a la erosión potencial.....	207
Tabla 3-1: Características de los órdenes en la jerarquización de red fluvial	57
Tabla 3-2: Intervalos del coeficiente de compacidad.....	60
Tabla 3-3: Intervalos en la forma de la cuenca	61
Tabla 3-4: Clases de valores de masividad	62
Tabla 3-5: Clasificación del tipo de relieve en función de la pendiente media	63
Tabla 3-6: Clasificación de cauces fluviales según su evolución y características.....	64
Tabla 3-7: Características de la pendiente de un río	68
Tabla 3-8: Valores interpretativos de la densidad de drenaje	70
Tabla 3-9: Clases de tiempo de concentración.....	71
Tabla 3-10: Clasificación de la sinuosidad en una cuenca hidrográfica	72
Tabla 3-11: Clasificación de Regiones Latitudinales y Pisos Altitudinales según Altitud y Biotemperatura.....	77
Tabla 3-12: Relación entre evapotranspiración potencial y provincias de humedad	78
Tabla 3-13: Características de los suelos del Ecuador según la FAO.....	82
Tabla 3-14: Clasificación de Suelos según Textura y Composición.....	86
Tabla 3-15: Valores del Factor P para diferentes prácticas de conservación.....	96
Tabla 4-1: Resultados de los parámetros físicos de las microcuencas.....	101
Tabla 4-2: Resultados de los parámetros de forma de las microcuencas	102
Tabla 4-3: Resultados de los parámetros de altimetría de las microcuencas	105
Tabla 4-4: Resultados de los parámetros de relieve de las microcuencas.....	106
Tabla 4-5: Análisis de la curva hipsométrica y frecuencia de altimetrías en microcuenca del río Atillo	109
Tabla 4-6: Análisis de la curva hipsométrica y frecuencia de altimetrías en microcuenca del río Ozogoche	111
Tabla 4-7: Análisis de la curva hipsométrica y frecuencia de altimetrías en microcuenca del río Yasepan.....	113
Tabla 4-8: Parámetros de las características de red de drenaje	116
Tabla 4-9: Parámetros de la altimetría de los cuses principales.....	120
Tabla 4-10: Parámetros de la hidráulica de la red fluvial.	122
Tabla 4-11: Estadísticos de la precipitación media en la microcuenca de Ozogoche	132
Tabla 4-12: Estadísticos de la precipitación media en la microcuenca de Yasepan	136
Tabla 4-13: Estadísticos de la temperatura media en la microcuenca de Atillo	141
Tabla 4-14: Estadísticos de la temperatura media en la microcuenca de Ozogoche.....	145

Tabla 4-15: Estadísticos de la temperatura media en la microcuenca de Yasepan	149
Tabla 4-16: Componentes del diagrama de Holdridge de la microcuenca de Ozogoche.....	154
Tabla 4-17: Componentes del diagrama de Holdridge de la microcuenca de Yasepan	156
Tabla 4-18: Resultados multianuales del factor R en la microcuenca de Atillo	159
Tabla 4-19: Resultados multianuales del factor R en la microcuenca de Ozogoche	161
Tabla 4-20: Resultados multianuales del factor R en la microcuenca de Yasepan.....	162
Tabla 4-21: Resultados de la tabulación de datos de HWSD de características de los andosoles	167
Tabla 4-22: Resultados de la tabulación de datos de HWSD de características de los leptosoles	168
Tabla 4-23: Comparación entre características del suelo medidas en campo y estimadas por teledetección en diferentes estratos verticales.....	170
Tabla 4-24: Análisis estadístico del carbono orgánico determinado en campo y estimado a través de teledetección.....	174
Tabla 4-25: Características del suelo en el estrato (5-15) cm de la microcuenca de Atillo	176
Tabla 4-26: Características del suelo en el estrato (5-15) cm de la microcuenca de Ozogoche	177
Tabla 4-27: Características del suelo en el estrato (5-15) cm de la microcuenca de Yasepan	178
Tabla 4-28: Clases texturales de suelos con base en las características físicas.....	183
Tabla 4-29: Competentes para la determinación del factor K de las microcuencas hidrográficas	184
Tabla 4-30: Estadísticos del factor L.S en las microcuencas de estudio.....	185
Tabla 4-31: Estadísticos del raster reclasificado del factor L.S en la microcuenca de Atillo ..	187
Tabla 4-32: Estadísticos del raster reclasificado del factor L.S en la microcuenca de Ozogoche	189
Tabla 4-33: Estadísticos multianuales del factor C en la microcuenca de Atillo.....	194
Tabla 4-34: Estadísticos multianuales del factor C en la microcuenca de Ozogoche	195
Tabla 4-35: Estadísticos multianuales del factor C en la microcuenca de Yasepan	196
Tabla 4-36: Resultados de la media multianual de la erosión potencial en las microcuencas de estudio	198
Tabla 4-37: Estadísticos de la erosión hídrica real multianual en las microcuencas de estudio	203
Tabla 4-38: Comparación de la media multianual de la erosión potencial con la erosión hídrica real.....	206
Tabla 4-39: Porcentaje de disminución de pérdida de suelo de la erosión real con respecto a la erosión potencial	207

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Problema de la erosión en el aspecto socioeconómico y ambiental.....	9
Ilustración 2-2: Distribucion de los cursos en una cuenca hidrografica	23
Ilustración 2-3: Elementos del sistema de drenaje	24
Ilustración 2-4: Distribución de la red hidrográfica en una cuenca.....	28
Ilustración 2-5: Delimitacion del sistema de parteaguas	28
Ilustración 2-6: Tipo de cuases acorde a su sinuosidad.....	37
Ilustración 2-7: Esquema de distribucion de climas por zonas latitudinales	40
Ilustración 2-8: Distribución de los pisos altitudinales en función de la altura.....	41
Ilustración 2-9: Tipos de erosión hídrica.....	44
Ilustración 2-10: Transporte de las partículas de suelo desprendidas	46
Ilustración 3-1: Ubicación de las microcuencas de estudio.....	54
Ilustración 3-2: Algoritmo para corregir el Modelo de elevación	55
Ilustración 3-3: Algoritmo para crear los insumos de la red de cauces	55
Ilustración 3-4: Algoritmo para crear la red de drenaje	56
Ilustración 3-5: Grafica de red de drenaje según Horton- Strahler.....	57
Ilustración 3-6: Algoritmo para determinar los parámetros físicos de una cuenca hidrográfica.....	58
Ilustración 3-7: Grafica de relación entre morfología y caudal de precipitación	60
Ilustración 3-8: Representación gráfica de la curva hipsométrica.....	64
Ilustración 3-9: Distribución altitudinal de la curva hipsométrica	65
Ilustración 3-10: Algoritmo para determinar las características de la red de drenaje	67
Ilustración 3-11: Representación de la sinuosidad de una cuenca hidrográfica	71
Ilustración 3-12: Algoritmo para determinar las características de la red de drenaje	73
Ilustración 3-13: Algoritmo para determinar las características de la red de drenaje	74
Ilustración 3-14: Diagrama de Holdridge para la clasificación de formas vida	77
Ilustración 3-16: Algoritmo para determinar el factor K.....	81
Ilustración 3-17: Taxonomía de suelos del Mundo	82
Ilustración 3-19: Algoritmo para obtener los datos de textura y carbono orgánico de HWSD.	85
Ilustración 3-20: Diagrama del Triángulo para identificación de la textura del suelo	86
Ilustración 3-22: Algoritmo para determinación del Factor C	92
Ilustración 3-23: Algoritmo para determinación del Factor P.....	96
Ilustración 4-1: Curva hipsométrica de la microcuenca de Atillo	110
Ilustración 4-2: Curva hipsométrica de la microcuenca de Ozogoche	112
Ilustración 4-3: Curva hipsométrica de la microcuenca de Yasepan.....	114

Ilustración 4-4: Perfil longitudinal del río Atillo.....	117
Ilustración 4-5: Perfil longitudinal del río Ozogoche.....	118
Ilustración 4-6: Perfil longitudinal del río Yasepan	119
Ilustración 4-7: Histograma de la distribución de precipitación media histórica de la microcuenca de Atillo.....	127
Ilustración 4-8: Diagrama de caja y bigotes de precipitación media histórica de la microcuenca de Atillo	129
Ilustración 4-9: Histograma de la distribución de precipitación media histórica de la microcuenca de Ozohoche	130
Ilustración 4-10: Diagrama de caja y bigotes de precipitación media histórica de la microcuenca de Ozogoche.....	133
Ilustración 4-11: Histograma de la distribución de precipitación media histórica de la microcuenca de Ozogoche.....	135
Ilustración 4-12: Diagrama de caja y bigotes de precipitación media histórica de la microcuenca de Yasepan	137
Ilustración 4-13: Diagrama de caja y bigotes de la precipitación media global de las microcuencas	138
Ilustración 4-14: Histograma de la distribución de temperatura media histórica de la microcuenca de Atillo	140
Ilustración 4-15: Diagrama de caja y bigotes de temperatura media histórica de la microcuenca de Atillo.....	142
Ilustración 4-16: Histograma de la distribución de temperatura media histórica de la microcuenca de Ozogoche.....	143
Ilustración 4-17: Diagrama de caja y bigotes de temperatura media histórica de la microcuenca de Yasepan	146
Ilustración 4-18: Histograma de la distribución de temperatura media histórica de la microcuenca de Yasepan.....	147
Ilustración 4-19: Diagrama de caja y bigotes de temperatura media histórica de la microcuenca de Yasepa	150
Ilustración 4-20: Diagrama de caja y bigotes de la temperatura media global de las microcuencas	151
Ilustración 4-21: Diagrama de Holdridge de la microcuenca de Atillo.....	153
Ilustración 4-22: Diagrama de Holdridge de la microcuenca de Ozogoche.....	155
Ilustración 4-23: Diagrama de Holdridge de la microcuenca de Yasepan	157
Ilustración 4-24: Histograma de las medias multianuales del factor R en las microcuencas de estudio	164

Ilustración 4-25: Histograma de los rangos interanuales del factor R en las microcuencas de estudio	165
Ilustración 4-26: Grafico de dispersión de los datos de carbono orgánico determinado en campo y estimado por teledetección	172
Ilustración 4-27: Triángulo de textura de los suelos de la microcuenca de Atillo	179
Ilustración 4-28: Triángulo de textura de los suelos de la microcuenca de Ozogoche.....	180
Ilustración 4-29: Triángulo de textura de los suelos de la microcuenca de Yasepan	181
Ilustración 4-30: Histograma de la erosión potencial media multianual en las microcuencas de estudio	200
Ilustración 4-31: Histograma de la erosión hídrica real media multianual en las microcuencas de estudio	206

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** RASTERS DEL FACTOR C DE LA MICROCUENCA DE ATILLO EN LOS AÑOS 2016 - 2021
- ANEXO B:** RASTERS DEL FACTOR C DE LA MICROCUENCA DE OZOGOCHÉ EN LOS AÑOS 2018 – 2021
- ANEXO C:** RASTERS DEL FACTOR C DE LA MICROCUENCA DE YASEPAN EN LOS AÑOS 2018 – 2020
- ANEXO D:** EROSIÓN POTENCIAL MULTIANUAL DE LA MICROCUENCA DE ATILLO
- ANEXO E:** EROSIÓN POTENCIAL MULTIANUAL DE LA MICROCUENCA DE OZOGOCHÉ
- ANEXO F:** EROSIÓN POTENCIAL MULTIANUAL DE LA MICROCUENCA DE YASEPAN

RESUMEN

La erosión hídrica, en las microcuencas de Atillo, Ozogoché y Yasepan de la región interandina del Ecuador, representa una preocupación fundamental en la conservación y uso sostenible de los recursos terrestres. El objetivo de esta investigación fue la modelación de la erosión potencial desde el año 2002 hasta el año 2021 a través de la caracterización morfológica y climatológica de tres microcuencas altoandinas. La metodología implementada comprendió la corrección y depuración del Modelo de Elevación Digital (DEM), el análisis de la red hidrográfica, la estimación de parámetros geomorfológicos e hidromorfológicos y su comportamiento bioclimático. Para la cuantificación de la erosión hídrica, se calculó los factores del Modelo RUSLE considerando la determinación de los factores de: erosividad (R) y erodabilidad (K.L.S.C) que comprende los factores de: la estructura y taxonomía de los suelos (K), longitud y grado de pendiente (L.S), y presencia de vegetación (C). La pérdida de suelo acumulada de los veinte años, establecida como erosión potencial, para Atillo fue de 962, $t \times ha^{-1} \times año^{-1}$, Ozogoché 756,95 $t \times ha^{-1} \times año^{-1}$ y de 938,88 $t \times ha^{-1} \times año^{-1}$ para Yasepan. En el análisis comparativo de la erosión potencial y la erosión hídrica correspondiente al periodo 2016 -2021, demuestra una reducción promedio del 95% para las tres microcuencas bajo la incidencia del factor (C). Concluyendo que la dinámica hidrológica cuantificada y cualificada mediante parámetros morfológicos, climatológicos y la estimación de erosión potencial, determinan mayor susceptibilidad a procesos erosivos en las microcuencas de Atillo > Yasepan > Ozogoché respectivamente; siendo importante la integración de medidas de adaptación y mitigación como: la implementación de terrazas de escorrentía, prácticas agrícolas sostenibles y ganadería responsable que garanticen la conservación de la vegetación endémica de cada ecosistema.

Palabras clave: <DEGRADACIÓN DEL SUELO>, <GEOMORFOLOGÍA>, <HIDROMORFOLOGIA>, <EROSIÓN POTENCIAL>, <MODELACIÓN>.

2216-DBRA-UPT-2023



ABSTRACT

Water erosion of micro-watersheds at Atillo in Ecuador's highlands, Ozogoche and Yasepan, represents a fundamental concern in the conservation and sustainable use of terrestrial resources. The objective of this research was the modeling of potential erosion from 2002 to 2021 through the morphological and climatological characterization of three micro-watersheds of the highlands. The methodology implemented included the correction and debugging of the Digital Elevation Model (DEM), the analysis of the hydrographic network, the estimation of geomorphological and hydromorphological parameters and their bioclimatic behavior. For the quantification of water erosion, the factors of the USLE Model were calculated considering the determination of the factors: erosivity (E) and erodibility (K.L.S.C) which includes the factors of soil structure and taxonomy (K), length and degree of slope (L.S), and presence of vegetation (C). The accumulated soil loss in twenty years, established as potential erosion, for Atillo was 962, t x ha-1 x year-1; Ozogoche 756.95 t x ha-1 x year-1; and 938.88 t x ha-1 x year-1 for Yasepan. The comparative analysis of potential erosion and water erosion corresponding to the period 2016 -2021 shows an average reduction of 95% for the three micro-watersheds under the incidence of factor (C). Concluding that the quantified and qualified hydrological dynamics, through morphological, climatological parameters and the estimation of potential erosion; determine greater susceptibility to erosive processes at Atillo > Yasepan > Ozogoche micro-watersheds respectively. It is important the integration of adaptation and mitigation measures such as the implementation of runoff terraces, sustainable agricultural practices and responsible livestock, which guarantees the conservation of the endemic vegetation of each ecosystem.

Keywords:<SOIL DEGRADATION>, <GEOMORPHOLOGY>, <HYDROMORPHOLOGY>, <POTENTIAL EROSION>, <MODELATION>.

2216-DBRA-UPT-2023



Ing. Romel Francisco Calles Jiménez.

0603877713

INTRODUCCIÓN

La región sur oriental de la provincia de Chimborazo alberga un conjunto de microcuencas altoandinas que desempeñan un papel crucial en el equilibrio ecológico y la provisión de recursos hídricos en la zona. Estas microcuencas, que incluyen los ríos Atillo, Ozogoche y Yasepán, se caracterizan por su excepcional biodiversidad, su influencia en la calidad del suelo y el agua, y su capacidad para actuar como reguladores ambientales (MAGAP 2013). No obstante, se encuentran amenazadas por una serie de desafíos derivados de la interacción humana y los cambios en el uso de la tierra. El entorno altoandino de la provincia de Chimborazo alberga un patrimonio ecológico y ambiental de gran magnitud. Estas microcuencas son esenciales para el ciclo hidrológico regional, contribuyendo de manera significativa al abastecimiento de agua dulce y a la estabilidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres circundantes (PDYOT Parroquia Cebadas, 2019, p. 319). Sin embargo, el crecimiento demográfico, así como la expansión de las actividades humanas están generando desafíos críticos que amenazan la integridad de estas microcuencas y por tanto a los servicios ecosistémicos que brindan.

Uno de los factores predominantes que comprometen la sostenibilidad de estas microcuencas es la modificación en el uso del suelo. Aunque la expansión de la agricultura, la deforestación y la urbanización son agentes de cambio significativos en el paisaje, resulta fundamental destacar que, en este contexto particular, la presión más notable proviene de actividades ganaderas y de pastoreo (Palacios et al., 2016, p. 53). La población local depende en gran medida de la vegetación de las cuencas, ubicada en los valles o llanuras aluviales circundantes de los ríos, para alimentar a su ganado. Este pastoreo ejerce un impacto considerable en los ecosistemas locales, con efectos directos en la calidad del suelo y del agua, así como en la biodiversidad que habita en estos entornos naturales.

Con el fin de abordar de manera efectiva los desafíos relacionados con la erosión potencial en estas microcuencas, es esencial llevar a cabo una evaluación exhaustiva de su calidad ecológica. Esta evaluación implica el análisis de cambios en el uso de la tierra, la evaluación de la calidad del suelo y un estudio detallado de las características bióticas y abióticas de la región (Palacios et al., 2016, p. 53). Al obtener una comprensión completa de la situación actual de estas microcuencas, se podrá identificar de manera precisa las áreas críticas donde el riesgo de erosión potencial es alto, las oportunidades para la conservación y el uso sustentable de los recursos naturales.

El análisis de las características del suelo en las microcuencas altoandinas de los ríos Atillo, Ozogoche y Yasepán se posiciona como un componente esencial en la comprensión de la

situación presente y en la formulación de estrategias de conservación. Este estudio engloba aspectos críticos relacionados con la calidad del suelo, su interacción con la dinámica del agua y la salud general de los ecosistemas en estas regiones, atribuyendo un valor de suma relevancia a las áreas ribereñas en diversas escalas. Desde una perspectiva tanto social como científica, la preservación de estos espacios naturales emerge como un imperativo de vital importancia, dada su naturaleza como reservorios fundamentales para la regulación del dióxido de carbono en el contexto del cambio climático (Montatixe & Eche, 2021, p. 13).

En este contexto, la presente investigación se orienta hacia la evaluación integral de los procesos erosivos y morfología de las microcuencas mencionadas, empleando una metodología interdisciplinaria que incluye la corrección de modelos digitales de elevación, el análisis de morfometrías, y la estimación de la erosión hídrica del suelo. A través de esta aproximación, se pretende obtener una visión detallada y precisa de la salud de estos ecosistemas, proporcionando así la base necesaria para la formulación de políticas de conservación y el fomento de prácticas de manejo sostenible en estas regiones de estudio.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La erosión del suelo es un problema global que afecta a muchas partes del mundo. Este fenómeno ocurre cuando el suelo es desplazado por agentes como el agua o el viento, lo que puede tener graves consecuencias para la agricultura, la biodiversidad y la calidad del agua. Así también, puede provocar la pérdida de nutrientes y materia orgánica en el suelo, lo que reduce su capacidad para sostener la vida vegetal. Además, puede aumentar el riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra al alterar el curso natural del agua.

La erosión del suelo conduce a la fragmentación, degradación y pérdida significativa de los ecosistemas y por consiguiente a la disminución o desaparición de la biodiversidad dentro del área de influencia, causando impactos ecológicos, amplificando el riesgo hidrológico, lo que puede ocasionar riesgos movimientos de masas de tierra, desplazamientos y deslaves de terreno, así como posibles inundaciones desde las zonas altas de las microcuencas. En cuanto al impacto social, puede ser causal de daños en la infraestructura en zonas de asentamientos humanos, y producir el desplazamiento de la población humana por migraciones, debido a que el suelo es el principal recurso de desarrollo económico del hombre.

Un suelo erosionado carece de nutrientes necesarios para los cultivos, lo que puede disminuir la calidad de los productos, lo que puede generar una disminución del suministro de agua por la pérdida de afluentes o canales donde se precipita el agua antes de distribuirse en la red hidrográfica de las cuencas. Por lo tanto, la erosión del suelo de las cuencas hidrográficas no solamente presenta impactos ambientales, sino también problemas sociales y económicos.

Actualmente, la gestión sostenible de las microcuencas del Rio Atillo, Ozogoché, Yasepan en la provincia de Chimborazo es limitada debido a los escasos estudios de caracterización física y geomorfológica de las microcuencas, y también por otros factores como la accesibilidad y los costos que implican la evaluación del deterioro del recurso suelo a causa de la erosión. Esta situación es preocupante ya que estas microcuencas se encuentran ubicadas en la zona altoandina del Ecuador, donde se ubican los páramos, un ecosistema de alta montaña único en el mundo, que es particularmente vulnerable a la erosión del suelo debido a las condiciones topográficas y climáticas extremas.

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) la erosión puede reducirse en gran medida en casi todos los contextos con prácticas de gestión sostenible del recurso suelo, Analizando varios factores que desencadenen el desgaste y degradación de el mismo. Por lo tanto, es necesario contar con estudios que analicen este tipo de problemas como lo es la erosión, porque con ello se puede realizar planes de manejo para el uso sostenible del suelo en el área de las microcuencas, para prevenir y atenuar los impactos generados por la erosión del suelo protegiendo así el ecosistema de los páramos

La ONU ha identificado que la erosión del suelo puede ser reducida significativamente en casi todos los contextos mediante la implementación de prácticas de gestión sostenible del recurso suelo. Para ello, es necesario llevar a cabo estudios detallados que analicen los factores que desencadenan la degradación y el desgaste del suelo, especialmente en zonas altoandinas y páramos, llevando a cabo estudios de caracterización de las microcuencas, lo que permite la evaluación del deterioro del suelo debido a la erosión y la implementación de planes de manejo para el uso sostenible del suelo en la zona, con el fin de prevenir y atenuar los impactos generados por la erosión del suelo para proteger así los valiosos ecosistemas de páramo.

1.2 Justificación

La investigación permitirá realizar un levantamiento de información de las características morfométricas y el grado de erosión potencial de las microcuencas del río: Atillo, Ozogoche y Yasepan, con el fin de generar información que ayude a predecir las condiciones y estado de del recurso suelo e las microcuencas con un enfoque a la gestión del recurso y la creación de políticas públicas que aseguren el uso sustentable del recurso.

Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia Cebadas, lugar donde se sitúan las microcuencas los ríos: Atillo, Ozogoche y Yasepan, se estima oferta hídrica de la Subcuenca del río Cebadas. Esto en función de una proyección a futuro con datos del INEC, obteniendo el lugar de desembocadura de los ríos de las microcuencas altas en cuestión con un caudal aproximado de 19,3 m³/seg. Estos resultados comparados con los datos de dotación de agua para el consumo se consideran altos, por tanto, se cree tener disponibilidad de agua para consumo humano para las generaciones futuras de la parroquia Cebadas.

Sin embargo, análisis basados en únicamente en el crecimiento poblacional, los datos de estaciones hidrometeorológicas y la captación directa en puntos de monitoreo, no permiten tener un conocimiento certero de los caudales de los ríos, estiajes y condiciones climáticas para la

planificación del agua (PDYOT Parroquia Cebadas 2019, p. 320). Por lo tanto, es pertinente realizar un estudio completo donde se considere factores que incluyen: factores climatológicos, hidrológicos, hidrográficos, geológicos, topográficos, y edáficos.

En cuanto al tipo de uso del suelo en la parroquia de cebadas se encuentran constituida por paramos, pastizales, cultivos, bosques y viviendas (MAGAP 2013). Entre las principales actividades que se realiza en la parroquia destacan: actividades agrícolas, pecuarias o forestales, que resultan ser amenazas a los sistemas hídricos y generan conflictos de uso de suelo y páramo pues la frontera agrícola ha superado su límite.

El desconocimiento de normativas que limitan el uso del suelo en función de la altitud, la máxima explotación de los recursos naturales, el crecimiento de la población que obliga a parcelar el suelo, los niveles de pobreza y falta de educación orientada al manejo racional y sostenible de los recursos naturales; atentan con degradar el ecosistema. Además, las comunidades Tablillas, Queseraloma y Millmahuanchi se dedican principalmente a actividades de pastoreo en lugares cercanos a fuentes de agua y cauces naturales.

Esto provoca la contaminación del agua y la compactación del suelo, por tanto, disminuye su capacidad de retención. La mayoría de los agricultores realizan actividades en las zonas de producción contaminando el agua, por el uso de agroquímicos que son arrastrados por el riego y las precipitaciones, además por el lavado de bombas de fumigación en canales (PDYOT Parroquia Cebadas 2019, p. 111).

El levantamiento de información geoespacial tiene el propósito práctico de determinar las condiciones de la red de drenaje de las cuencas y evaluar la tendencia a darse crecidas por la acumulación de flujo en los ríos y procesos erosivos por el desgaste o lavado de los suelos función de las pendientes, altimetría, topografía, precipitaciones y área acumulada del flujo (PDYOT Parroquia Cebadas, 2019, p. 319). Con lo antes dicho, se podrá evaluar los factores que contribuyan a la degradación hídrica y edáfica del recurso suelo para plantear medidas preventivas y correctivas adecuadas al uso sostenible de suelo y localizar posibles riesgos geomórficos en la zona de estudio (Alcántara & Goudie, 2010, p. 15).

Esta investigación será supervisada por el Grupo de Investigación para la sostenibilidad de cuencas hidrográficas (GISOCH) que contará con los parámetros y métodos establecidos en el marco profesional de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ciencias Químicas, Carrera de Ingeniería Ambiental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Estimar el nivel de erosión potencial en las microcuencas del río Atillo, Ozogoché y Yasepan en la zona sur oriental de la Provincia de Chimborazo a través de la caracterización morfológica y modelación empírica.

1.3.2 Objetivo específicos

- Caracterizar cuantitativamente las condiciones geomorfológicas e hidromorfológicas asociadas a las tres microcuencas a partir de la estimación y la comparación de sus parámetros.
- Medir el grado de erosión potencial promedio anual y erosión hídrica real de cada unidad hidrográfica mediante el modelo R.U.S.L.E.
- Establecer medidas preventivas y correctivas al uso de suelo en las zonas con mayor susceptibilidad a ser erosionadas para la gestión, disposición y aprovechamiento sustentable del recurso suelo.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

La Provincia de Chimborazo cuenta con varios estudios de erosión del suelo, en los páramos altoandinos. En la microcuenca del río Guapán se ha podido detectar que la principal causa de la erosión en el suelo puede ser causado las prácticas agrícolas inadecuadas (Palacios, López y Gil 2016, p. 71). En la microcuenca del río Chanchán también en la Provincia de Chimborazo, se utilizó el modelo RUSLE para estimar el nivel de erosión del suelo, identificando una influencia de la pendiente y el uso del suelo (Chitalogro y Llamatumbi, 2021, p. 11) .

Para entender mejor las condiciones que contribuyen a la erosión y diseñar planes de manejo del suelo efectivo, se pueden utilizar productos satelitales y técnicas de análisis geoespacial. Así también, el análisis de la cartografía base existente, análisis topográfico y análisis de la calidad del suelo (Hartman, Bookhagen y Chadwick 2016, p. 762). Estos datos son fundamentales para establecer medidas preventivas y correctivas en zonas propensas a la erosión (Gallardo et al. 2013, p. 270). Con lo cual es posible brindar información necesaria para la implementación de prácticas agrícolas sostenibles, siembra de cultivos de cobertura y técnicas de conservación del suelo. Estas medidas contribuyen a reducir la erosión del suelo y proteger el ecosistema del páramo en la zona sur oriental de la Provincia de Chimborazo.

En las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan no hay estudios específicos sobre la erosión del suelo, lo que dificulta la aplicación de medidas efectivas de prevención y corrección en esta zona. Por tanto, aplicar técnicas como el modelo RUSLE, la caracterización morfológica y métodos como el de la cobertura vegetal para evaluar el grado de erosión, puede ser de suma importancia. La información detallada de estas microcuencas permitiría identificar las zonas más susceptibles a la erosión y establecer medidas para su gestión sostenible. También es importante considerar la relación entre los factores ambientales y antropogénicos en los procesos de erosión del suelo.

Según Oñate & Valdivieso et al. (2021, p.3), el umbral de escorrentía geomorfológica representa el límite entre los procesos que tienen lugar en el canal y la llanura de inundación. La geometría del ribete está altamente correlacionada con el área de drenaje, lo que permite establecer relaciones

regionales de geometría de ribera que tienen amplia aplicación en restauración de canales, estudios de degradación de cauces, dimensionamiento de infraestructura.

Por otro lado, la caracterización morfológica ha sido utilizada en diferentes estudios para la planificación ambiental y territorial, así como en la evaluación de procesos erosivos y la gestión del agua. La integración de datos geomorfológicos es fundamental para tomar decisiones informadas y aplicar prácticas de manejo adecuadas para la conservación del suelo y la protección del ecosistema (Montatixe y Eche 2021, p. 2). Estudios presentan una caracterización geomorfológica como información fundamental para la planificación ambiental y territorial (Furrier, 2018, p.2).

La integración de datos resulta importante para la planificación ambiental y territorial, debido a que existen muchas regiones en lugares inaccesibles con escasos datos de uso de suelo, características de suelo e información climatológica. Además, existen otras metodologías que pueden ser útiles para entender mejor el problema de la erosión hídrica en estas microcuencas y generar soluciones más efectivas (Chen et al. 2019, p. 8). El modelo RUSLE que es una herramienta comúnmente utilizada para medir el grado de erosión hídrica. Se han realizado varios estudios en diferentes partes del mundo que han utilizado esta herramienta para evaluar la erosión del suelo y su relación con las prácticas de uso de la tierra (González et al. 2007, p. 400).

A pesar de la falta de estudios específicos sobre la erosión del suelo en las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan, se han desarrollado algunas medidas preventivas y correctivas para mitigar este problema en otras zonas de la región andina. Por ejemplo, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles, como la rotación de cultivos, la siembra de cultivos de cobertura y la construcción de terrazas, ha demostrado ser efectiva para reducir la erosión del suelo en otras partes de la región andina (Castro, 2013, p. 5).

2.2 Referencias teóricas

2.2.1 Efectos causas y consecuencias de la erosión hídrica

La erosión hídrica es un proceso complejo, multicausal, dinámico, de tipo episódico y sujeto a un conjunto de causas que ocurren en el ámbito de una cuenca hidrográfica (Cisneros et al. 2012, p. 66). La complejidad del proceso deriva de que puede ser visto a diferentes escalas de tiempo y espacio. En la escala temporal el proceso se da por eventos, es decir en forma episódica, con un grado de probabilidad determinado por el comportamiento del factor climático y la ocurrencia de tormentas

de alta energía, coincidentes con momentos de alta susceptibilidad del suelo y relieve a la ocurrencia del fenómeno.

En una escala de tiempo mayor la paulatina pérdida de suelo genera efectos de retroalimentación en la erosión a través de la pérdida de horizontes de suelo de mayor resistencia, lo cual hace que el proceso no sea lineal en el tiempo, sino que frecuentemente es acelerado en el tiempo (Arnáez 2014, p. 232). Es el caso de la erosión de laderas de montaña, en la cual a medida que se pierde el suelo sobre la roca, se incrementan las tasas de escorrentía y por lo tanto se acelera la pérdida de suelo en un ciclo de retroalimentación positiva, hasta que el suelo desaparece por completo y queda la roca expuesta (Cisneros et al. 2012, p. 66).

Otro ejemplo, es la retroalimentación que ocurre con la erosión en cárcavas, que van creciendo en profundidad, en ancho y en ramificaciones, a medida que el proceso avanza. En la escala espacial la erosión puede ser considerada a escala de lote o parcela, en la cual se pueden analizar las formas más elementales de erosión: salpicadura, mantiforme y en surcos (Arnáez 2014, p. 232). A esta escala es posible controlar estos procesos erosivos básicos mediante la aplicación de técnicas. En una escala de cuenca pueden visualizarse otros procesos erosivos como cárcavas y erosión de márgenes de ríos y arroyos, y es necesario considerar una visión más amplia del problema, no registrable sólo a escala de lote (Cisneros et al. 2012, p. 66). La resolución de estos procesos requiere una mayor participación de los involucrados en la cuenca, como así también del conjunto de decisores con incumbencia en el ámbito de la cuenca (poblaciones, organismos públicos, consorcios, etc.)

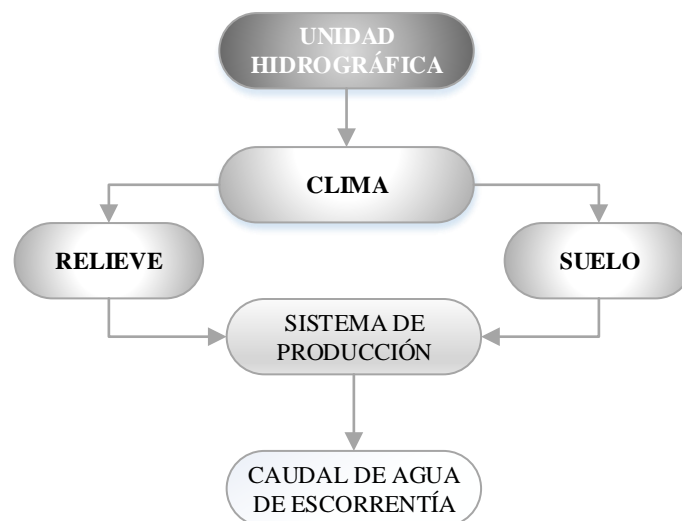


Ilustración 2-1: Problema de la erosión en el aspecto socioeconómico y ambiental

Fuente: (Cisneros et al. 2012, p. 66)

2.2.2 Cuencas hidrográficas en zona altoandina del Ecuador

La Cordillera de Los Andes atraviesa el continente sudamericano de norte a sur, es considerada como una zona con alta heterogeneidad ambiental y amplia diversidad biológica (Villamarín, Prat y Rieradevall 2014, p. 1073). La elevada altitud y complejidad fisiográfica de esta cadena montañosa influye en la circulación del aire y condicionan el clima, influenciando de forma importante los regímenes hidrológicos de sus ríos. Estas particularidades de la zona andina explican la complejidad ecosistémica existente.

Con respecto a los ecosistemas fluviales, si bien los estudios que se han realizado para caracterizar las cuencas hídricas ecuatorianas son escasos, los datos publicados indican que los ríos altoandinos son muy variables. Además, muestran fluctuaciones importantes en sus características físicas y químicas, caudal, temperatura, oxígeno disuelto, y pH, tanto a nivel espacial como temporal, incluyendo la fluctuación diaria extrema en algunos de ellos (CEPAL 2013, p. 44). El fuerte gradiente altitudinal de las cuencas hídricas del Ecuador se ha señalado como el factor más importante y determinante de la variabilidad de las características físicas y químicas de los ríos altoandinos. Se ha insistido especialmente en la importante disminución de la concentración de oxígeno y de la temperatura a medida que aumenta la altitud (Villamarín, Prat y Rieradevall 2014, p. 1073).

2.2.3 Ecosistemas en zonas altoandinas del Ecuador

Los páramos son una bioregión de las altas montañas tropicales (Los Andes y la alta montaña centroamericana) que se caracteriza por una baja temperatura, pronunciadas variaciones climáticas durante el día y humedad relativa superior al 80% durante todo el año. Los suelos de los páramos son usualmente ricos en materia orgánica y tienen alta capacidad de almacenamiento de agua. (Báez et al. 2010). La matriz vegetal del páramo es generalmente un pajonal sobre el cual se desarrollan comunidades relativamente complejas de plantas con forma de roseta, arbustos y bambúes, así como anegados cojines de musgos o de plantas vasculares (Báez et al. 2010).

La mayoría de la extensión del páramo está determinada por una alta humedad. Los páramos se caracterizan por su gran diversidad de fuentes de agua dulce que provienen de los glaciares, ríos, lagos y otros que emergen del subsuelo. Esta alta concentración de humedad hace que este bioma esté compuesto casi en su totalidad por pastizales húmedos y pantanos, exceptuando los páramos que por microclimas particulares son algo más secos (PDYOT Parroquia Cebadas, 2019, p. 319)

En las zonas altoandinas del Ecuador se encuentran diferentes tipos de ecosistemas distribuidos en las zona norte, sur y centro de la Cordillera Oriental de los Andes y en la zona páramo que se encuentran en las zonas de Cebadas, Achupallas y Alausí. Es importante que estos ecosistemas sean manejados y conservados adecuadamente ya que son el hogar de especies de flora y fauna nativas y/o endémicas y almacenan altas cantidades de carbono. Esto se debe a su elevada capacidad para retener la materia orgánica en el suelo debido a las condiciones edafoclimáticas que limitan la descomposición de los compuestos orgánicos. Están los páramos húmedos de origen glaciar y bosques montanos siempreverdes (Zurita et al., 2020).

- **Herbazal inundable montano alto y montano alto superior de páramo**

Es un humedal de altura que se encuentra en altitudes de 3.300 hasta 4.500 m.s.n.m. Se considera un ecosistema azonal en el que las condiciones edáficas o microclimáticas locales tienen más influencia sobre la vegetación que los factores climáticos o la altitud. Los bofedales son praderas nativas poco extensas con permanente humedad y se caracterizan por tener una cobertura herbácea de humedal (Zurita, Velasco y Lisintuña 2020). Estos ecosistemas se encuentran en relieves de montaña tipo valles glaciares y son inundables. Existe presencia de ciénagas, turberas o pantanos, su suelo se caracteriza por tener condiciones anaeróbicas que inhiben la descomposición de materia orgánica, y por lo tanto promueven la formación de suelo con porcentajes de carbono orgánico de hasta el 50% (PDYOT Parroquia Cebadas, 2019, p. 319).

- **Herbazal montano alto y montano alto superior de páramo**

Este ecosistema se refiere a una vegetación herbácea que se encuentra en altitudes elevadas, específicamente entre 2850 y 3900 m en la zona sur del país, se caracteriza por tener un bioclima pluvial y un relieve montañoso. Siendo uno de los ecosistemas más extensos de Ecuador y juega un papel importante en la regulación hídrica (Zurita, Velasco y Lisintuña 2020). En términos de suelo, el Herbazal montano alto y montano alto superior de páramo se encuentra en suelos Andisoles, que se caracterizan por tener un horizonte A muy marcado y una alta concentración de materia orgánica, alcanzando hasta 60 kg de Carbono/m². Estos suelos también tienen alta humedad y gran capacidad para retener agua por unidad de volumen (PDYOT Parroquia Cebadas, 2019, p. 319).

- **Arbustal siempreverde montano alto superior y subnival de páramo**

El Arbustal siempreverde montano alto superior y subnival de páramo se refiere a un ecosistema ubicado en el Páramo de almohadillas. Este ecosistema presenta una combinación de vegetación

arbustiva y herbácea, y se encuentra en altitudes entre 4100 y 4400/4500 m.s.n.m. Su relieve es montañoso y se caracteriza por ser un arbustal esclerófilo semipostrado, con arbustos que alcanzan alturas de 0.5 a 1.5 m. En este ecosistema, la vegetación se encuentra fragmentada, con áreas de suelo desnudo entre los parches de vegetación. Por lo general, se encuentra en morrenas y circo glaciares, escarpamientos rocosos, depósitos de rocas glaciares y pendientes pronunciadas de arena o quebradas estrechas (PDYOT Parroquia Cebadas, 2019, p. 319).

- **Herbazal ultrahúmedo subnival de páramo**

Es un ecosistema que se encuentra en el páramo de almohadillas. Se caracteriza por tener una vegetación compuesta por arbustos y hierbas, y se desarrolla en un clima pluvial. Su rango altitudinal va desde los 4400/4500 m hasta los 4900 m sobre el nivel del mar. El relieve es montañoso, con laderas empinadas cubiertas de depósitos de rocas glaciares sueltas, arena y grava. Este ecosistema comparte similitudes en términos de estructura, fisonomía y cobertura vegetal con el herbazal húmedo subnival, pero se distingue por tener una mayor extensión. La diferencia clave se encuentra en los patrones de humedad locales y una mayor cantidad de precipitación mensual. Esto se debe a su ubicación en las montañas, que se orientan hacia las áreas donde se generan las precipitaciones provenientes de la Amazonía (PDYOT Parroquia Cebadas, 2019, p. 319).

2.2.4 Cobertura de cobertura vegetal y uso del suelo en la zona altoandina de la provincia de Chimborazo

La zona altoandina de la provincia de Chimborazo se extiende sobre un ecosistema de páramo. Con lo cual despliega una amplia variedad de cobertura vegetal y usos del suelo que desempeñan un papel esencial en el ciclo del carbono. Estos ecosistemas son fundamentales para la captura y almacenamiento de carbono orgánico, contribuyendo así a la regulación del balance de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y por tanto, al control del cambio climático (García et al., 2020).

El suelo de esta región posee una alta capacidad para retener carbono, especialmente en comparación con otras áreas del Ecuador, como la costa y la amazonia. En particular, los páramos herbáceos y pajonales altoandinos albergan importantes cantidades de carbono orgánico en su composición, lo que los convierte en reservorios cruciales para la mitigación del cambio climático (Buytaert et al. 2005).

Mantener la integridad de estos ecosistemas y preservar su cobertura vegetal y usos del suelo adecuados es vital para asegurar la captura y almacenamiento continuo del carbono y reducir las

emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera (PDYOT Parroquia Cebadas, 2019, p. 319). Sin embargo, el manejo inadecuado de estas áreas, como la expansión de la agricultura no sostenible o la ganadería intensiva, puede desencadenar procesos de degradación del suelo y la pérdida de la cobertura vegetal, liberando grandes cantidades de carbono almacenado en la forma de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Estas emisiones adicionales contribuyen a agravar el cambio climático y afectar la sostenibilidad del planeta Tierra.

2.2.5 Aplicaciones para monitorear variables ambientales, climatológicas y cambios y alteraciones del suelo

La teledetección espacial a través de imágenes satelitales es una herramienta fundamental para el monitoreo de variables ambientales, climatológicas y cambios y alteraciones del suelo. Estas imágenes, se utilizan como una poderosa herramienta para la toma de decisiones en la conservación de la biodiversidad. Gracias a su capacidad de análisis, es posible monitorear y vigilar áreas que requieren apoyo para la conservación del medio ambiente, incluso en zonas de difícil acceso (Sánchez, 2018, p. 245).

Entre las aplicaciones más destacadas de las imágenes satelitales en el monitoreo de variables ambientales y climatológicas, se encuentra la generación de registros para el seguimiento de los cambios en la biodiversidad, como la cobertura terrestre, el uso del suelo, la perturbación ecológica y la fenología de la vegetación, tanto a nivel local como mundial. Además, estas imágenes son fuente de valiosa información ambiental para la investigación ecológica. Por ejemplo, se han utilizado en estudios relacionados con la riqueza de especies y en actividades de monitoreo de la biodiversidad, permitiendo medir ciertas características fenológicas de la vegetación a través de modelos espaciales basados en datos de teledetección pasiva (Sánchez 2018, p. 245).

Un desafío importante de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es adquirir información básica, especialmente relacionada con procesos medioambientales como vegetación, suelos y agua. En este sentido, la teledetección espacial se vuelve insustituible para generar estas variables (Li et al. 2022). La observación remota a través de sensores con buena cobertura temporal y espectral resulta esencial, y aunque el detalle espacial puede ser secundario cuando se trata de estudiar grandes territorios, la información obtenida es fundamental para estudiar procesos globales.

2.2.5.1 Fuentes de datos satelitales

- **Alos Palsar**

Es un satélite de observación de la Tierra operado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Lo que lo hace particularmente relevante para estudios ambientales es su sensor remoto de radar de apertura sintética (SAR) polarimétrico, conocido como PALSAR (Valle, 2017, p. 75). Este sensor emite pulsos de microondas y registra las señales reflejadas por la superficie terrestre, lo que permite generar imágenes de alta resolución del terreno, independientemente de las condiciones climáticas o de la presencia de nubes (Valle, 2017, p. 75).

Estas imágenes SAR son especialmente útiles para obtener datos topográficos precisos y caracterizar la geomorfología del terreno. La información obtenida a partir del satélite Alos PALSAR es crucial para la caracterización morfológica de cuencas hidrográficas de interés, ya que proporciona detalles esenciales sobre la topografía y elevación del terreno a través de los modelos de elevación digital (MDE) que pueden conformar las imágenes proporcionadas por este satélite, fundamentales para entender los procesos de erosión del suelo y su relación con la geomorfología, relieve y altimetría de la zona (GeoSpatial 2015).

Características del satélite (USGS 2021):

- Resolución Espacial: Aproximadamente 10 m.
- Resolución Espectral: Banda de microondas (sensor SAR).
- Resolución Temporal: Varias veces por semana dependiendo del modo de operación.
- Resolución Radiométrica: 16 bits, lo que permite representar 65,536 niveles diferentes de brillo en las imágenes SAR.

- **Landsat 8**

Es un satélite de observación terrestre que ha sido lanzado y operado conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) como parte del Programa Landsat. Esta misión representa una herramienta para el monitoreo ambiental a largo plazo, ya que está equipado con dos sensores remotos principales: el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS).

El OLI captura imágenes en varias bandas espectrales, incluyendo el visible y el infrarrojo cercano, lo que proporciona información detallada sobre la superficie terrestre, como la cobertura vegetal, los cuerpos de agua y la ocupación del suelo. Por otro lado, el TIRS mide la radiación térmica emitida por la superficie, lo que permite estimar la temperatura de la superficie terrestre (USGS 2021).

Los datos obtenidos a partir del satélite Landsat 8, especialmente el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), son fundamentales para evaluar la densidad y salud de la vegetación en las áreas de estudio (Roy et al., 2016, p.3). Esta información es relevante para entender la capacidad de retención del suelo y su susceptibilidad a la erosión, ya que la vegetación juega un papel crucial en la estabilidad del suelo y la regulación del agua.

Información del satélite (USGS 2021):

- Resolución Espacial: 15 m para el visible e infrarrojo cercano, 30 m para el infrarrojo térmico.
 - Resolución Espectral: 11 bandas espectrales (OLI) y 2 bandas térmicas (TIRS).
 - Resolución Temporal: Revisita cada 16 días.
 - Resolución Radiométrica: 16 bits para las bandas espectrales del sensor OLI, lo que permite representar 65,536 niveles diferentes de brillo en cada banda.
-
- **Sentinel-2**

Es una misión de observación de la Tierra desarrollada por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del programa Copernicus. Este satélite proporciona una amplia gama de datos y servicios para el monitoreo ambiental y la seguridad tanto en Europa como a nivel global. Sentinel-2 cuenta con un avanzado sensor remoto conocido como MultiSpectral Instrument (MSI), que captura datos en 13 bandas espectrales que abarcan desde el visible hasta el infrarrojo cercano y medio (ESA 2022).

La combinación de estas bandas espectrales permite obtener imágenes de alta resolución y datos espectrales detallados de la superficie terrestre, lo que es esencial para monitorear y analizar cambios en la cobertura terrestre, la vegetación, los recursos hídricos y la calidad del aire (Najoui et al. 2022).

El satélite da seguimiento continuo lo que puede ser oportuno a la hora de evaluar las condiciones del suelo y la vegetación en cuencas hidrográficas. El satélite Sentinel-2 representa una

herramienta para la obtención de información ambiental actualizada y confiable para estudios de larga duración sobre la dinámica del paisaje y la gestión sostenible de los recursos naturales (Hengl et al., 2017).

Información del satélite (ESA 2022):

- Resolución Espacial: 10 m para el visible e infrarrojo cercano, 20 m para el infrarrojo medio.
- Resolución Espectral: 13 bandas espectrales.
- Resolución Temporal: Revisita con una frecuencia de 5 días en el ecuador.
- Resolución Radiométrica: 12 bits, lo que permite representar 4,096 niveles diferentes de brillo en cada banda espectral.

2.2.5.2 Plataformas de descarga de información geográfica y análisis geoespacial

- **Global Climate Monitor**

Es una plataforma que se encarga de recopilar y analizar datos climáticos a nivel global, integrando información proveniente de diversos satélites y sensores remotos, como Sentinel-2, Landsat 8, Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), SMOS, el módulo ASTER y MODIS (GCM 2021). Estos satélites, módulos y sensores proporcionan mediciones cruciales para el estudio de procesos hidrológicos y la erosión del suelo, incluyendo información relevante sobre radiación, temperatura superficial del suelo, precipitación superficial y humedad (GCM 2021).

El acceso a esta plataforma resulta esencial para obtener una visión completa de las condiciones climáticas y ambientales en las áreas de estudio, permitiendo una comprensión más profunda y detallada de los factores que influyen en la hidrología y erosión del suelo (Camarillo et al. 2019). Con esta información, se pueden desarrollar estrategias efectivas para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la prevención de fenómenos erosivos en las cuencas hidrográficas.

- **SoilGrids**

Es una plataforma que ofrece mapas globales de propiedades del suelo, generados mediante modelos estadísticos y algoritmos de aprendizaje automático (Hengl et al. 2017). Estos mapas incluyen información sobre la textura del suelo, densidad aparente, materia orgánica y capacidad de retención de agua en diferentes áreas geográficas. Utiliza datos de satélites como MODIS (estación meteorológica) y Terra, Aqua, GPM y TRMM para estimar la humedad del suelo y

analizar su comportamiento frente a fenómenos hidrológicos y procesos de erosión (Poggio et al. 2021). La plataforma es fundamental para el estudio y manejo de recursos naturales y es ampliamente utilizada en campos como agricultura, hidrología y conservación del suelo. La plataforma SoilGrids proporciona datos a nivel mundial con una resolución espacial de aproximadamente 250 m y cubre un período temporal de referencia.

- **La Harmonized World Soil Database (HWSD)**

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), ha realizado importantes contribuciones en el campo de la caracterización de suelos a nivel global. Una de las últimas y más significativas actualizaciones en este ámbito es la Harmonized World Soil Database (HWSD) o base de datos de suelos armonizada del mundo. Esta base de datos reúne información sobre suelos a nivel mundial mediante la combinación de actualizaciones regionales y nacionales provenientes de diversas fuentes con la información ya existente en el Mapa Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO a una escala de 1:5 000 000 (FAO y IIASA 2023, p. 15).

Esta herramienta completa que proporciona una visión integral de la distribución de los suelos en todo el mundo. Incluye información detallada sobre diversas propiedades del suelo, como textura, contenido de materia orgánica, pH y capacidad de retención de agua, entre otras (Wieder et al. 2014). La armonización de la información sobre suelos a nivel mundial es de gran importancia, ya que facilita la comparación y el análisis entre diferentes áreas geográficas, permitiendo una mejor comprensión de los patrones y tendencias globales en la distribución y calidad de los suelos (FAO y IIASA 2023, p. 15). Además, la base de datos HWSD ayuda a identificar áreas vulnerables a la degradación del suelo, la erosión y otros problemas ambientales, lo que a su vez permite la implementación de medidas preventivas y correctivas para proteger y conservar los suelos de manera efectiva.

2.2.5.3 *Procesamiento de imágenes satelitales*

El procesamiento de imágenes satelitales involucra la utilización de técnicas de procesamiento digital de imágenes, de acuerdo con el nivel de preprocesado o producto satelital utilizado. Tal es el caso del filtrado, la corrección radiométrica y geométrica, y la fusión de datos multiespectrales, para mejorar la calidad y precisión de las imágenes obtenidas por los satélites (Chicchón et al. 2019). Estos algoritmos permiten reducir el ruido y eliminar artefactos, lo que garantiza la obtención de imágenes que permitan estudiar las magnitudes físicas de la recuperación de la señal de la superficie terrestre bajo la atmósfera. Por lo tanto, pueden ser utilizadas para diversos propósitos,

como la detección de cambios en la cobertura terrestre, la monitorización de la vegetación, la evaluación de la calidad del agua y el análisis de fenómenos climáticos (Gossweiler 2012).

El análisis y procesamiento de imágenes satelitales también incluye técnicas avanzadas de clasificación y segmentación de imágenes, que permiten identificar y diferenciar distintos tipos de objetos y características en el terreno. Así es el caso de los cuerpos de agua, áreas urbanas, cultivos, bosques, entre otros (Asokan et al. 2020). Además, estos análisis facilitan la evaluación de la dinámica del paisaje, del uso del suelo y la planificación territorial. También, la obtención de datos de alta resolución espacial, espectral y temporal de los satélites. El procesamiento de imágenes satelitales también implica la integración y combinación de datos de múltiples fuentes y sensores, como imágenes ópticas, radar, infrarrojas y de microondas (Nuvri 2019). Con lo cual es posible obtener una visión más completa y holística del entorno, lo que es esencial para comprender la complejidad de los fenómenos naturales y antropogénicos que afectan nuestro planeta (Rodríguez & Arredondo, 2005, p. 26).

- **Niveles de procesamiento de imágenes satelitales**

Los productos de imágenes satelitales se dividen en diferentes niveles de procesamiento de acuerdo con el sensor y a la disponibilidad de los productos y del acceso de los usuarios a los mismos. El nivel 1, generalmente es un nivel de producto inicial que proporciona imágenes de reflectancia en la parte superior de la atmósfera. El nivel 2 es un nivel de producto superior que proporciona imágenes de reflectancia corregidas atmosféricamente. El nivel 3 es un nivel de producto superior que proporciona datos derivados, como mapas de cobertura terrestre y mapas de índice de vegetación (Asokan et al. 2020).

En el caso del satélite Sentinel-2 MSI, los productos se dividen en dos niveles: nivel 1C (sin corrección atmosférica) y nivel 2A (con corrección atmosférica). La corrección atmosférica de las imágenes Sentinel-2 MSI se realiza mediante el uso de la herramienta Sen2Cor. Mientras que las imágenes de Landsat 8, sensor MSI, tienen los productos de tres niveles: Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3 y la corrección atmosférica de las imágenes Landsat 8 MSI puede ser realizada en otros, mediante el uso de la herramienta LaSRC (USGS 2021).

Por otra parte, los productos de imágenes del satélite ALOS PALSAR se dividen en cuatro niveles de procesamiento: Nivel 1.0, Nivel 1.1, Nivel 1.5 y Nivel 2.1. El nivel 1.0 es el nivel de producto inicial que proporciona datos brutos generados por cada segmento de enlace descendente y cada banda. El nivel 1.1 es un producto de complejo de mirada única en rango inclinado. El nivel 1.5

es un producto de rango terrestre detectado, con resolución normal. El nivel 2.1 es un producto ortorrectificado a partir de los datos del nivel 1.1 mediante el uso de un modelo digital de elevación (DEM) (GeoSpatial 2015).

- **Corrección de imágenes Satelitales**

El análisis de la evolución y cambios de las superficies a lo largo del tiempo requiere el uso de imágenes satelitales adquiridas por diferentes sensores o en distintos momentos. Sin embargo, para garantizar la comparabilidad de estas imágenes, es necesario realizar correcciones o ajustes en relación con la resolución (Gonzaga 2014, p. 43). Las correcciones, tanto geométricas como radiométricas, son llevadas a cabo en las estaciones terrenas una vez que se reciben las imágenes. Las correcciones geométricas aseguran la alineación espacial y geográfica precisa de las imágenes, mientras que las correcciones radiométricas compensan los efectos atmosféricos presentes en los datos. Una vez aplicadas estas correcciones, las imágenes resultantes están listas para su uso por los usuarios finales, permitiendo el análisis y estudio de las áreas de interés (Tristan, Wainschenker y Doorn 1917, p. 3).

- **Depuración de imágenes satelitales**

La depuración de imágenes satelitales es un proceso esencial en el análisis de datos provenientes de satélites, que tiene como objetivo garantizar la calidad y confiabilidad de la información capturada. En esta etapa, se realiza un minucioso examen de la serie de imágenes mensuales de cada estación, asegurando su coherencia y consistencia (León 2017, p. 30). Se utilizan métodos estadísticos y técnicas de procesamiento de imágenes para comparar y evaluar las varianzas, con el propósito de obtener resultados más precisos y confiables. La depuración permite eliminar ruidos o errores presentes en las imágenes originales, lo que resulta crucial para realizar análisis ambientales, estudios de cambios en la superficie terrestre, y la toma de decisiones informadas en diversas aplicaciones prácticas (Fan et al. 2019).

- **Análisis multitemporal**

El análisis multitemporal es una metodología de estudio que se basa en el uso y comparación de múltiples imágenes satelitales adquiridas en diferentes momentos temporales (Flórez et al. 2017, p. 97). Esta técnica integra datos que pueden ser proporcionados por diversos satélites, como Alos PALSAR, Landsat 8 y Sentinel-2, junto con las plataformas SoilGrids y Global Climate Monitor, que ofrecen resoluciones espaciales, espectrales y temporales variadas.

El análisis multitemporal permite monitorear cambios y evoluciones en la superficie terrestre a lo largo del tiempo, identificando tendencias y patrones en fenómenos ambientales, agrícolas, climáticos y hidrológicos, entre otros (Ogilvie et al. 2020). Mediante esta aproximación, se pueden evaluar los procesos de erosión del suelo y su relación con la geomorfología y el relieve de la zona de estudio (Martínez & Graña et al., 2021). Esta técnica es esencial en la identificación de áreas susceptibles a la erosión, permitiendo desarrollar estrategias de conservación y manejo sostenible del suelo y los recursos hídricos (Angearu et al. 2020). Además, brinda información para abordar desafíos ambientales y alcanzar una mayor sustentabilidad en el uso del territorio.

2.3 Bases teóricas

2.3.1 Características generales de una cuenca hidrográfica

2.3.1.1 Tipos de cuencas

Las cuencas hidrográficas son importantes porque permiten la circulación del agua y cumplen un rol importante en el ciclo del agua. De hecho, una parte del 30% del agua dulce que existe en la Tierra transcurre por las cuencas hidrográficas. Además, las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (las partes más altas de las montañas) donde se concentran los escurrimientos, como ríos y arroyos, que confluyen y desembocan en un punto común o también llamado salida de la cuenca (Bordino, 2021).

El desarrollo de las cuencas hidrográficas es importante para restaurar el equilibrio ecológico aprovechando, conservando y desarrollando los recursos naturales (es decir, la tierra, el agua y la cubierta vegetal). También se utiliza un enfoque de cuenca para el desarrollo de la tierra, el desarrollo de los recursos hídricos, la forestación y el desarrollo de los pastos (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 2019).

No existe un consenso general sobre las clases de las áreas a manejar para su categorización. En cambio, existen algunas categorizaciones con uso permanente y ampliamente distribuidas, tal es el caso de la recomendada por el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos (Campos, 1998, p. 50).

La Tabla 1 presenta una clasificación de cuencas hidrográficas basada en su magnitud, tomando en cuenta el tamaño de la cuenca en km². Propone seis categorías de cuencas con diferentes rangos de tamaño y sus respectivas descripciones. Esta clasificación proporciona una forma sencilla y

práctica para agrupar las cuencas hidrográficas en función de su magnitud y es de utilidad en estudios hidrológicos y de recursos hídricos. Las dimensiones de las cuencas se dividen en las siguientes categorías:

Tabla 2-1: Dimensiones de las Cuencas Hidrográficas

Tamaño de la Cuenca (km²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 - 250	Pequeña
250 – 500	Intermedia – pequeña
500-2500	Intermedia – grande
2500-5000	Grande
> 500	Muy grande

Fuente: (Campos 1998, p. 50)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Otra clasificación de cuencas hidrográficas se realiza según sus dimensiones, expresadas en hectáreas (ha). Esta clasificación facilita la agrupación de cuencas hidrográficas según su magnitud y es útil para identificar y categorizar diferentes sistemas acuíferos. Con base en los criterios de Ipiates, 2022, se proponen cuatro tipos de cuencas con diferentes rangos de tamaño y sus respectivas descripciones:

- **Cuenca**

Es una región geográfica donde todas las aguas superficiales y subterráneas drenan hacia un mismo río o lago principal. Las cuencas hidrográficas se dividen en tres partes: alta, media y baja, y se caracterizan por abarcar un territorio mayor a 50,000 hectáreas. Estas cuencas representan unidades de gestión y estudio en la gestión de recursos hídricos (Ipiates, 2022, p. 28).

- **Subcuenca**

Es una subdivisión de una cuenca hidrográfica más grande y drena hacia un río o lago secundario en lugar del cuerpo de agua principal de la cuenca. Se considera que una subcuenca abarca un territorio que oscila entre las 5,000 y las 50,000 hectáreas (Ipiates, 2022, p. 28). Las subcuencas son útiles para un enfoque más detallado en la gestión de recursos hídricos y la planificación ambiental.

- **Microcuenca**

Una microcuenca es una subdivisión aún más pequeña que forma parte de una subcuenca y drena hacia un río o lago terciario. Estas microcuencas abarcan un territorio menor a 5,000 hectáreas y son de especial importancia para un análisis detallado de la gestión hídrica y la conservación ambiental en áreas específicas (Ipiales, 2022, p. 28).

2.2.1.2 Sectores de una cuenca hidrográfica

Los sectores de cuencas hidrográficas se refieren a las diferentes partes o divisiones que componen una cuenca. Estas divisiones son clave para entender el flujo y comportamiento del agua en la cuenca en su conjunto. Los tres sectores principales son:

- **Cuenca alta**

Es la zona donde se ubica el nacimiento del río principal en zonas de laderas y montaña. Es la zona donde nacen los ríos y riachuelos y donde se capta la mayor cantidad de agua que discurrirá en la cuenca (Cotler et al., 2015, p. 3). Esta zona debe ser considerada como “de reserva” ya que la diversidad de especies naturales que influyen en el almacenamiento de agua no debe ser alterada.

- **Cuenca media**

La cuenca media es donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y en la que el río principal mantiene un cauce definido. Es una zona con pendientes fuertes y su función está relacionada con el escurrimiento de agua. En estas zonas afloran los manantiales de agua y son zonas de erosión y aprovechamiento energético (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 2019).

- **Cuenca baja**

Es la zona baja donde los ríos pierden velocidad, fuerza y sedimentan todos los materiales recogidos formando llanuras (Cotler et al., 2015, p. 3). La cuenca baja es la zona donde se depositan los sedimentos y donde el o los cauces desembocan en el río receptor.

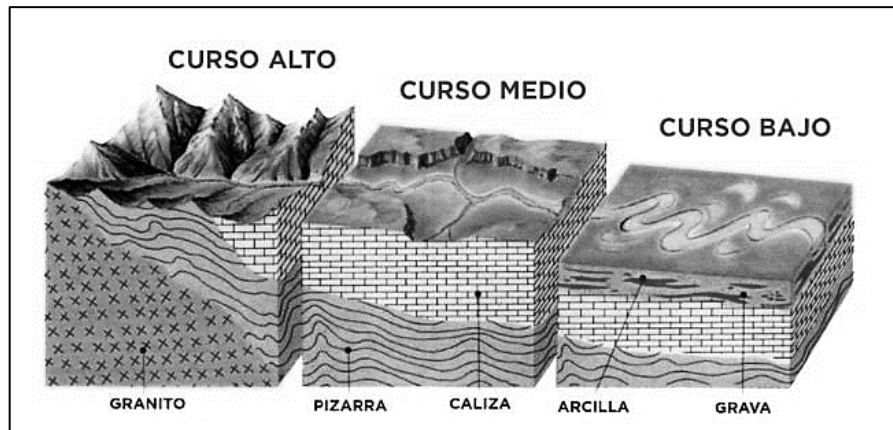


Ilustración 2-2: Distribución de los cursos en una cuenca hidrográfica

Fuente: (Zhica 2020, p. 28)

2.3.1.2 Partes de una cuenca hidrográfica

Las partes de una cuenca hidrográfica son las distintas divisiones o componentes que conforman el sistema hidrológico de una región determinada. Estas partes son fundamentales para comprender y analizar el flujo y comportamiento del agua en la cuenca en su conjunto, así como para tomar decisiones relacionadas con la gestión y conservación de los recursos hídricos. Las principales partes de una cuenca son las siguientes:

- **Vertientes**

Es la superficie de terreno que se inclina hacia un curso de agua. Es el área de la cuenca hidrográfica que recoge la precipitación y la envía al sistema de drenaje. La delimitación de una vertiente se realiza mediante la línea de la divisoria de aguas, que es el lugar donde las aguas de una lluvia se dividen en diferentes direcciones (Gavira 1943, p. 203). La morfología y las características geológicas de la vertiente afectan el comportamiento hidrológico de la cuenca.

- **Red de cauces**

La red de cauces es el sistema de cursos de agua que forman la red de drenaje en una cuenca hidrográfica. La red de cauces se clasifica en diferentes órdenes, según el número de afluentes que recibe. Los arroyos y riachuelos de menor orden son los que se encuentran en la parte alta de la cuenca y son alimentados por las vertientes. A medida que los arroyos se unen, se convierten en arroyos de mayor orden y finalmente en ríos principales que atraviesan la cuenca hasta llegar a su salida (Zhica 2020, p. 28). La longitud de los cauces y su pendiente son factores importantes en la velocidad y la erosión del agua.

- Valle de la cuenca hidrográfica

Un valle es la depresión topográfica que se encuentra entre dos vertientes o cadenas montañosas y es atravesada por un curso de agua. El valle es el lugar donde el agua de la cuenca fluye y se acumula antes de continuar su recorrido. La morfología del valle influye en el comportamiento hidrológico de la cuenca, ya que determina la velocidad y la erosión del agua. Además, el valle es una importante zona de interacción entre los procesos hidrológicos y los procesos geológicos y biológicos (Zhica 2020, p. 23).

- Interfluvio

El interfluvio es la zona de terreno elevada que se encuentra entre dos cursos de agua en una cuenca hidrográfica. Es la parte de la cuenca que no está directamente relacionada con el flujo de agua, ya que no recibe ni produce agua. El interfluvio es importante para el análisis de la cuenca, ya que es la zona donde se ubican las fuentes de agua y es crucial para la protección de los recursos hídricos (Alcántara, 2015, p. 3).

2.3.1.3 Componentes del sistema fluvial en una cuenca hidrográfica

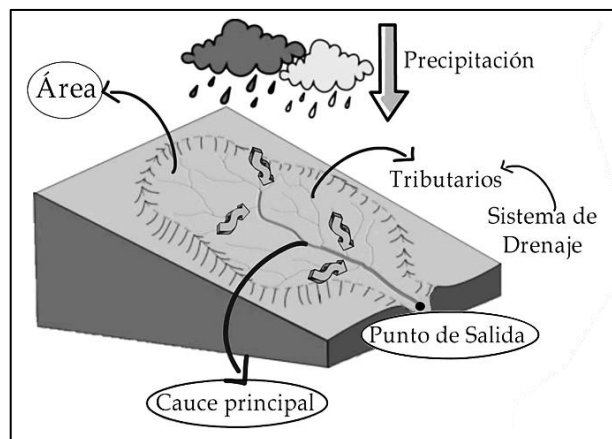


Ilustración 2-3: Elementos del sistema de drenaje

Fuente: (Gavira 1943, p. 203)

- Precipitación de entrada

La precipitación de entrada se refiere a la entrada de agua en forma de lluvia o cualquier otro tipo de precipitación atmosférica (como la nieve o el granizo) en una cuenca hidrográfica. Esta es la fuente principal de agua que ingresa a la cuenca y marca el comienzo del ciclo hidrológico. La cantidad, intensidad y distribución de la precipitación en una cuenca son factores críticos que

afectan su hidrología y pueden influir en la gestión de recursos hídricos, la prevención de inundaciones y la disponibilidad de agua para usos diversos (Ibáñez et al., 2010, p. 5).

- **Divisor de Aguas**

El divisor de aguas es una línea o límite geográfico que separa una cuenca hidrográfica de otra. Es el punto crítico en el cual las aguas de lluvia y el escurrimiento fluyen en direcciones opuestas hacia diferentes cuencas. Imagina una cresta de montaña: las gotas de lluvia que caen a un lado de esa cresta seguirán un camino hacia una cuenca, mientras que las que caen al otro lado fluirán hacia una cuenca diferente. Identificar el divisor de aguas es de vital importancia, ya que establece los límites precisos de una cuenca y determina qué agua se considera parte de esa cuenca específica (Ibáñez et al., 2010, p. 5).

- **Área de Captación**

El área de captación es el territorio total que contribuye al flujo de agua hacia el sistema de drenaje de una cuenca hidrográfica. Esto incluye no solo los tributarios directos, como ríos y arroyos, sino también todas las áreas circundantes que aportan agua indirectamente a la cuenca. Imagina que una cuenca es como un gran embudo; el área de captación es la parte superior del embudo que recoge toda el agua que eventualmente fluirá hacia abajo a través del sistema de drenaje (Ibáñez et al., 2010, p. 5). La caracterización detallada de esta área es fundamental para comprender la extensión geográfica de la cuenca y cuánta agua puede recopilar.

- **Tributarios**

Los tributarios son afluentes o corrientes más pequeñas que contribuyen al caudal de agua en el cauce principal de la cuenca. Estos tributarios recogen agua de las áreas circundantes y la transportan hacia el cauce principal. La red de tributarios forma un sistema de drenaje que alimenta el río principal y es fundamental para entender cómo se recopila y distribuye el agua dentro de la cuenca (Ibáñez et al., 2010, p. 9). La identificación y caracterización de los tributarios son esenciales para evaluar la salud y la capacidad de una cuenca para gestionar el flujo de agua.

- **Cauce Principal**

El cauce principal se refiere al canal principal y más grande de la cuenca por donde fluye la mayor cantidad de agua. Este curso de agua representa la vía principal de transporte del agua hacia el

punto de salida (Ibáñez et al., 2010, p. 7). El cauce principal es un componente fundamental de la red de drenaje y es esencial para determinar la dirección y la velocidad del flujo de agua a lo largo de la cuenca.

- **Punto de Salida**

El punto de salida marca el lugar donde el agua del sistema de drenaje de la cuenca abandona su límite geográfico y continúa su curso hacia otras cuencas, ríos, lagos u océanos. Es el punto en el que se puede medir la descarga total de agua de la cuenca hacia el sistema de aguas superficiales más grande. El estudio de este punto es vital para evaluar la cantidad de agua que una cuenca aporta a su entorno regional (Alcántara, 2015, p. 31).

- **Sistema de drenaje**

El sistema de drenaje es la red de cursos de agua, incluida el cauce principal y sus tributarios, que canaliza el flujo de agua dentro de la cuenca. El cauce principal actúa como una columna vertebral que recoge el agua de los tributarios y la dirige hacia el punto de salida de la cuenca. Este sistema es crucial para comprender cómo se conectan y distribuyen los diferentes cursos de agua dentro de la cuenca (Alcántara, 2015, p. 31).

2.3.1.4 Clasificación de cuencas hidrográficas por el sistema de drenaje

La clasificación de Cuencas Hidrográficas por el Sistema de Drenaje se refiere a la categorización de cuencas según la forma en que sus aguas fluyen y se desplazan a través del territorio. Existen cuatro tipos principales de cuencas hidrográficas en función de su sistema de drenaje:

- **Cuencas exorreicas**

Son sistemas de drenaje en los que las aguas fluyen hacia el mar u océano. La principal fuente de alimentación de estas cuencas proviene de la lluvia y el deshielo. El agua en estas cuencas experimenta varios procesos de flujo, como la infiltración a través de suelos permeables, escorrentías superficiales o la absorción por parte de plantas y otros organismos vivos. Finalmente, las aguas desembocan en el mar o se evaporan (Reyes, Barroso y Carvajal 2014, p. 20).

- **Cuencas endorreicas**

Estas cuencas son sistemas de drenaje que no tienen conexión directa con el mar y, en su lugar, desembocan en lagos, lagunas o salares. Son más comunes en áreas de grandes cadenas montañosas y en regiones alejadas de las costas. A diferencia de las cuencas exorreicas, las endorreicas no tienen una salida directa al mar (Reyes, Barroso y Carvajal 2014, p. 20).

- **Cuencas criptorréicas**

En estas cuencas, el flujo de agua es intermitente o subterráneo, lo que significa que no se observa un flujo constante en la superficie. Estas cuencas son típicas en regiones con suelos altamente permeables o en áreas con altas tasas de evaporación. El agua de lluvia se infiltra rápidamente en el suelo y se mueve a través de acuíferos subterráneos en lugar de fluir de manera superficial (Reyes, Barroso y Carvajal 2014, p. 20).

- **Cuencas arreicas**

Las cuencas arreicas son aquellas en las que las aguas se evaporan o se infiltran en el terreno antes de converger en una red de drenaje. A diferencia de otras cuencas, no desembocan en ningún cuerpo de agua, ya sea un lago o un mar. En estas cuencas, el agua se evapora por completo o se infiltra en el suelo sin llegar a un punto de salida (Moreira et al. 2020, p. 70).

2.3.2 Características de la red hidrográfica

Una red hidrográfica es un sistema de circulación lineal, jerarquizado y estructurado donde se parte de la delimitación de la cuenca y las subcuencas permitirá un mejor cuidado de los recursos hídricos, La delimitación de cuencas implica una demarcación de áreas de drenaje superficial donde las precipitaciones (principalmente las pluviales) que caen sobre estas tienden a ser drenadas hacia un mismo punto de salida (Cotler et al. 2007, p. 4). La delimitación se comienza por la desembocadura, siguiendo los puntos más elevados hasta cerrar el circuito, se utiliza el software Arc Gis, con sus respectivas extensiones, este programa permite obtener de forma inmediata parámetros de la topografía, longitud de los cauces, superficie de la cuenca y subcuencas (Gerald, Piccolo y Perillo 2010, p. 221).

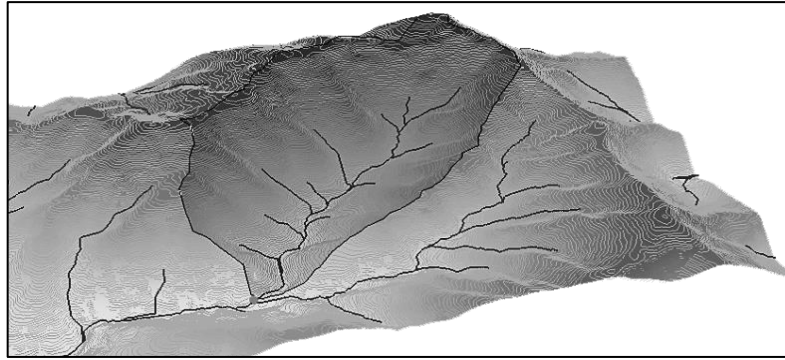


Ilustración 2-4: Distribución de la red hidrográfica en una cuenca

Fuente: (Geraldi, Piccolo y Perillo 2010, p. 221)

2.3.2.1 *Delimitación de una cuenca hidrográfica*

Es el proceso por el cual se definen los límites geográficos de una cuenca hidrográfica, que es una unidad fundamental en la gestión y estudio de los recursos hídricos. Esta delimitación se basa en diversos criterios y características geográficas que permiten identificar el área de tierra donde todas las aguas superficiales y subterráneas fluyen hacia un punto de salida común, como un río o un lago (Loro 2012, p. 3).

- **Perfil de una cuenca hidrográfica**

El perfil de una cuenca hidrográfica se refiere a la representación gráfica de las elevaciones del terreno a lo largo de la cuenca en relación con su ubicación geográfica y su relación con el sistema de parte aguas. Se representa con un gráfico o dibujo que muestra cómo varía la altitud del terreno a medida que nos movemos a lo largo de la cuenca, generalmente a lo largo de una línea imaginaria que sigue el curso principal del río o arroyo que drena la cuenca (Loro 2012, p. 3).

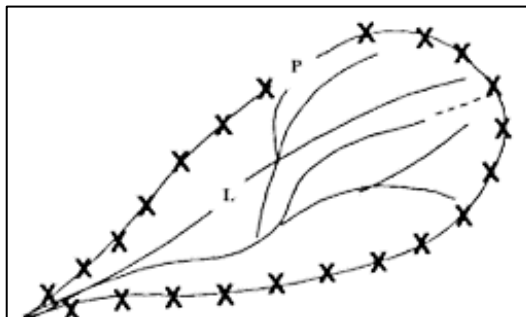


Ilustración 2-5: Delimitación del sistema de parteaguas

Fuente: (Ibáñez, Moreno y Gisbert 2010, p. 6)

2.3.2.2 *Dirección de los flujos*

Una de las claves de la derivación de características hidrológicas de una superficie es la capacidad de determinar la dirección de flujo desde cada celda en el ráster, esto se hace con la herramienta, esta herramienta toma una superficie como entrada y proporciona como salida un ráster que muestra la dirección del flujo que sale de cada celda. Si se elige la opción Ráster de caída de salida, se crea un ráster que muestra una proporción del cambio máximo en la elevación desde cada celda a lo largo de la dirección del flujo hasta la longitud de la ruta entre los centros de celda y se expresa en porcentajes (Castro, 2017, p. 7).

2.3.2.3 *Acumulación de los flujos*

La acumulación de flujos se refiere a la cantidad de celdas que fluyen hacia cada celda en el ráster de salida. Determina la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente. Las celdas con dirección de flujo indefinida solo recibirán un flujo; no contribuirán a ningún flujo aguas abajo (Loro 2012, p. 3). Las celdas de salida con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y se pueden utilizar para identificar canales de arroyo.

2.3.2.4 *Jerarquización de la red fluvial*

La jerarquización de la red fluvial se refiere a la clasificación de los canales y ríos de la cuenca hidrográfica en función de su tamaño y posición en la red de drenaje. La jerarquización puede ser útil para la gestión de los recursos hídricos y la planificación de la infraestructura hidráulica, ya que los canales y ríos de diferentes tamaños pueden tener diferentes funciones en la cuenca hidrográfica (Elosegui y Sabater 2009, p. 48).

- **Número de Horton- Strahler**

El número de Strahler se define como el número más alto que se encuentra en la red de drenaje, donde se define la jerarquía de los ríos y arroyos comenzando desde la corriente más pequeña hasta la corriente principal. Es una forma numérica que expresa la complejidad de una ramificación donde se clasifican los órdenes de los cauces de acuerdo con su jerarquía y a la potencia de sus afluentes (Elosegui & Sabater, 2009, p. 49). Comúnmente se utiliza en hidrología básica y geomorfología fluvial para definir el orden de corrientes es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca (Vega 2020, p. 76).

2.3.3 Geomorfometría de una cuenca hidrográfica

La geomorfometría de una cuenca hidrográfica se refiere al estudio cuantitativo de la forma y estructura de la superficie terrestre, lo que incluye características topográficas como altitud, pendiente, orientación y forma de las cuencas. Esta disciplina busca cuantificar y describir de manera numérica estas características para comprender en detalle la morfología de una cuenca en particular (Geraldi et al., 2010, p. 217). A través de métodos numéricos y herramientas cartográficas, se obtienen mediciones precisas que permiten analizar la configuración geográfica de la cuenca, identificar sus principales rasgos topográficos y evaluar cómo influyen en los procesos hidrológicos y ecológicos de la región.

2.3.3.1 Parámetros físicos de la cuenca

Estos parámetros engloban mediciones que caracterizan la configuración y extensión de una cuenca hidrográfica. Proporcionan datos fundamentales para analizar la geomorfología de la cuenca y su influencia en los procesos hidrológicos. Estos aspectos geométricos ayudan a comprender la forma y estructura de la cuenca (Córdova, 2016, p. 7).

- Área de la cuenca

Se define como la superficie total que drena hacia un punto determinado en la red de drenaje. Este espacio es delimitado por la curva del perímetro. En la cuenca toda el área contribuye a la formación de quebradas y causes de diferentes órdenes donde toda el agua que se precipita del cielo y se drena a un punto central como un lago, río o arroyo (Córdova, 2016, p. 11). La cuenca es un concepto geográfico e hidrológico que se define como el área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia, nieve o deshielo escurre y transita o drena a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal, y por ésta hacia un punto común de salida. (Córdova, 2016, p. 12).

- Perímetro de una cuenca

El perímetro de la cuenca o la longitud de la línea de divorcio de la hoya es un parámetro importante, pues en conexión con el área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca. Usualmente este parámetro físico es simbolizado por la mayúscula. El perímetro se corresponde con la longitud del polígono que define los límites de la cuenca y depende de la superficie y forma de ésta. (Córdova 2016, p. 1).

- **Longitud axial de la cuenca**

La longitud axial de una cuenca se refiere a la distancia medida a lo largo del cauce principal de un sistema de drenaje, desde el punto de captura de agua en la cabecera de la cuenca hasta la salida en el punto de descarga, que generalmente es un río o un cuerpo de agua más grande. Es una medida de la longitud total del curso de agua principal dentro de la cuenca y proporciona información sobre la extensión del sistema fluvial. (Córdova 2016, p. 2). La longitud axial puede influir en la respuesta hidrológica de la cuenca, incluyendo la velocidad de escorrentía y el tiempo de concentración del agua en el sistema de drenaje.

- **Ancho de la cuenca**

El ancho de una cuenca hidrográfica se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca. Este parámetro es útil para diferenciar la forma de la cuenca. Es decir, si es alargada o redondeada (Córdova 2016, p. 2). El ancho de la cuenca se puede medir en diferentes ubicaciones, como en la parte superior de la cuenca, cerca de la cabecera, o en un punto específico a lo largo del curso de agua principal. Esta medida proporciona información sobre la extensión lateral de la cuenca en ese punto particular y puede variar a lo largo del sistema fluvial.

2.3.3.2 Parámetros de forma de la cuenca

Los parámetros de forma de la cuenca son medidas esenciales que se emplean para caracterizar y definir la configuración geomorfológica de una cuenca hidrográfica. La forma de una cuenca es importante porque influye en el comportamiento hidrológico de la misma (Docampo et al. 1989, p. 51). Además, estos parámetros son útiles para comparar cuencas entre sí y evaluar su vulnerabilidad a la erosión, la inundación y otros eventos relacionados con el agua.

- **Coefficiente de compacidad de Gravelius**

El coeficiente de compacidad de Gravelius es un indicador adimensional de la forma de la cuenca, basado en la relación del perímetro de la cuenca con el área de un círculo igual a la de la cuenca (círculo equivalente). Este indicador es especialmente relevante en el estudio de cuencas hidrográficas, ya que la forma de la cuenca influye de manera significativa en su comportamiento hidrológico. Cuenca con coeficientes de compacidad más altos tienden a tener un flujo de agua más concentrado y rápido a lo largo de su curso, mientras que aquellas con coeficientes más bajos distribuyen de manera más uniforme el flujo de agua (Docampo et al. 1989, p. 51).

- **Factor de forma**

El factor de forma es un parámetro morfométrico que se utiliza para describir la forma de una cuenca hidrográfica. Se calcula a partir de la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud del curso de agua principal que la atraviesa (Docampo et al., 1989, p. 51). Este factor es esencial en la morfometría de cuencas, ya que permite establecer comparaciones objetivas entre diferentes cuencas hidrográficas y comprender su variabilidad en términos de forma y estructura (Intriago et al., 2018, p. 11).

- **Coefficiente de masividad**

Es un parámetro geomorfológico que representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie. Este coeficiente permite diferenciar cuencas de igual altura media, pero de relieve distinto. Se refiere a la cantidad de masa que hay en una unidad de volumen (Docampo et al. 1989, p. 51). En general, las áreas con un coeficiente de masividad más alto tienden a tener temperaturas más bajas que las áreas con un coeficiente de masividad más bajo.

2.3.3.3 *Parámetros de relieve de una cuenca*

La morfometría de una cuenca hidrográfica se define mediante una serie de parámetros topográficos que describen su forma y relieve, y que influyen en su comportamiento hidrológico. La combinación de estos parámetros topográficos permite caracterizar la cuenca hidrográfica y su comportamiento hidrológico, y son útiles para el diseño de medidas de gestión y control de los recursos hídricos (Intriago et al., 2018, p. 9).

- **Pendiente media de la cuenca**

La pendiente media de la cuenca se define como la relación entre el desnivel altitudinal y la longitud total de los cursos de agua que conforman la cuenca. Este parámetro sirve para conocer el gradiente topográfico y las características hidrológicas de toda la cuenca (Intriago et al. 2018, p. 12). Así también la configuración física de la cuenca y cómo afecta el flujo natural del agua a través de ella.

- **Tipos de relieve**

El relieve en las zonas altoandinas juega un papel crucial en la dinámica hidrológica, afectando la dirección del flujo de agua y la distribución de recursos hídricos (Soar et al., 2017, p. 28). Los

valles, áreas deprimidas entre montañas, presentan topografía suave facilitando la acumulación temporal e infiltración de agua, con tipos como glaciares, periglaciares, fluviales, tectónicos, coluviales y volcánicos (Intriago et al., 2018, p. 11). Las montañas actúan como barreras naturales con vertientes empinadas, influyendo en el flujo hacia valles y cuencas. Las mesetas, aunque más planas, pueden obstruir el flujo y dirigir el agua hacia vertientes y laderas (Rocha, 2016, p. 11). Las colinas, fuentes de escorrentía superficial, actúan como transiciones suaves y puntos de recarga de acuíferos (Soar et al., 2017, p. 28). Las llanuras, con menor pendiente, favorecen la infiltración, almacenando agua subterránea y regulando el flujo en la cuenca hidrográfica, siendo esenciales para la recarga de acuíferos durante eventos de lluvia intensa (Carrión & Mero et al., 2023, p. 34).

- **Curva Hipsométrica**

La curva hipsométrica es la representación gráfica de la variación de la elevación de una cuenca, en la cual puede observarse la distribución de las zonas altas, medias y bajas. Se emplea en conjunto con los registros de precipitación para sectorizar las zonas con diferente pluviometría y para estimar la relación entre la elevación y la precipitación. Así, la curva hipsométrica es el porcentaje del área acumulada que es igual o superior a una determinada altura (Ramos et al. 2020). Esta curva representa en el eje de las ordenadas, las elevaciones m.s.n.m. y en el eje de las abscisas, el porcentaje del área de la cuenca que queda por encima de la elevación indicada (Córdova 2016). Los ríos se dividen en tres zonas: la zona de erosión, la zona de transporte y la zona de sedimentación o deposición (Rocha, 2016, p. 11).

La zona de erosión (Zona A): Es la zona en la que prevalece la producción de sedimentos y aguas (Cruz et al. 2015, p. 32). Por lo general se presentan ríos jóvenes que se encuentran en los cauces de montaña; tienen pendientes altas y sección transversal tipo “V”. Son muy irregulares y están generalmente en proceso de degradación (Jiménez 2016).

La zona de transporte (Zona B): Es la zona en donde predomina el transporte de ambos (cauces maduros) (Meza y Martínez 2010, p. 10). Los ríos que se encuentran en esta zona se denominan maduros puesto que se presentan en valles amplios, tienen pendientes relativamente escasas y sección transversal tipo “U”. Son más estables que los ríos jóvenes y suelen tener una mayor carga sedimentaria (Jiménez 2016).

La zona de sedimentación (Zona C): Es la zona establecida por la deposición de sedimentos (cauces en etapa de vejez) (Plata 2008, p. 17). Aquí se encuentran los ríos viejos ya que han alcanzado

la llanura aluvial. Tienen pendientes muy bajas y sección transversal tipo “Y”. Son muy estables y suelen tener una carga sedimentaria muy baja (Jiménez 2016).

2.3.3.4 *Altimetría de la cuenca*

El análisis de la altimetría se utiliza para describir, en altitudes sucesivas, las frecuencias de ciertos niveles, como ser altitud de sitios, puntos más altos en mallas cuadradas de muestreo, altitudes de cumbres o la de áreas de llanos o depresiones tales como hombreras, bancos y collado (Racca, 2007, p. 35).

- **Altitud media de la cuenca**

La altura media de la cuenca puede influir en la precipitación y la temperatura. Debido a su efecto sobre la circulación atmosférica. En general, a medida que aumenta la altitud, la temperatura disminuye. Esto se debe a que el aire se vuelve más delgado a medida que aumenta la altitud, lo que hace que sea más difícil para el aire retener el calor (Matovelle, Andreo y Mudarra 2021, p. 4).

En cuanto a la precipitación, hay varios factores que pueden influir en ella, como la altitud y la topografía. En general, las áreas montañosas tienden a recibir más precipitaciones que las áreas bajas. Esto se debe a que el aire húmedo se eleva y se enfría a medida que asciende por las montañas, lo que hace que se condense y forme nubes. Estas nubes pueden producir precipitaciones cuando se vuelven lo suficientemente pesadas (Matovelle, Andreo y Mudarra 2021, p. 5).

- **Elevación mediana de la cuenca**

Se refiere a la altitud promedio en el punto medio de una cuenca hidrográfica. Esta medida altimétrica incide directamente en el clima y, por ende, en el régimen hidrológico de la cuenca. Además, proporciona una base para delimitar diferentes zonas climáticas y ecológicas dentro de la misma cuenca. La relación entre las propiedades altimétricas de la cuenca y su elevación se describe de manera objetiva mediante la función hipsométrica, que se deriva de la "curva hipsométrica" de la cuenca. (Ramos et al. 2020)

- **Desnivel altitudinal de la cuenca**

Comprende la diferencia entre las zonas más alta y baja de la cuenca, expresada m.s.n.m. Esto se debe a la diferencia de clima y ambiente, ya que la cuenca tiene un piso alto que puede tener muchas áreas, es decir, una gran cantidad de plantas y animales (Verdugo 2017, p. 45).

2.3.4 Hidromorfometría de una cuenca hidrográfica

La hidromorfometría de una cuenca hidrográfica se concentra en el análisis de las características morfológicas y el comportamiento hidráulico de esta área geográfica, busca comprender cómo la topografía y la configuración geográfica de una cuenca influyen en la forma en que fluyen y se distribuyen las aguas superficiales. Este enfoque especializado se centra en aspectos hidrológicos, proporcionando información fundamental para comprender y gestionar eficazmente los recursos hídricos y los procesos hidrológicos en una región determinada (Soar, Wallerstein y Thorne 2017).

2.3.4.1 Características de la red de drenaje

Es el sistema de cauces por el que fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos. Una correcta descripción de una cuenca hidrográfica debe incluir datos relativos a su situación, tamaño, perímetro, ancho y desnivel longitudinal como aspectos generales, longitud, jerarquización y densidad en cuanto a la red de drenaje (Uhlenbrook y Unesco. 2019, p. 156).

- **Longitud del cauce principal.**

La longitud del cauce principal de una cuenca hidrográfica corresponde a la longitud del cuerpo de agua que le da nombre a la cuenca de estudio. Este parámetro se expresa normalmente en km. Se define como la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba (Raya et al., 2019, p. 9).

- **Longitud de los órdenes**

Los órdenes son una jerarquía de ríos que se agrupan según su tamaño y posición en la red hidrográfica. La longitud de los órdenes se refiere a la longitud de los ríos que pertenecen a un mismo orden. Los órdenes se definen como una jerarquía de ríos que se agrupan según su tamaño y posición en la red hidrográfica. El primer orden está compuesto por los ríos más pequeños y el último orden está compuesto por los ríos más grandes (Ochoa 2011, p. 50).

- **Pendiente media del cauce principal**

Se define como la relación entre el desnivel altitudinal y la longitud del cauce principal. Este parámetro es útil para conocer el gradiente topográfico y las características hidrológicas del cauce principal (Intriago et al. 2018, p. 12). De acuerdo con el uso del suelo y la red de drenaje, la pendiente influye en el comportamiento de la cuenca afectando directamente el escurrimiento de las aguas lluvias; esto es, en la magnitud y en el tiempo de formación de una creciente en el cauce principal. En cuencas de pendientes fuertes existe la tendencia a la generación de crecientes en los ríos en tiempos relativamente cortos; estas cuencas se conocen como torrenciales, igual que los ríos que las drenan (Ochoa, 2011, p. 31).

- **Perfil longitudinal**

Es la representación gráfica de la línea que traza un curso desde su nacimiento hasta su nivel de base, y a lo largo de él se aprecian las diferentes competencias del flujo, mientras mayor competencia posea el caudal mayor capacidad de erosión y transporte poseerá el escurrimiento, así a lo largo de un río, se reconoce un curso superior, curso medio y curso inferior. Además, a través de la gráfica del perfil longitudinal se puede proporcionar información útil sobre la energía del flujo de agua en la cuenca hidrográfica y puede ser utilizado para estimar la capacidad de transporte de sedimentos (Elosegui y Sabater 2009, p. 75).

2.3.4.2 *Hidráulica de la red fluvial*

Se refiere a las características de flujo del agua a través de los canales y ríos en la cuenca hidrográfica. La velocidad del agua y la capacidad de transporte de sedimentos son factores importantes en la hidráulica de la red fluvial. El estudio de la hidráulica de la red fluvial puede proporcionar información valiosa para la gestión de los recursos hídricos y la prevención de inundaciones (Anderson 1941, p. 212).

- **Densidad de drenaje**

Es una medida de la cantidad de canales y ríos en una cuenca hidrográfica y se expresa como la longitud total de canales por unidad de área de la cuenca. Es una medida importante de la estructura de la red de drenaje, ya que puede afectar la velocidad de escorrentía y la erosión del suelo en la cuenca hidrográfica (Elosegui y Sabater 2009, p. 44).

- **Tiempo de concentración**

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer la distancia más larga posible en una cuenca hidrográfica hasta llegar al punto de salida. El tiempo de concentración representa el tiempo que tarda en llegar al aforo la última gota de lluvia que cae en el extremo más alejado de la cuenca y que circula por escorrentía directa (Villegas 2014). Puede ser afectada por la velocidad de escorrentía y la erosión del suelo en la cuenca hidrográfica.

- **Sinuosidad de las corrientes**

La sinuosidad de las corrientes se refiere a la medida de la tendencia de un río o arroyo a curvarse o ser tortuoso en su curso. Se calcula como la relación entre la longitud real del río y la distancia lineal entre su fuente y desembocadura. Una mayor sinuosidad indica que el río sigue un curso más serpenteante a lo largo de su recorrido, mientras que una menor sinuosidad sugiere un curso más recto (Cardona et al. 2014, p. 34).

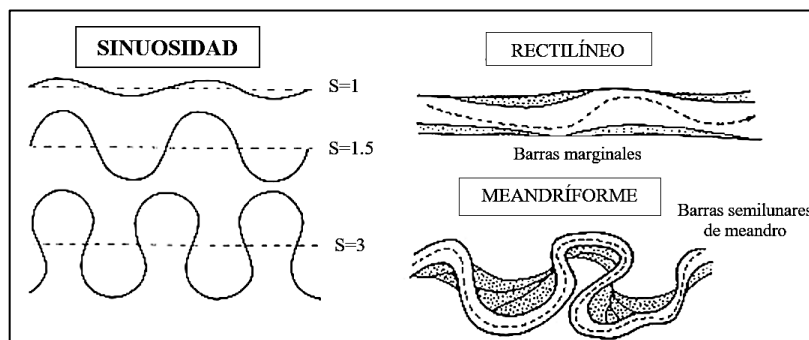


Ilustración 2-6: Tipo de cuasas acorde a su sinuosidad

Fuente: (Cardona et al. 2014, p. 35).

Sinuosidad rectilínea: Se refiere a la característica de una corriente o río que tiene un curso bastante recto y lineal, con curvas y giros mínimos en su trayectoria. En este tipo de sinuosidad, la corriente fluye en una línea más o menos directa desde su origen hasta su desembocadura, sin mostrar un meandro pronunciado. Este patrón puede ser típico en áreas donde el terreno es relativamente plano y no presenta muchas irregularidades geomorfológicas (Cardona et al. 2014, p. 34).

Sinuosidad meandriforme: Se refiere a una corriente o río que exhibe un patrón de serpenteo con numerosos meandros o curvas en su curso. En este caso, el río presenta cambios constantes de dirección, formando bucles, curvas y giros a lo largo de su recorrido. La sinuosidad meandriforme es común en áreas con un terreno más ondulado o montañoso, donde la corriente

encuentra obstáculos naturales que la obligan a seguir una trayectoria más tortuosa. Este patrón puede ser importante para la geomorfología de la región y la formación de características como los humedales y las planicies de inundación. (Cardona et al. 2014, p. 34).

2.3.4.3 *Altimetría del río*

La altimetría del río es el estudio y medición de las variaciones altitudinales a lo largo de su curso. Implica la determinación de la altitud o elevación de la superficie del agua en diferentes puntos a medida que el río fluye desde su fuente hasta su desembocadura. Esta información es fundamental para comprender el perfil topográfico del río y su influencia en los procesos hidrológicos (Elosegui y Sabater 2009, p. 44).

- **Desnivel altitudinal del río**

El desnivel altitudinal del río es la diferencia de elevación entre dos puntos específicos a lo largo de su curso. Se mide calculando la altitud del punto de referencia superior y el punto de referencia inferior. Este parámetro proporciona información sobre la pendiente o inclinación del río en ese tramo particular y puede ser crucial para comprender la velocidad y la dinámica del flujo de agua (Villegas 2014).

- **Altitud media de un río**

La altitud media de un río se refiere al valor promedio de las altitudes en diferentes puntos a lo largo de su recorrido, desde su fuente hasta su desembocadura. Este valor se obtiene sumando las altitudes en varios puntos y dividiéndolas por el número total de puntos de medición. La altitud media proporciona una descripción general de la elevación promedio del río en su curso (Villegas 2014).

- **Altitud mediana de un río**

La altitud mediana de un río es el valor que se encuentra en el punto medio cuando todas las altitudes a lo largo de su recorrido se ordenan de manera ascendente. Esta medida es útil para representar la altitud central de un río y puede ser menos sensible a valores extremos que la altitud media. La altitud mediana contribuye a comprender mejor la variabilidad altitudinal del río en su curso (Anderson 1941, p. 212).

2.3.5 Comportamiento bioclimático

El comportamiento bioclimático se refiere al estudio de los factores climáticos y cómo afectan la vida de los organismos en una determinada región. En este sentido, el comportamiento bioclimático de una zona se relaciona con la temperatura, la humedad, la precipitación, la radiación solar, entre otros factores que influyen en el desarrollo de los seres vivos y en el equilibrio ecológico del ecosistema (Hann et al., 1992, p. 6).

2.3.5.1 Precipitación media

Para estimar esta precipitación media es indispensable basarse en valores puntuales, es decir en valores registrados por una red de pluviómetros. Entre los métodos generalmente propuestos para calcular la precipitación media de una cuenca a partir de registros puntuales obtenidos en varias estaciones pluviométricas sobre la cuenca o en su proximidad, podemos mencionar 3 métodos de uso generalizado: el método del promedio aritmético, el método del polígono de Thiessen y el método de isoyetas. La elección del método dependerá particularmente de la longitud de la serie de datos que disponemos y de la densidad de la red de estaciones (Cardona et al. 2014, p. 34).

2.3.5.2 Temperatura media

Temperatura media anual: promedio de las temperaturas de todo el año en un lugar determinado. Para que este promedio sea representativo de las condiciones climáticas de ese lugar, debe ser calculado sobre la base de un largo período de años; es decir, se hace un promedio de muchas temperaturas medias anuales (Saz y Creus 2008, p. 42).

2.3.5.3 Sistema de Holdridge

El Sistema de Holdridge, desarrollado por el climatólogo estadounidense Leslie Holdridge, es un enfoque integral utilizado para clasificar y comprender los diferentes tipos de climas y ecosistemas en función de tres variables climáticas principales: la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración potencial (Holdridge, 2000, p.10). Este sistema se basa en la idea de que estas tres variables son fundamentales para determinar la distribución de la vegetación y la biodiversidad en un área geográfica dada.

La temperatura se mide en términos de la biotemperatura, que representa el efecto del clima en la actividad biológica, mientras que la evapotranspiración potencial cuantifica la cantidad de agua

que puede evaporarse y ser absorbida por las plantas. Así mismo, la precipitación anual total también se tiene en cuenta para evaluar la disponibilidad de agua.

El Sistema de Holdridge utiliza un diagrama triangular que representa gráficamente estas variables y permite ubicar una región geográfica específica en una de las múltiples "zonas de vida" definidas por el sistema. Cada zona de vida es única en términos de su flora, fauna y condiciones climáticas, lo que facilita la comprensión de la biodiversidad y la ecología en diferentes partes del mundo. Además, este sistema considera la altitud, lo que lo hace especialmente relevante para regiones montañosas como los Andes ecuatorianos, donde las variaciones altitudinales tienen un impacto significativo en los patrones climáticos y la biodiversidad (Saz y Creus 2008, p. 42).

- **Regiones latitudinales**

Las regiones latitudinales, son fundamentales en la climatología terrestre, representan divisiones geográficas que se extienden desde el ecuador hasta los polos, definiendo zonas climáticas en nuestro planeta. La latitud, que es la distancia angular medida a lo largo del meridiano desde la línea ecuatorial hasta un punto específico en la Tierra, se utiliza como referencia para ubicar geográficamente cualquier lugar en nuestro planeta. Su intervalo varía desde los 0° en el Ecuador hasta los 90° N en el Polo Norte o los 90° S en el Polo Sur (Pozo, MacLeod y Knapp 2023).

Esta medida de latitud desempeña un papel esencial en la configuración de los patrones climáticos de la Tierra, ya que influye directamente en la cantidad de energía solar que recibe una región. Las regiones cercanas al ecuador experimentan una mayor exposición a la radiación solar, lo que se traduce en temperaturas más elevadas y niveles de humedad más altos (Holdridge 2000, p. 15). En contraste, las regiones próximas a los polos reciben menos radiación solar, lo que da lugar a temperaturas más frías y condiciones más secas.

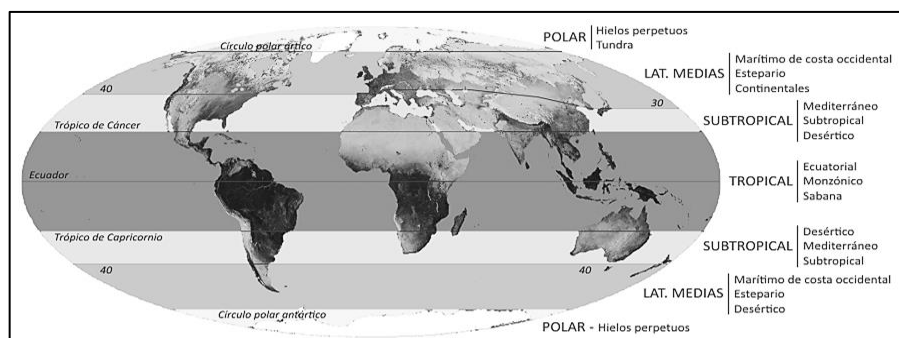


Ilustración 2-7: Esquema de distribución de climas por zonas latitudinales

Fuente: (Sanchez, 2015, p. 12)

- Pisos altitudinales

Los pisos altitudinales representan divisiones distintivas en la topografía de una región montañosa, influenciadas por la altitud y las condiciones climáticas únicas en cada nivel. En Ecuador, un país caracterizado por su variada geografía montañosa, estos pisos comprenden desde el cálido y húmedo piso tropical en altitudes más bajas hasta el frío y ventoso piso parámetro en las cumbres de las montañas (Pozo, MacLeod y Knapp 2023). Cada piso posee características climáticas, vegetación y vida silvestre específicas, adaptadas a sus condiciones particulares. Estos pisos altitudinales desempeñan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad, ya que actúan como refugios para numerosas especies vegetales y animales y contribuyen al mantenimiento del equilibrio ecológico en el país. Su estudio es esencial para comprender la complejidad de los ecosistemas de montaña y su importancia en la preservación de la diversidad biológica (Holdridge 2000, p. 15).

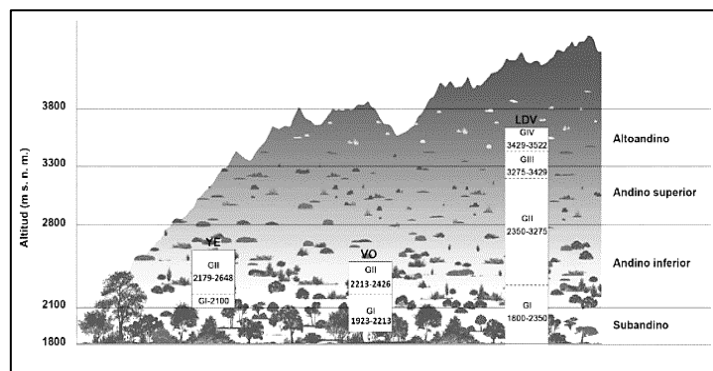


Ilustración 2-8: Distribución de los pisos altitudinales en función de la altura

Fuente: (Rodríguez et al. [sin fecha], p. 6)

- Biotemperatura media anual

Es un parámetro climático que representa una medida compuesta de las condiciones de temperatura y precipitación en una región específica. Esta medida proporciona una indicación crucial de la cantidad de energía disponible para el funcionamiento de los procesos biológicos en un ecosistema dado. Pues combina la temperatura media anual, que influye en las tasas de crecimiento y metabolismo de los organismos, con la precipitación anual, que determina la disponibilidad de agua para la vida vegetal y animal. Esta combinación de factores climáticos permite estimar las condiciones generales de habitabilidad para las especies en una zona particular, ayudando a caracterizar los tipos de ecosistemas y las adaptaciones biológicas que prevalecen en esa área (Cardona et al. 2014, p. 34). La biotemperatura media anual es una herramienta

valiosa en la ecología y la biogeografía, ya que ayuda a identificar y clasificar las distintas zonas de vida presentes en la Tierra, permitiendo comprender mejor la distribución de la flora y fauna en función de las condiciones climáticas predominantes (Holdridge, 2000, p. 14).

- **Amplitud térmica**

La amplitud térmica representa la variación de temperatura en una región durante un período de tiempo, generalmente entre los valores máximos y mínimos registrados en un día. En zonas montañosas como los pisos altitudinales de Ecuador, esta amplitud térmica puede ser particularmente significativa debido a las variaciones altitudinales y las condiciones climáticas cambiantes a diferentes altitudes (Rodríguez et al., n.d., p.21). Esta variabilidad térmica influye en la biodiversidad y los patrones climáticos locales, lo que puede tener un impacto en la erosión hídrica potencial del suelo. Las fluctuaciones de temperatura pueden desencadenar procesos físicos en el suelo, como la expansión y contracción, que afectan su estabilidad y capacidad para resistir la erosión causada por la lluvia y el flujo de agua. Por lo tanto, la amplitud térmica desempeña un papel en la dinámica de los suelos y su susceptibilidad a la erosión hídrica potencial en estas regiones montañosas (Gil, 2009, p. 111).

- **Evapotranspiración potencial**

La Evapotranspiración Potencial (EP) es una medida que representa la cantidad máxima de agua que podría perderse de una superficie vegetada y del suelo debido a la evaporación y la transpiración de las plantas en condiciones climáticas ideales. Se calcula en función de varios factores, como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y la longitud del día. La EP es una estimación teórica y representa el límite superior de pérdida de agua en ausencia de limitaciones de recursos hídricos o restricciones ambientales. Es un indicador importante para comprender la demanda potencial de agua de un ecosistema y cómo puede variar según las condiciones climáticas locales. (Sanchez, 2015, p. 9).

- **Relación de evapotranspiración potencial**

La Relación de Evapotranspiración Potencial es una medida que compara la Evapotranspiración Potencial (EP) con la Precipitación Anual (P) en una región específica. Se calcula dividiendo la EP entre la P y proporciona información sobre la disponibilidad de agua en relación con la demanda potencial de evaporación y transpiración de las plantas. Esta relación es fundamental para comprender el equilibrio hídrico en un ecosistema dado y cómo las condiciones climáticas

afectan la cantidad de agua disponible para las plantas y otros organismos. Cuando la EP es significativamente mayor que la P, puede indicar condiciones áridas o semiáridas, mientras que una EP cercana o menor que la P sugiere un suministro adecuado de agua para mantener la vegetación y los ecosistemas (Holdridge 2000, p. 15). La relación EP/P es una herramienta útil para evaluar la vulnerabilidad de un área a la sequía y para comprender la adaptación de la flora y fauna a diferentes condiciones climáticas.

- **Provincias de humedad**

Las Provincias de Humedad se refieren a las divisiones geográficas en el diagrama de Holdridge que representan las distintas condiciones de humedad relativa en un área determinada. Estas divisiones se basan en la relación entre la Evapotranspiración Potencial (EP) y la Precipitación Anual (PMA). Cada provincia de humedad tiene características climáticas específicas que influyen en la vegetación y los ecosistemas presentes. Las divisiones incluyen desde regiones extremadamente secas hasta áreas altamente húmedas (Holdridge 2000, p. 15). Las Provincias de Humedad son una parte fundamental del sistema de clasificación de Holdridge y permiten identificar patrones climáticos que definen los tipos de vegetación y los ecosistemas predominantes en una región.

- **Zonas de vida**

Las Zonas de Vida representan las áreas geográficas en las que se encuentran ecosistemas y tipos de vegetación similares debido a las condiciones climáticas predominantes. Estas zonas se definen en función de la combinación de factores como la Biotemperatura Media Anual (BMA), la Evapotranspiración Potencial (EP) y la Precipitación Anual (P). Cada Zona de Vida presenta un conjunto característico de comunidades biológicas y se asocia con ciertos tipos de clima y paisajes. Las Zonas de Vida son una herramienta útil para comprender la distribución de la biodiversidad en el planeta y cómo las variaciones climáticas influyen en la ecología de diferentes regiones (Holdridge 2000, p. 15).. La clasificación de Zonas de Vida de Holdridge es ampliamente utilizada en estudios ecológicos y de conservación para describir y comparar los ecosistemas terrestres de todo el mundo.

2.3.6 Erosión hídrica del suelo

La erosión hídrica del suelo se refiere al desgaste y transporte de partículas de suelo causado por la acción del agua. Es un proceso natural que puede ocurrir de manera gradual o acelerada debido

a factores como la intensidad de la lluvia, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo. Esta erosión puede tener impactos significativos en la calidad del suelo, la productividad agrícola y la salud de los ecosistemas (Bienes 2006, p. 15).

2.3.6.1 Etapas de erosión hídrica

La erosión hídrica se inicia con la separación de partículas de la superficie erosionable por el impacto del agua. Luego estas partículas son transportadas se sedimentan o posicionan en un determinado sitio. En este proceso inciden las propiedades del agua y ciertos factores que determinan su acción.

La erosión se produce cuando el agua circula concentradamente en surcos con suficiente volumen y velocidad para producir una fuerza erosiva (Seitz, Prasuhn y Scholten 2020). Después de una tormenta, el agua de lluvia se escurre y si no se usan métodos para conservar el suelo, el agua, al escurrirse, se llevará parte del suelo, lo que da inicio a pequeños canales que al crecer se transforman en surcos (Seitz et al., 2020).

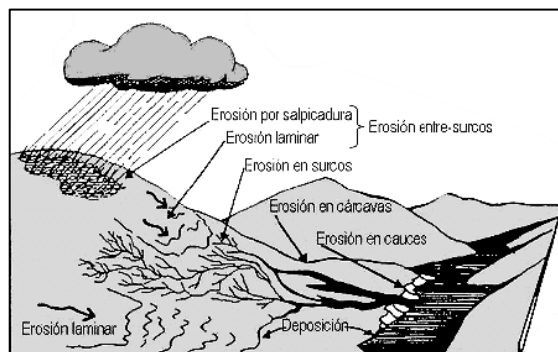


Ilustración 2-9: Tipos de erosión hídrica

Fuente: (Escobar, 2019, p. 31)

- **Erosión por salpicadura**

La erosión por salpicadura es un proceso de erosión inicial que puede ocurrir en la superficie expuesta del suelo, ya sea en áreas agrícolas, terrenos baldíos o áreas sin cobertura vegetal. Aunque la erosión por salpicadura no remueve grandes volúmenes de suelo, puede contribuir a la degradación de la calidad del suelo y al desprendimiento de partículas finas. La magnitud de la erosión por salpicadura depende de varios factores, como la intensidad de las precipitaciones, el tamaño de las gotas de lluvia, la pendiente del terreno y la estructura del suelo (García, 2017, p. 63).

- **Erosión laminar**

También conocida como erosión en láminas, es el tipo de erosión más común y se produce cuando una capa fina y uniforme de suelo se desprende de la superficie debido al impacto directo de las gotas de lluvia o al flujo de agua en láminas. Este tipo de erosión es generalmente imperceptible a simple vista y puede ser el precursor de otros tipos de erosión más intensa (Escobar 2019, p. 33).

- **Erosión entre-surcos**

Es un tipo de erosión que ocurre en áreas agrícolas y se produce entre las hileras de cultivo, especialmente en suelos con pendientes pronunciadas. En este proceso, el agua de lluvia se acumula entre las filas de cultivo y puede arrastrar el suelo, especialmente si no hay una cobertura vegetal adecuada para protegerlo (Aber et al., 2010, p. 18).

- **Erosión por surcos**

Consiste en la formación de surcos superficiales en la capa superior del suelo debido al flujo de agua. Estos surcos pueden interrumpir la infiltración del agua y aumentar la velocidad de escorrentía, lo que a su vez aumenta el riesgo de erosión en áreas cercanas (Aber et al., 2010, p. 18).

- **Erosión por cárcavas**

Se refiere a la formación de cárcavas o surcos profundos causados por el flujo concentrado de agua a través del suelo. Estas cárcavas son erosiones lineales que pueden ser muy destructivas y conducir a la pérdida significativa de suelo en un corto período de tiempo (Kenny et al., 2018, p.6).

- **Erosión en cauces**

Este tipo de erosión se refiere al desgaste y excavación del lecho y las paredes de un cauce o curso de agua debido al flujo constante o esporádico de agua. La erosión en cauces puede modificar la forma del cauce y la topografía del paisaje, afectando la estabilidad de los ríos y riachuelos, y aumentando el transporte de sedimentos aguas abajo (Johnson et al., 2005, p. 19).

2.3.6.2 Proceso de erosión hídrica en zonas altoandinas

La erosión hídrica del suelo en zonas altoandinas, como los páramos, es un fenómeno importante debido a las características particulares de estas regiones montañosas. En los páramos, la presencia de suelos poco desarrollados, pendientes pronunciadas y una alta incidencia de lluvias intensas contribuyen a la erosión del suelo (Manchabajoy y Polanco, 2018, p. 4). Los principales procesos de erosión hídrica en zonas altoandinas incluyen la escorrentía superficial, la erosión en surcos y cárcavas, así como la erosión laminar.



Ilustración 2-10: Transporte de las partículas de suelo desprendidas

Fuente: (Gutiérrez y Pinzón 2017, p. 19)

El proceso de erosión hídrica del suelo en zonas altoandinas involucra diferentes etapas y factores que contribuyen a la pérdida de suelo y sedimentos. A continuación, se describen cada uno de estos elementos:

- **Tamaño e impacto de la gota de lluvia**

El tamaño de las gotas de lluvia es un factor determinante en el proceso de erosión hídrica. Gotas de mayor tamaño tienen mayor capacidad de desprendimiento de partículas del suelo y generan un impacto más fuerte al caer sobre la superficie del suelo (Gutiérrez y Pinzón 2017, p. 19). A medida que aumenta el tamaño de las gotas y su intensidad, su capacidad de desprendimiento de partículas del suelo se incrementa considerablemente (Ares 2017). Las gotas de lluvia de mayor tamaño y alta intensidad pueden causar salpicaduras, dispersando partículas de suelo en diferentes direcciones. Estas partículas, conocidas como sedimentos, pueden ser transportadas por el agua

superficial o por el viento, contribuyendo a la erosión del suelo. Además, el impacto directo de las gotas de lluvia de mayor tamaño puede provocar la desagregación del suelo en pequeñas partículas, facilitando su transporte y aumentando la pérdida de suelo en la superficie (Serio et al., 2019).

- **Salpicado y dispersión del suelo**

Cuando las gotas de lluvia impactan sobre el suelo desnudo, pueden producir salpicaduras que dispersan partículas de suelo en diferentes direcciones. Estas partículas pueden ser transportadas por la acción del viento o el agua (Batalla y Poch 1978, p. 13). Pueden generar procesos de erosión laminar y erosión en láminas, contribuyendo a la pérdida de suelo y nutrientes en la superficie afectada. Además, cuando el flujo de agua es más intenso, la erosión laminar puede dar paso a la erosión por surcos y cárcavas, especialmente si el suelo está desprotegido y no cuenta con una adecuada cobertura vegetal para retenerlo (Serio, Carollo y Ferro 2019). La erosión resultante puede tener un impacto significativo en la calidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la sostenibilidad de los ecosistemas circundantes.

- **Escorrentía superficial**

Se produce cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo y el agua fluye sobre la superficie del terreno en lugar de infiltrarse en el suelo (Ortiz y Godoy [sin fecha], p. 60). Este flujo de agua puede moverse rápidamente a través de pendientes, canales y cursos de agua, y puede transportar sedimentos y partículas de suelo desprendidas durante el proceso de erosión hídrica (Escobar 2019, p. 16). Las partículas de suelo desprendidas por la erosión hídrica pueden ser transportadas por la escorrentía o por corrientes de agua. A medida que el flujo de agua disminuye, las partículas sedimentan y se depositan en el lecho de los ríos, embalses u otros cuerpos de agua (Quispe 2022, p. 26).

- **Erosión potencial**

Se refiere a la máxima cantidad de suelo que puede ser erosionada en ciertas condiciones climáticas y topográficas (Veas, 2015, p.40). Representa el potencial máximo de erosión hídrica en un área determinada y está influenciada por factores como la intensidad y distribución de la lluvia, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y la erosividad del suelo. La erosión potencial es una estimación teórica utilizada para evaluar el riesgo de erosión y planificar medidas de conservación del suelo (Jumbo 2018, p. 18).

- Tasas de erosión tolerable

Las tasas de erosión tolerable son los límites establecidos para la pérdida de suelo aceptable en una determinada área. Estas tasas varían según la capacidad de recuperación del suelo y los impactos ambientales y productivos asociados a la erosión (Peña 2023, p. 24). De acuerdo con la clasificación de las pérdidas de suelo propuestas por Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) las tasas de erosión hídrica son:

Tabla 2-2: Tasas de erosión tolerable

Nivel de erosión	Perdida de suelo (T/ha/año)
Muy bajo	Menor de 5
Bajo	5-10
Medio	10-25
Alto	25-50
Muy alto	Mayor de 50

Fuente: (Santos y Orrego 2016, p. 41)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023)

2.3.7 Ecuación universal de pérdida de suelo revisada

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), por sus siglas en inglés) es un modelo matemático utilizado para estimar la erosión del suelo en una determinada área. Esta ecuación tiene en cuenta diversos factores que contribuyen a la erosión, como la pendiente del terreno, la erosividad de la lluvia, la erosión causada por el uso del suelo y la cobertura vegetal, y la erosión debida a prácticas de conservación del suelo (Mancilla, 2008, p. 25). RUSLE se basa en la premisa de que la erosión del suelo es el resultado de la interacción compleja entre factores climáticos, topográficos y de uso del suelo. Al combinar estos factores en una ecuación, se puede calcular la tasa de pérdida de suelo por unidad de área en un sitio específico.

2.3.7.1 Factor R

El factor R o erosividad de la lluvia se define como la capacidad de la lluvia para producir erosión. Esta capacidad se cuantifica por la energía necesaria para desagregar el suelo en partículas individuales, que luego serán transportadas por la escorrentía (Batalla y Poch 1978, p. 11). La

energía se calcula en base a la energía cinética de la precipitación y esta a su vez se corresponde a las características físicas de la lluvia como el tamaño de la gota, masa, velocidad de caída (Rodríguez, 2021, p. 27). Para la estimación de este factor se pueden utilizar diferentes ecuaciones como la ecuación del tipo Fournier

- **Índice modificado de Fournier**

Este índice modificado de Fournier (IFM) caracteriza la agresividad de la precipitación y se calcula para cada año y luego se calcula el promedio de los años. Fue propuesto por Arnoldus en 1980 y es una corrección del IF que considera la precipitación de todos los meses y no solo la precipitación mensual del mes más húmedo como anteriormente se calculaba con el IFM (Jordán y Bellinfante 2000, p. 86).

2.3.7.2 *Factor K*

El factor K o factor de erodabilidad del suelo expresa la susceptibilidad del suelo a sufrir pérdidas de suelo por erosión y es función de características edáficas tales como textura, estructura, estabilidad de agregados, pedregosidad superficial, entre otros (Gisbert, Ibáñez y Moreno [sin fecha], p. 3). El factor K considera la susceptibilidad del suelo a erosionarse asociada a propiedades como la textura, contenido de carbono orgánico, el tipo de estructura y la permeabilidad (Miranda y Vilorio 2020, p. 54).

- **Taxonomía del suelo**

La clasificación y descripción taxonómica de los suelos en una cuenca hidrográfica permiten identificar diferentes tipos de suelos con características únicas. Estas características, como la textura, estructura, contenido de materia orgánica y permeabilidad influyen en la tasa de desprendimiento y transporte de partículas del suelo durante eventos de erosión hídrica. Además, la taxonomía del suelo también proporciona información valiosa sobre la susceptibilidad de cada tipo de suelo a la erosión, la capacidad de retención de agua y nutrientes, y la estabilidad de la superficie del suelo (Cardoso et al. 2013).

- **Estrato vertical de suelo**

Se refiere a las capas u horizontes específicos del suelo que son más susceptibles a los procesos erosivos causados por el escurrimiento del agua. Estos estratos suelen ubicarse en las primeras

profundidades del suelo, generalmente en los primeros centímetros a decenas de centímetros bajo la superficie (Gaitán et al. 2017) . La erosión hídrica puede afectar a estos horizontes de suelo, removiendo partículas de suelo, nutrientes y materia orgánica, lo que puede tener graves consecuencias en la calidad del suelo y la salud de los ecosistemas (Alvarado et al. 2007). Su análisis es esencial para comprender cómo la erosión afecta la estructura y composición del suelo en una cuenca hidrográfica, así como para identificar las zonas críticas donde se produce la pérdida de suelo debido a la acción del agua.

- **Propiedades físicas y químicas del suelo**

Arena: La arena es un material granular que se encuentra en el suelo y está compuesta por partículas de tamaño entre 0.05 y 2 mm. La arena es importante para la permeabilidad del suelo y para la retención de agua (Cabrera 1999, p. 7).

Limo: material granular que se encuentra en el suelo y está compuesto por partículas de tamaño entre 0.002 y 0.05 mm. El porcentaje de limo en un suelo es un indicador de la retención de agua en el suelo (Thompson y Troeh 2021, p. 71).

Arcilla: Es un material granular que se encuentra en el suelo y está compuesta por partículas de tamaño menor a 0.002 mm. El porcentaje de arcilla es un indicador de la retención de agua en el suelo para la fertilidad del mismo (Thompson y Troeh 2021, p. 71).

Carbono orgánico: El carbono orgánico es un componente importante del suelo que influye en la fertilidad del mismo. Es una fuente importante de nutrientes para las plantas y ayuda a retener agua en el suelo (Burbano 2018, p. 84).

- **Análisis textural**

El análisis textural es una técnica que se utiliza para determinar la proporción relativa de las partículas minerales en un suelo. Se utiliza para clasificar los diferentes tipos de suelos según sus propiedades físicas. Esto proporciona información importante sobre su estructura, capacidad de retención de agua, drenaje, fertilidad y manejo agrícola. También puede ayudar a comprender la erosión del suelo y la capacidad de infiltración del agua (Pellegrini 2019, p. 5).

2.3.7.3 *Factor L.S*

El factor L.S o factor topográfico es el producto de los factores de longitud (L) y pendiente (S) y refleja la interacción entre la longitud de la pendiente y su inclinación en la erosión del suelo. Indica cómo la combinación de la longitud de la pendiente y su inclinación afecta la erosión (Roffe, Penteadó y Pérez [sin fecha], p. 5). Este factor tiene en cuenta la influencia de la topografía de un área, incluyendo su pendiente y longitud de las pendientes, lo puede afectar significativamente la velocidad y el patrón de la escorrentía superficial, lo cual a su vez influye en la erosión del suelo (González, 1991, p. 38). Se utiliza para cuantificar el efecto combinado de la longitud de la ladera y la pendiente de la ladera en la erosión del suelo. Valores más altos de Factor L.S indican una mayor susceptibilidad a la erosión, mientras que valores más bajos indican una menor susceptibilidad.

- **Factor L**

Representa la longitud de la pendiente y cuantifica el efecto de la longitud de la pendiente en la erosión del suelo. Indica cómo la longitud de una pendiente afecta la tasa de erosión. Un valor mayor de Factor L sugiere que una pendiente más larga aumenta la probabilidad de erosión del suelo, ya que el agua puede recorrer una mayor distancia y acumular más energía a medida que fluye cuesta abajo (Roffe, Penteadó y Pérez [sin fecha], p. 5).

- **Factor S**

Se refiere al grado de la pendiente y evalúa cómo la inclinación de la pendiente influye en la erosión del suelo. Representa el efecto de la pendiente en la tasa de erosión. A medida que la pendiente aumenta, el Factor S también aumenta, indicando un mayor riesgo de erosión en áreas con pendientes pronunciadas (Roffe, Penteadó y Pérez [sin fecha], p. 5).

2.3.7.4 *Factor C*

El Factor C o factor cobertura de cobertura vegetal y uso del suelo, es uno de los componentes del modelo RUSLE, desempeña un papel crítico al considerar la interacción entre la cobertura vegetal y el uso del suelo en relación con la erosión hídrica. Su función es proporcionar una evaluación cuantitativa del potencial de erosión del suelo en una determinada área geográfica, teniendo en cuenta las características específicas de la vegetación y el manejo del suelo (Colman et al. 2018). Este factor, basado en la observación empírica de la influencia de la vegetación y el

uso del suelo en la erosión, se expresa en términos de un valor adimensional que refleja la tasa de erosión potencial en relación con una situación de referencia específica (FAO y MADS 2018). La cuantificación de este factor en el campo de la conservación evaluar de manera precisa la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica en un contexto particular.

2.2.6.2 Factor P

El Factor P o factor de prácticas de conservación del suelo, como parte integral del modelo RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada), es una variable fundamental en la evaluación precisa de la erosión hídrica en un área determinada. Este componente considera de manera específica las prácticas y medidas de conservación del suelo aplicadas en la región y su impacto en la mitigación de la erosión hídrica (FAO & MADS, 2018, p.10).

Las prácticas de conservación del suelo abarcan un conjunto diverso de estrategias y técnicas diseñadas para salvaguardar la calidad del suelo y reducir al mínimo las pérdidas de suelo debidas a la erosión. Estas prácticas pueden incluir la construcción de estructuras como terrazas y diques, la aplicación de técnicas de siembra en curvas de nivel, la implementación de barreras vivas utilizando vegetación protectora, la utilización de cubiertas vegetales protectoras como cultivos de cobertura y pastizales, y la adopción de sistemas agroforestales, entre otras (IDEAM, 2011, p.91). Al evaluar esta variable, se obtiene una comprensión detallada de cómo las decisiones de manejo del suelo y las acciones de conservación afectan la estabilidad del suelo y la protección de los recursos naturales.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Zona de Estudio

La elección de las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan como zona de estudio se justifica por su vital importancia en el suministro de recursos hídricos para la región de Chimborazo, Ecuador. Estas microcuencas abarcan una diversidad geográfica que va desde áreas de alta montaña hasta zonas más bajas, lo que proporciona una visión integral de los procesos hidrológicos en la región. Además, su representatividad las convierte en ejemplos aplicables a otras áreas similares, mientras que su vulnerabilidad ambiental plantea desafíos significativos en términos de erosión del suelo y degradación de ecosistemas.

El análisis de estas microcuencas no solo tiene un impacto ambiental crítico en la conservación de ecosistemas locales y la protección de la biodiversidad, sino que también influye en la seguridad hídrica y el bienestar socioeconómico de las comunidades que dependen de ellas. La gestión sostenible de estas microcuencas es esencial para mitigar riesgos como inundaciones, sequías y pérdida de suelos fértiles, lo que a su vez tiene un efecto positivo en la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de la región. Por lo tanto, el enfoque en microcuencas permite un análisis detallado a nivel local, lo que facilita la identificación de problemas específicos y la implementación de estrategias de manejo más efectivas en comparación con el análisis a nivel de subcuencas o cuencas hidrográficas más grandes. Esto es especialmente relevante en un contexto de conservación de recursos hídricos y sostenibilidad ambiental, contribuyendo tanto al desarrollo socioeconómico como a la preservación del entorno natural.

3.1.1 Localización de la zona de estudio

Las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan abarcan diversas parroquias en la provincia de Chimborazo, incluyendo la parroquia Cebadas en el cantón Guamote, que abarca la totalidad del área de los ríos de la microcuenca de Atillo y Yasepan, además de una parte del área de la microcuenca del río Ozogoche. El resto del territorio de la microcuenca de Ozogoche se encuentra en las parroquias de Guamote y Achupallas del cantón Alausí. La parroquia Cebadas es el lugar de origen de los ríos Atillo y Ozogoche, que se unen para formar el río Cebadas. Más adelante, el río Cebadas se encuentra con el cauce del río Yasepan. Estos tres ríos, junto con otros afluentes, se combinan para dar origen al río Cebadas. Posteriormente, el río Cebadas se une con los ríos

Guamote, Chibunga y Guano, formando así el río de la subcuenca de Chambo. Este último, después de su formación, desemboca en la cuenca hidrográfica del río Pastaza, contribuyendo al sistema hidrográfico más amplio de la región, que a su vez alimenta el flujo de agua hacia el río Amazonas (PDYOT Parroquia Cebadas, 2019, p. 413)

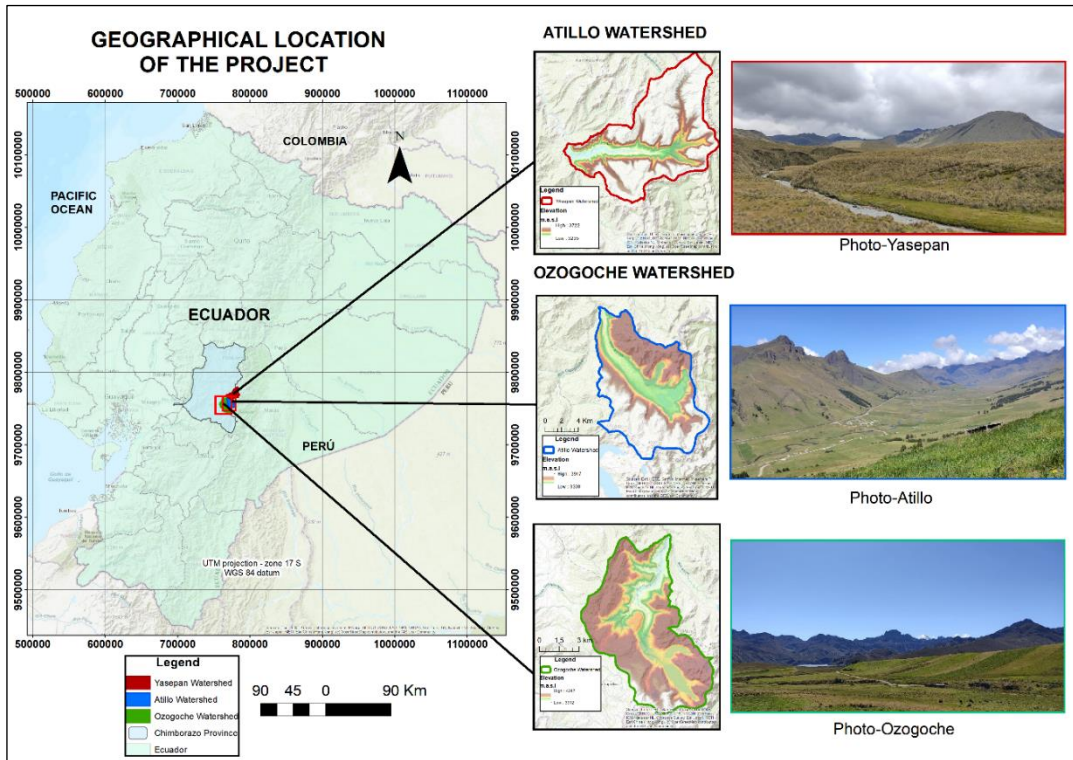


Ilustración 3-1: Ubicación de las microcuencas de estudio

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023)

3.2 Corrección y depuración de un modelo de elevación digital

Previo a la descarga del MDE se consideró el nivel de procesamiento 2.1 que es un producto ortorrectificado a partir de los datos del nivel 1.1 para el uso de un modelo digital de elevación. (GeoSpatial 2015). Se cargó el MDE al Software Arcgis y se la identificaron vacíos. Para el efecto se corrigió y depuró el MDE siguiendo una serie de herramientas los cuales se emplearon de la siguiente forma:

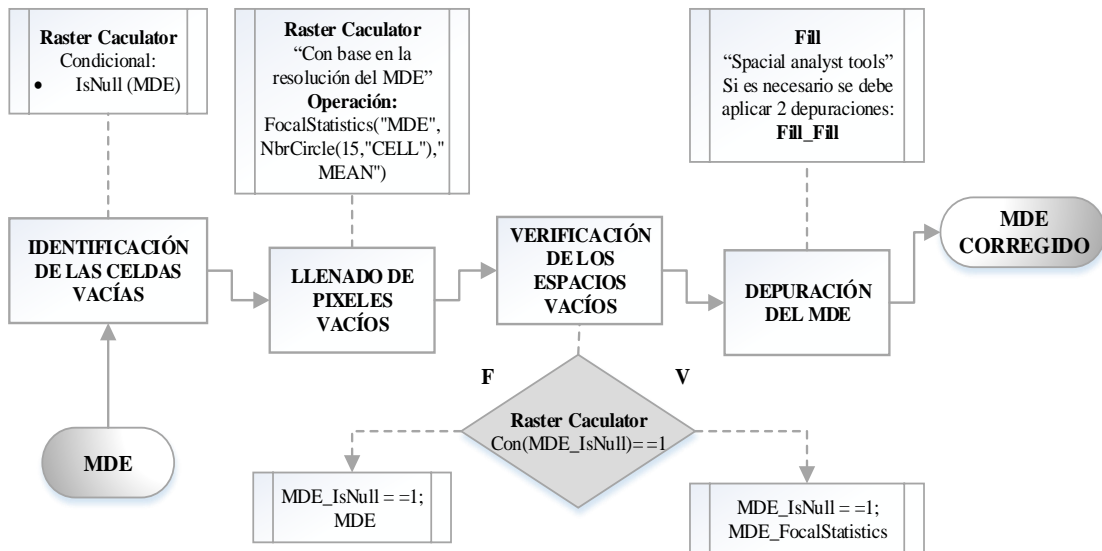


Ilustración 3-2: Algoritmo para corregir el Modelo de elevación

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.3 Análisis de la red hidrográfica de las unidades hidrográficas

3.3.1 Delimitación de las unidades hidrográficas de Atillo, Ozogoché y Yasepan

Para delimitar las unidades hidrográficas de estudio se usó una serie de algoritmos del software ArcGis. De manera automática, se hizo el uso de herramientas de hidrología, tomando como producto inicial un modelo de elevación digital previamente corregido y depurado. A través de las herramientas mostradas en el diagrama de flujo se puede ver como a través del modelo de elevación digital se puede obtener los rasters de dirección y acumulación de los flujos, así también el shapefile de la red hidrográfica.

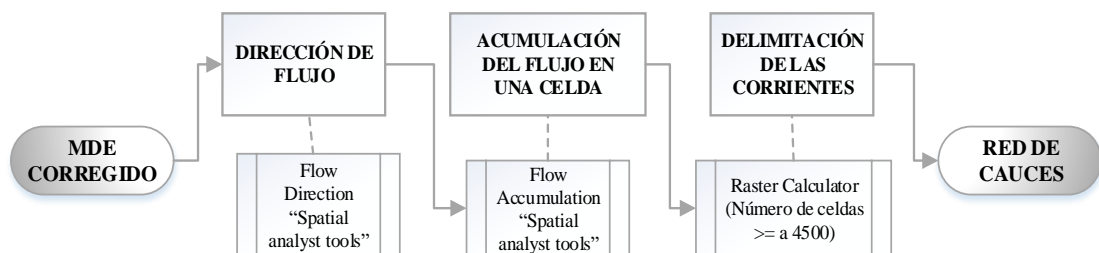


Ilustración 3-3: Algoritmo para crear los insumos de la red de cauces

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.3.2 Demarcación de la red hidrográfica

Se determinó la red de drenaje a través de la red de cauces con las herramientas mostradas en el diagrama de flujo determinando. De los cauces, se extrajeron los órdenes y la morfometría de los drenajes consecutivamente.

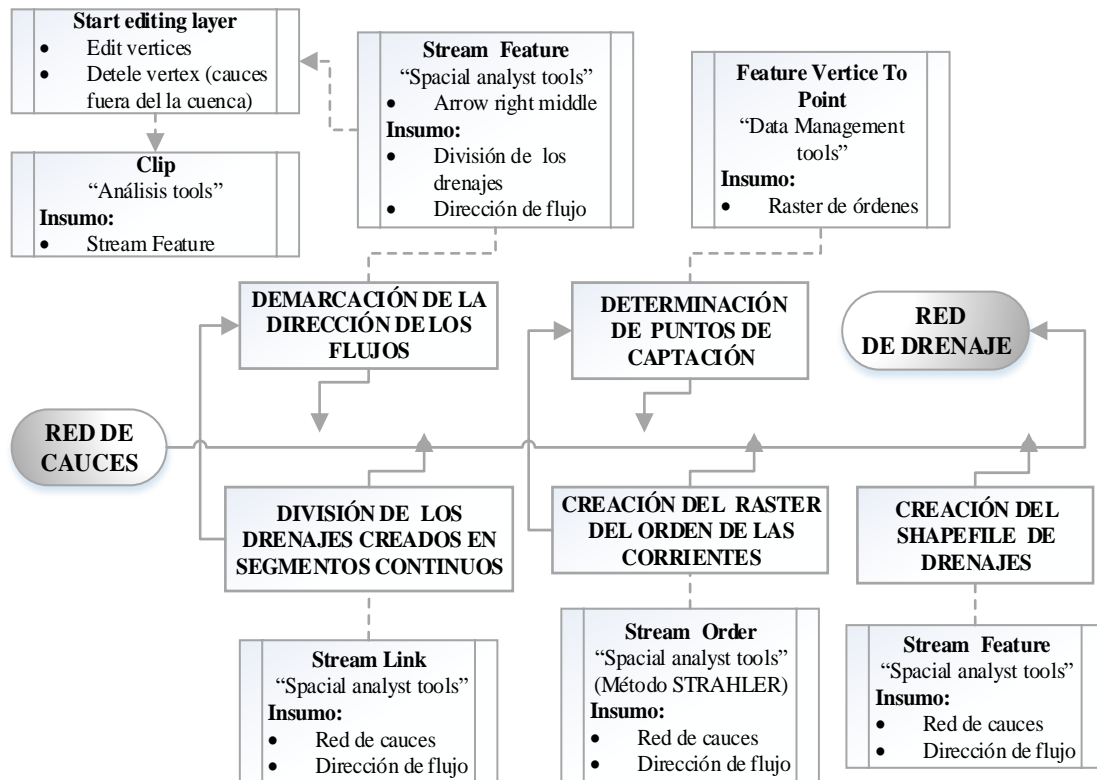


Ilustración 3-4: Algoritmo para crear la red de drenaje

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.3.3 Jerarquización de la red fluvial

Consiste en dividir la red hídrica en segmentos de cauces de diverso orden, en función al número del orden que presenten. Se entiende que un segmento de cauce es de primer orden cuando es uno de los extremos de la red que no recibe tributarios, es decir, discurren desde una fuente o nacimiento hasta la confluencia con otro. Los de segundo orden se forman cuando confluyen dos de primer orden, los de tercero por la confluencia de dos de segundo, y así sucesivamente. Si confluyen dos ríos de órdenes distintos, el orden del cauce resultante será el valor del río de mayor orden. (Vega 2020, p. 76). A continuación, se presenta un esquema de cómo se jerarquiza la red hídrica desde las aportaciones hasta los tributarios de cada rama:

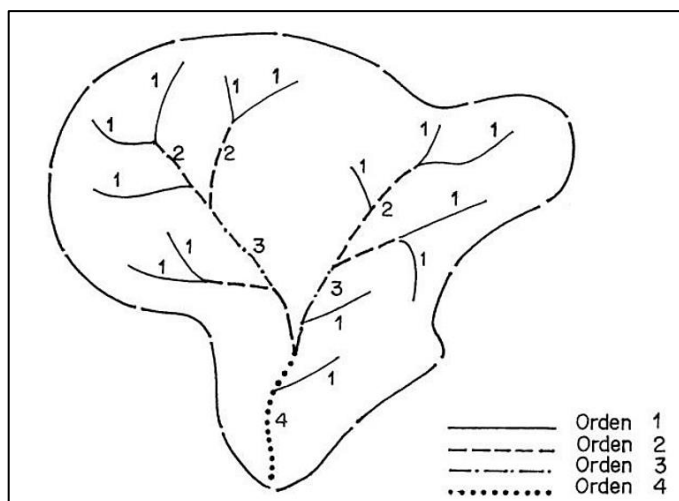


Ilustración 3-5: Grafica de red de drenaje según Horton-Strahler

Fuente: (Vega, 2020, p. 75)

Mediante la aplicación de la metodología, se detalló demarcación de la dirección de los flujos en la red hidrográfica. Esto implica dividir y organizar los distintos cauces según sus longitudes. Es importante destacar las siguientes características para conocer en función del orden qué características tiene el comportamiento de los cauces:

Tabla 3-1: Características de los órdenes en la jerarquización de red fluvial

Corrientes	Características
Primer orden	Pequeños canales que no tienen tributarios
Segundo orden	Cuando dos corrientes de primer orden se unen
Tercer orden	Cuando dos corrientes de segundo orden se unen
De orden $n + 1$	Cuando dos corrientes de orden n se unen

Fuente: (Vega 2020, p. 76).

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.4 Estimación de las geomorfometrías de las unidades hidrográficas

3.4.1 Determinación de parámetros físicos

Cada uno de los parámetros físicos se determinó a través de la red de drenaje, desde la delimitación del perfil de la cuenca para obtener el polígono de la cuenca y a partir esta demarcación se obtienen los parámetros principales incluyendo los centroides para conocer la ubicación central a nivel de longitud, latitud y altitud. Además, se determinó el centroide Z para conocer la elevación de todo el perfil.

3.4.1.1 Cálculo del área (A), perímetro (P) y centroides (C)

Dentro de los parámetros más destacados que se tomó en cuenta en los parámetros físicos es la delimitación de las cuencas hidrográficas. Se calculó por medio de las herramientas de ArcGIS los parámetros generales como área, perímetro, y centroides, por su parte las herramientas en la tabla de atributos no permiten calcular el valor del centroide Z que viene a hacer el centroide basado en la altimetría de la zona de estudio. Por lo que se emplea la herramienta de Interpolate Shape para encontrar el valor Z, a continuación, se describe el proceso:

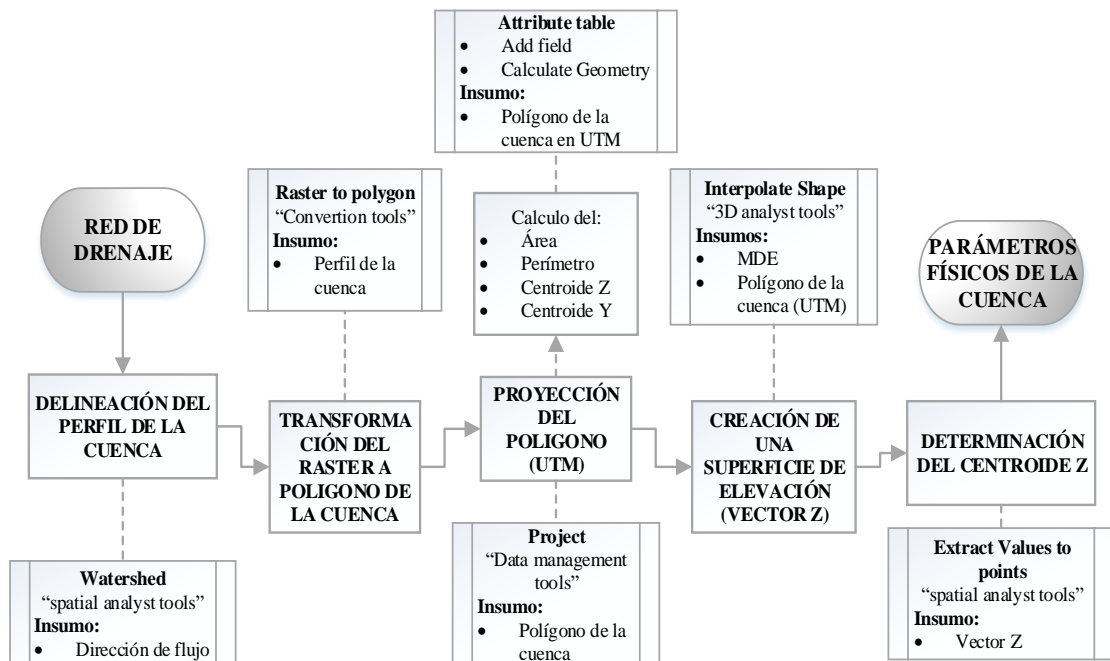


Ilustración 3-6: Algoritmo para determinar los parámetros físicos de una cuenca hidrográfica

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.4.1.2 Estimación de longitud axial de la cuenca (Lax)

Con la herramienta measure se midió directamente la longitud de la cuenca desde la parte baja de la cuenca hasta la más alta, tratando que el recorrido de la línea de medición vaya ajustándose al centro del perfil y forma de la cuenca, de modo que cada segmento vaya delimitando el centro geométrico de la cuenca, abarcando así toda el área de la misma (Verdugo 2017, p. 31).

3.4.1.3 Cálculo de ancho de la cuenca (W)

Con base en las mediciones de (Verdugo, 2017, p. 31). Se determinó el ancho de cuenca determinando la relación entre la superficie (A) y la longitud axial obtenida en kilómetros de la cuenca (L) con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{A}{La}$$

Donde:

A: superficie de la cuenca en km^2 .

L: longitud de la cuenca en km.

3.4.2 Determinación de parámetros de forma

3.4.2.1 Cálculo del coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)

Para determinar este valor se tomó en cuenta, la metodología de (Verdugo 2017, p. 31). Esta metodología emplea una ecuación específica para calcular el coeficiente de compacidad, que es un indicador crucial en la caracterización de la forma de las cuencas hidrográficas:

$$kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Donde:

Kc: Coeficiente de Graveluis

P: Perímetro de la cuenca, en km

A: Superficie de la cuenca, en km^2

Se verificó los valores de Kc en la siguiente tabla:

Tabla 3-2: Intervalos del coeficiente de compacidad

Kc	Clasificación	Característica de la cuenca
1 a 1,25	Casi redonda a oval redonda	Poseen tiempos de concentración más cortos y son más susceptibles a inundaciones rápidas después de un evento de precipitación
1,26 a 1,5	Oval redonda a oval oblonga	Posee tiempos de concentración más largos y son menos susceptibles a inundaciones rápidas después de un evento de precipitación
1,51 o > 2	Oval oblonga a rectangular oblonga	Son muy alargadas o rectangulares. pueden tener los tiempos de concentración más largos y ser las menos susceptibles a inundaciones rápidas después de un evento de precipitación

Fuente: (Verdugo 2017, p. 31)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.4.2.2 Valoración del factor de forma (Kf)

Este parámetro es fundamental en la evaluación de la capacidad de una cuenca para enfrentar inundaciones, ya sean repentinas y de gran magnitud o de desarrollo gradual y mayor duración, dependiendo de su forma y ubicación geográfica. Visualmente se comparó con la siguiente grafica para tener una idea del comportamiento hidrológico del caudal:

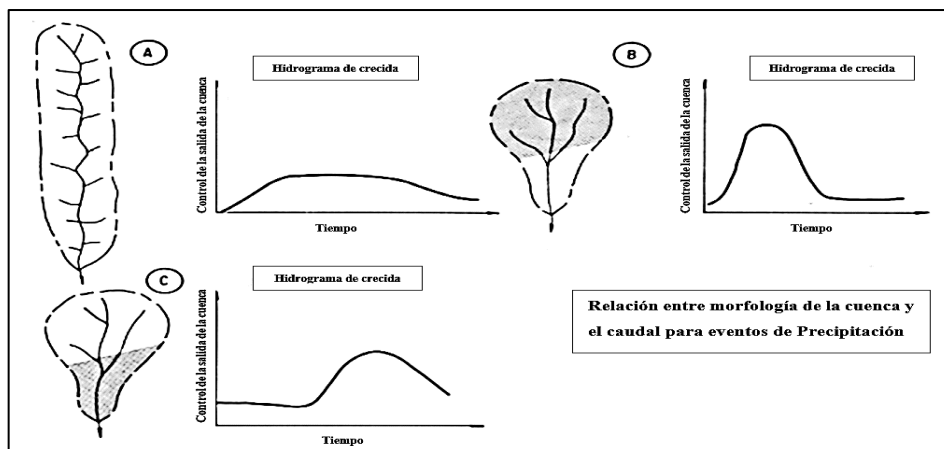


Ilustración 3-7: Grafica de relación entre morfología y caudal de precipitación

Fuente: (Vega, 2020, p. 75)

Las curvas de caudal representadas en los hidrogramas de crecidas varían en función de la forma de cuenca si es ensanchada o alargada y también de donde se concentra el flujo, la concentración del flujo depende de la precipitación incidente en la cuenca hidrográfica, como se muestra en la. Para este factor K_f se consideró en la relación entre el área (A) de la cuenca y longitud axial (Lax).

$$Kf = \frac{A}{L\alpha^2}$$

Donde:

Kf: factor de Horton (Adimensional)

A: Área de la cuenca (Km²)

Lax: Longitud axial de la cuenca (km)

Se verificó el intervalo del parámetro medido a través de la siguiente tabla:

Tabla 3-3: Intervalos en la forma de la cuenca

Intervalo de Valores	Forma de la Cuenca	Descripción
< 0,22	Muy Alargada	Cuencas con esta forma tienden a tener un drenaje más lento y uniforme
0,22 – 0,30	Alargada	Estas cuencas pueden tener un drenaje más eficiente debido a su forma alargada
0,3 – 0,37	Ligeramente alargada	Estas cuencas pueden tener un equilibrio entre la eficiencia del drenaje y la retención de agua
0,37 – 0,45	Ni alargada ni ensanchada	Estas cuencas tienen una forma equilibrada que puede conducir a un escurrimiento uniforme
0,45 – 0,60	Ligeramente ensanchada	Estas cuencas pueden retener más agua debido a su forma ensanchada
0,60 – 0,80	Ensanchada	Estas cuencas pueden tener una mayor capacidad de retención de agua debido a su forma ensanchada
0,80 – 1,12	Muy Ensanchada	Cuencas con esta forma pueden tener la mayor capacidad de retención de agua
> 1,20	Rodeando el desagüe	Estas cuencas tienen una forma única que puede influir en los patrones de escurrimiento de manera específica

Fuente: (Ramos et al. 2020)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.4.2.3 Cálculo del coeficiente de masividad (Km)

Este coeficiente se basa en la relación entre la elevación media y su área de la cuenca (Verdugo 2017, p. 45). Revela que valores bajos corresponden a cuencas montañosas y valores altos indican que son cuencas planas. El resto de los intervalos se verificaron en la siguiente tabla:

$$Km = \frac{h}{A}$$

Donde:

Km: Coeficiente de masividad

h: Altura media (m²)

A: Área de la cuenca (Km²)

Se tomó en cuenta la siguiente tabla para comparar los valores del coeficiente de masividad.

Tabla 3-4: Clases de valores de masividad

Intervalo de coeficiente (Km)	Clases de masividad	Descripción
0 – 35	Muy Montañosa	Estas áreas tienen una topografía muy accidentada con pendientes empinadas y altitudes elevadas.
35 - 70	Montañosa	Estas áreas tienen una topografía accidentada con pendientes moderadas y altitudes intermedias.
70 - 105	Moderadamente montañosa	Estas áreas tienen una topografía menos accidentada con pendientes más suaves y altitudes más bajas.

Fuente: (Verdugo 2017, p. 32)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.4.3 *Determinación de parámetros de relieve*

3.4.3.1 *Aproximación de la pendiente media de la cuenca (Pmc)*

La pendiente media de la cuenca se determinó estimando la media ponderada de todas las pendientes de las superficies elementales en las que se considera constante la máxima pendiente tiene una dependencia con la infiltración del suelo, y la atribución del agua subterránea a la escorrentía en zonas con gran desnivel los problemas más comunes es la erosión del suelo; mientras que en las zonas planas hay problemas con el flujo de agua y la sedimentación (Verdugo 2017, p. 33).

Se aproximó el valor de la pendiente media a través de la siguiente ecuación:

$$Pmc = 100 * \frac{\sum Li * E}{A}$$

Donde:

J: Pendiente media de la cuenca (%)

Li: Longitud de cada una de las curvas de nivel (km)

E: Equidistancia de las curvas de nivel (km)

A: Área de la cuenca (Km²)

3.4.3.2 Caracterización del tipo de relieve

La caracterización del tipo de relieve se llevó a cabo utilizando la pendiente media de la cuenca como indicador. Para determinar el tipo de relieve, se dividió la pendiente media en intervalos de porcentaje y se clasificaron de la siguiente manera:

Tabla 3-5: Clasificación del tipo de relieve en función de la pendiente media

Pendiente media (%)	Tipo de relieve	Características de los relieves
0-3	Plano	Presenta pendientes muy suaves o incluso superficies casi planas. Por lo general, es propicio para la formación de llanuras aluviales y áreas de terreno nivelado.
3--7	Suave	El relieve suave incluye pendientes ligeras a moderadas. Puede presentar pequeñas colinas y valles. En general, es un terreno que no es muy accidentado ni abrupto.
7--12	Medianamente accidentado	Presenta pendientes más marcadas y puede incluir colinas y valles de mayor tamaño. Las pendientes no son lo tan pronunciadas como para ser consideradas abruptas.
12--20	Accidentado	Se caracteriza por pendientes considerables y variaciones topográficas significativas. Pueden encontrarse montañas, valles profundos y terreno que puede resultar desafiante para la construcción y la agricultura.
20-35	Fuertemente accidentado	Posee pendientes aún más pronunciadas y pueden incluir terrazas escalonadas y zonas de alto relieve. Suele ser de difícil acceso ya que se presenta en áreas montañosas o terrenos accidentados.
35-75	Muy fuertemente accidentado	Es un relieve extremadamente accidentado con pendientes muy pronunciadas, acantilados y áreas de alta altitud. Estas áreas se hallan en zonas de alta montaña y pueden ser inhóspitas.
50-75	Escarpado	Presenta pendientes extremadamente empinadas y abruptas, a menudo formando acantilados y áreas rocosas de gran altitud. Estas zonas son inhóspitas y peligrosas para la mayoría de las actividades humanas.

Fuente: (Verdugo 2017, p. 33)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.4.3.3 Estimación de curva hipsométrica (Hc)

Para la determinación de la curva hipsométrica se tomó en cuenta los análisis de (Verdugo 2017, p. 33), Donde afirma que la curva hipsométrica se divide en tres partes:

Tabla 3-6: Clasificación de cauces fluviales según su evolución y características

Zona	Tipo de Cauce	Estado de los Cauces en Función de su Evolución.
A	Cauces jóvenes	Prevalece la producción de sedimentos y aguas, presenta gran potencial erosivo.
B	Cauces maduros	Predomina el transporte de sedimentos y aguas, La cuenca está en fase de equilibrio.
C	Cauces en etapa de vejez	Se da la deposición de sedimentos

Fuente: (Biswas et al. 2022)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Además, de la tabla se consideró la siguiente grafica que caracteriza las diferentes curvas que pueden presentar la distribución de los diferentes relieves siguiendo patrones estandarizados relacionando la altimetría y el porcentaje de área acumulada desde el punto más alto al punto más bajo de la cuenca hidrográfica.

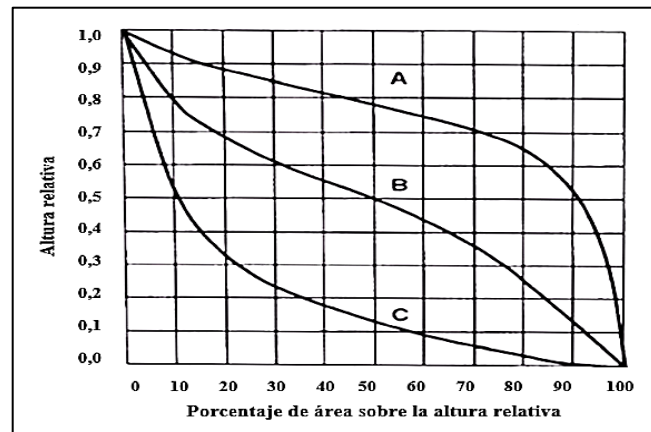


Ilustración 3-8: Representación gráfica de la curva hipsométrica

Fuente: (Guerra y González 2002, p. 103)

Para calcular la curva hipsométrica en ArcGIS, Se clasificó el ráster de alturas (MDE) y se aplicó una estadística zonal a través de Spatial Analyst Tools, seguido de Zonal y por último Zonal Statistics as Table. En la ventana que aparece, rellenamos la siguiente información: el MDE reclasificado y el modelo digital de elevaciones y guardamos el resultado. Estos resultados se copian a Excel y se realizan los respectivos gráficos y estadísticos descriptivos.

3.4.3.4 Aproximación de la elevación mediana de la cuenca (Emc)

A partir de la Curva Hipsométrica se determinó el intervalo de reclasificación para la curva mediante la intersección entre la mediana de la altura y la media del área acumulada. Este punto de intersección es esencial para identificar el intervalo altitudinal en el que se concentra la mayor parte del relieve estudiado y proporciona información valiosa sobre la distribución vertical de las características geográficas en la región de interés.

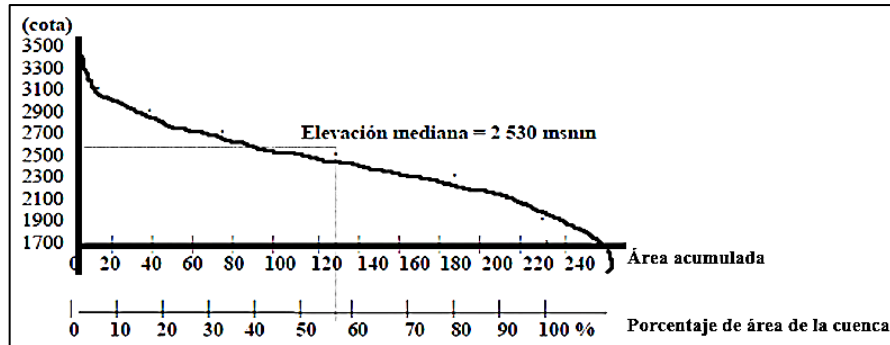


Ilustración 3-9: Distribución altitudinal de la curva hipsométrica

Fuente: (Aguirre 2007, p. 101)

3.4.4 Determinación de la altimetría de la cuenca hidrográfica

3.4.4.1 Cota mínima (H_{min}) y cota máxima (H_{max}) de la cuenca

Se comprobaron directamente los valores mínimos y máximos del modelo de elevación digital que previamente fue corregido y depurado, en las propiedades de la fuente en el apartado de estadísticos.

3.4.4.2 Cálculo del desnivel altitudinal (Dac)

Comprende la diferencia entre las zonas más alta y baja de la cuenca, expresada en m.s.n.m. Esto se debe a la diferencia de clima y ambiente, ya que la cuenca tiene un piso alto que puede tener muchas áreas, es decir, una gran cantidad de plantas y animales (Verdugo 2017, p. 45). El desnivel altitudinal, se calculó con la siguiente ecuación:

$$DA = H_{max} - H_{min}$$

Donde:

Hmin: Cota mínima o altitud menor

Hmax: Cota máxima o altitud superior

3.4.4.3 Aproximación de la altitud media (H_{mc})

La elevación media de una hoya determina la cota de curva de nivel que divide la cuenca en dos zonas de igual área, Es decir, es la elevación correspondiente al 50 % del área total (Verdugo 2017, p. 36).

Se reclasificó el MDE, distribuyendo el promedio de todas las altimetrías en 10 partes iguales, a partir de esta reclasificación se determinó el promedio de las 10 clases. La elevación media de una cuenca se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{media} = \frac{\Sigma (Areas \times elevaciones)}{\Sigma Areas}$$

Donde:

H media: Representa la elevación media de la cuenca.

Σ (Áreas x Elevaciones): Es la suma de los productos de las áreas de cada celda de la cuenca por sus respectivas elevaciones.

Σ Áreas: Es la suma de las áreas de todas las celdas de la cuenca.

3.5 Estimación de las hidromorfometrias de las unidades hidrográficas

3.5.1 Caracterización y análisis de la red de drenaje

A partir de la herramienta flow direction, se determinó la longitud de la red hídrica y del cauce principal. Seguidamente, se determinó la longitud del cauce principal y de la red hídrica, y las pendientes de los cauces. (Uhlenbrook y Unesco. 2019, p. 156). A continuación, se presenta el diagrama donde se explica detalladamente las herramientas que se utilizaron:

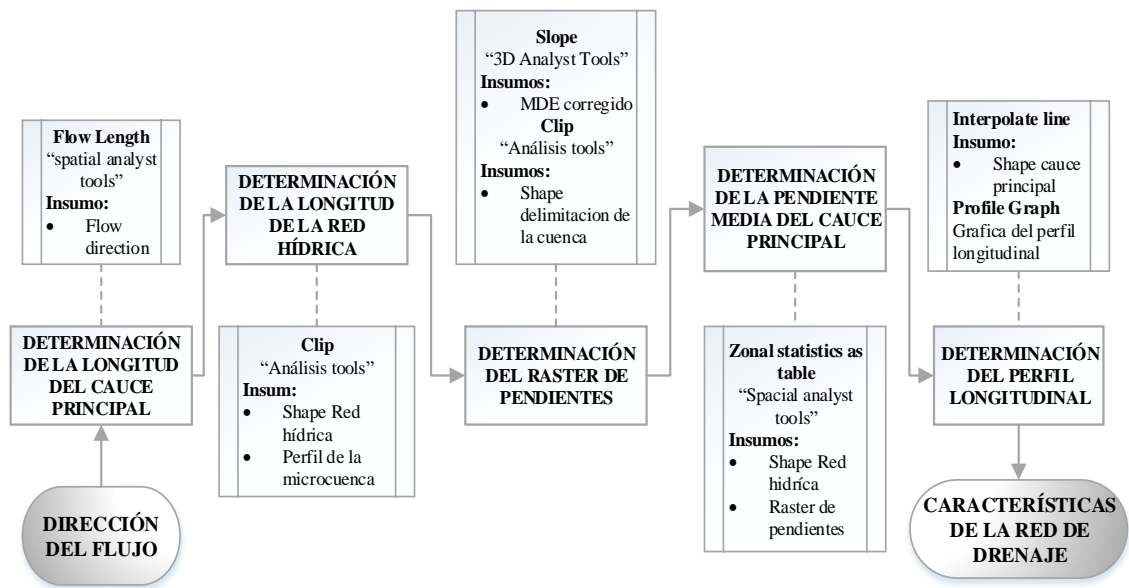


Ilustración 3-10: Algoritmo para determinar las características de la red de drenaje

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.5.1.1 Cálculo de la longitud del cauce principal (L_{cp})

Además de usar la herramienta Flow length para determinar la longitud del cauce principal, se digitalizo manualmente nodo por nodo sobre la zona del río a través de la herramienta profile graph de 3D Analysts tools con el MDE como insumo y se delimitó manualmente el sobre el perfil de río de la microcuenca para. Dentro de propiedades de esa herramienta se seleccionó export y se copiaron los datos exportados en formato de texto y se llevó a excel dónde detalló cada nodo delimitado sobre la superficie del río en función de la altimetría.

3.5.1.2 Cálculo de la longitud de la red hídrica (L_{rh})

En caso de la red hídrica esté compuesta por múltiples segmentos o elementos separados, se utilizó la herramienta clip con el shape de la red hidrica y el perfil de la microcuenca como insumos, después se aplicó la herramienta Zonal statistics as table para determinar las longitudes de todos los tributarios que aportan al cauce principal y finalmente se exportaron los datos a excel, donde se determinó la sumatoria de la longitud de cada tributario.

3.5.1.3 Aproximación de la pendiente media del cauce principal (P_{mcp})

Se determinó la pendiente media del cauce principal definiendo el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de las capas de suelo (erosión o sedimentación), puesto que, en zonas

de altas pendientes, se presentan con mayor frecuencia los problemas de erosión mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación. En el método de Alvord, se divide la cuenca en franjas altitudinales y se obtiene la pendiente media de la cuenca al ponderar la pendiente hallada para cada franja en función de su área. A través de la siguiente ecuación:

$$S_m = \frac{L * D}{A}$$

Donde:

S_m: Pendiente media de la cuenca

D: Diferencia entre curvas de nivel

L: Longitud total de las curvas de nivel

A: Área de la cuenca

A través de la siguiente tabla se pueden comprobar con base en el intervalo de pendiente

Tabla 3-7: Características de la pendiente de un río

Pendiente (%)	Tipo de Zona del río	Características Hidrológicas
< 3%	Zonas llanas	Estas zonas tienen un flujo de agua lento y son propensas a la acumulación de sedimentos.
3 - 10%	Pendiente suave	Estas zonas tienen un flujo de agua moderado y pueden experimentar erosión del suelo durante eventos de lluvia intensa.
10 - 20%	Pendiente moderada	Estas zonas tienen un flujo de agua más rápido y pueden experimentar erosión significativa.
20 - 30%	Pendiente fuerte	Estas zonas tienen un flujo de agua muy rápido y pueden experimentar erosión severa y deslizamientos de tierra.
30 - 50%	Pendiente muy fuerte	Estas zonas tienen un flujo de agua extremadamente rápido y pueden ser propensas a deslizamientos de tierra y erosión severa.
> 50%	Zonas escarpadas	Estas zonas son extremadamente empinadas y pueden experimentar flujos de detritos y avalanchas.

Fuente: (Biswas et al. 2022)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.5.1.4 Representación del perfil longitudinal (Pl)

Para determinar el perfil longitudinal del río de las microcuencas se representó gráficamente de la elevación del lecho del río en función de la distancia desde la fuente del río hasta su desembocadura. Donde se usó la herramienta profile graph de 3D Analys tools con el MDE como insumo y se delimitó manualmente el sobre el perfil de río de la microcuenca para determinar el perfil del mismo en función de su relieve, finalmente se llevaron los datos a Excel y reordenándose para que en la gráfica de dispersión se representen las altitudes de la superior a la inferior en función de la longitud del río. Representándose así la longitud del río principales aguas abajo desde el nacimiento del cauce (Elosegui y Sabater 2009, p. 75).

3.5.2 Determinación de la hidráulica de la red fluvial

3.5.2.1 Cuantificación del número de cauces o tributarios (Nc)

Se cuantificaron directamente cada uno de los tributarios que se conectan con el cauce principal a medida que avanza a través de la cuenca hidrográfica, donde se activó el shapefile de la red hídrica para visualizar todos los tributarios de esta red. Así también, se comprobó este número usando la capa de topografía de base map donde se pueden visualizar con más detalle las aportaciones que ingresan a la cuenca de estudio.

3.5.2.2 Determinación de la densidad de drenaje (Dd)

Se determinó la densidad de drenaje con base en la longitud de todos los cauces la cual consiste en relacionar la suma de las longitudes de todos los cursos que son drenados. Y la superficie de la cuenca.

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

Donde:

L: Sumatoria de longitud total de todos los cauces en Km

A: Superficie de la cuenca en Km²

Se comprobaron a través de la siguiente tabla en función del intervalo en donde se ubica la medida de este parámetro junto con los valores de la densidad del drenaje:

Tabla 3-8: Valores interpretativos de la densidad de drenaje

Densidad de drenaje (Km/Km ²)	Categoría	Interpretación Ambiental
< 0.1	Muy Baja	Indica que la cuenca tiene una red de drenaje menos desarrollada, lo que puede ser indicativo de un terreno más permeable o una menor cantidad de precipitación.
0.1 a 0.5	Baja	Este intervalo indica una red de drenaje moderadamente desarrollada. Esto puede ser el resultado de un equilibrio entre la permeabilidad del suelo, la cantidad de precipitación y la topografía.
0.5 a 1.0	Moderada	Sugiere una red de drenaje bien desarrollada, lo que puede ser indicativo de un terreno menos permeable, una mayor cantidad de precipitación o una topografía más accidentada.
> 1.0	Alta	Indica una red de drenaje muy densa, lo que puede ser el resultado de un terreno impermeable, una alta cantidad de precipitación o una topografía muy accidentada. Esto puede aumentar la susceptibilidad a la erosión.

Fuente: (Fuentes 2004, p. 19)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.5.2.3 Estimación del tiempo de concentración (Tc)

El Tc depende de los siguientes factores:

- Del tamaño de la cuenca: a mayor tamaño mayor tc
- De la topografía: a mayor pendiente, menor tc
- La forma: las cuencas alargadas presentan menores tc que las cuencas redondeadas.

Para determinar el tiempo de concentración se empleó la siguiente ecuación, basada en los criterios de (Villegas 2014):

$$Tc = 0,30 \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (horas)

L: Longitud de cause principal (km)

S: Pendiente total del cauce principal en porcentaje (%)

Se comprobó la clase del tiempo de concentración en función de los siguientes intervalos:

Tabla 3-9: Clases de tiempo de concentración

Intervalos de Tc (horas)	Clases	Descripción
0 – 0.69	Rápido	Este intervalo de tiempo de concentración indica que el agua se mueve rápidamente a través de la cuenca, lo que puede ser indicativo de pendientes empinadas, suelos con alta capacidad de infiltración, o una combinación de ambos.
0,7 – 1,38	Moderado	Este intervalo indica un tiempo de concentración intermedio. Las cuencas en este intervalo pueden tener características variadas, incluyendo pendientes moderadas y suelos con una capacidad de infiltración intermedia.
1,39 – 2,09	Lento	Este intervalo indica un tiempo de concentración lento, lo que sugiere que el agua se mueve lentamente a través de la cuenca. Esto puede ser indicativo de pendientes suaves, suelos con baja capacidad de infiltración, o una combinación de ambos.

Fuente: (Fuentes 2004, p. 19)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.5.2.4 Determinación de la sinuosidad de las corrientes (Sc)

Se utilizó una metodología que se basó en la relación entre la longitud del cauce principal y la longitud de la cuenca (Cardona et al. 2014, p. 34). La sinuosidad, que es una medida de la curvatura o meandrismo de un río o corriente, se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{L}{Lt}$$

Donde:

S: Sinuosidad (adimensional).

L: Longitud del cauce principal (km)

Lt: Longitud de la trayectoria del río (km)

Se aprecia en la siguiente ilustración:

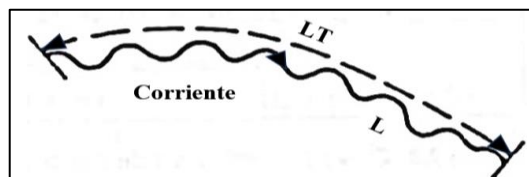


Ilustración 3-11: Representación de la sinuosidad de una cuenca hidrográfica

Fuente: (Aguirre 2007, p. 101)

Según la siguiente tabla se puede determinar el tipo de canal con su respectiva característica, teniendo en cuenta el valor obtenido de dicha variable.

Tabla 3-10: Clasificación de la sinuosidad en una cuenca hidrográfica

Intervalo de Sinuosidad	Tipo de canal	Caracterización
1 - 1.2	Rectilíneo (muy baja sinuosidad)	Estos ríos se encuentran comúnmente en las partes altas de las montañas, donde las pendientes son empinadas y la erosión es alta
1.2 -. 1.5	Transicional (Baja sinuosidad)	Estos ríos pueden encontrarse en áreas donde la topografía está cambiando, como las laderas de las montañas que se suavizan hacia los valles
1.5 - 1.7	Regular (Sinuosidad media)	Estos ríos pueden encontrarse en áreas montañosas donde hay una mezcla de pendientes empinadas y suaves, lo que resulta en cambios direccionales significativos.
1.7 - 2.1	Irregular (Sinuosidad alta)	Estos ríos pueden encontrarse en áreas montañosas con una variedad de características topográficas, incluyendo valles, terrazas y laderas
> 2.1	Tortuoso (Sinuosidad muy alta)	Estos ríos se encuentran comúnmente en las partes bajas de las montañas o en los valles, donde la pendiente se ha suavizado y el río tiene la libertad de meandrear

Fuente: (Fuentes 2004, p. 19)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.6 Determinación del comportamiento bioclimático de la región de estudio

3.6.1 Estimación de la precipitación media

Para determinar la precipitación media se extrajo variable de Global Word Climator, donde se tuvo en cuenta que estos valores no deben quedar por debajo de 0 mm. Ya se compararon con datos registrados donde la precipitación media anual es de 681,3 mm (GAD de Chimborazo, 2020, p. 156).

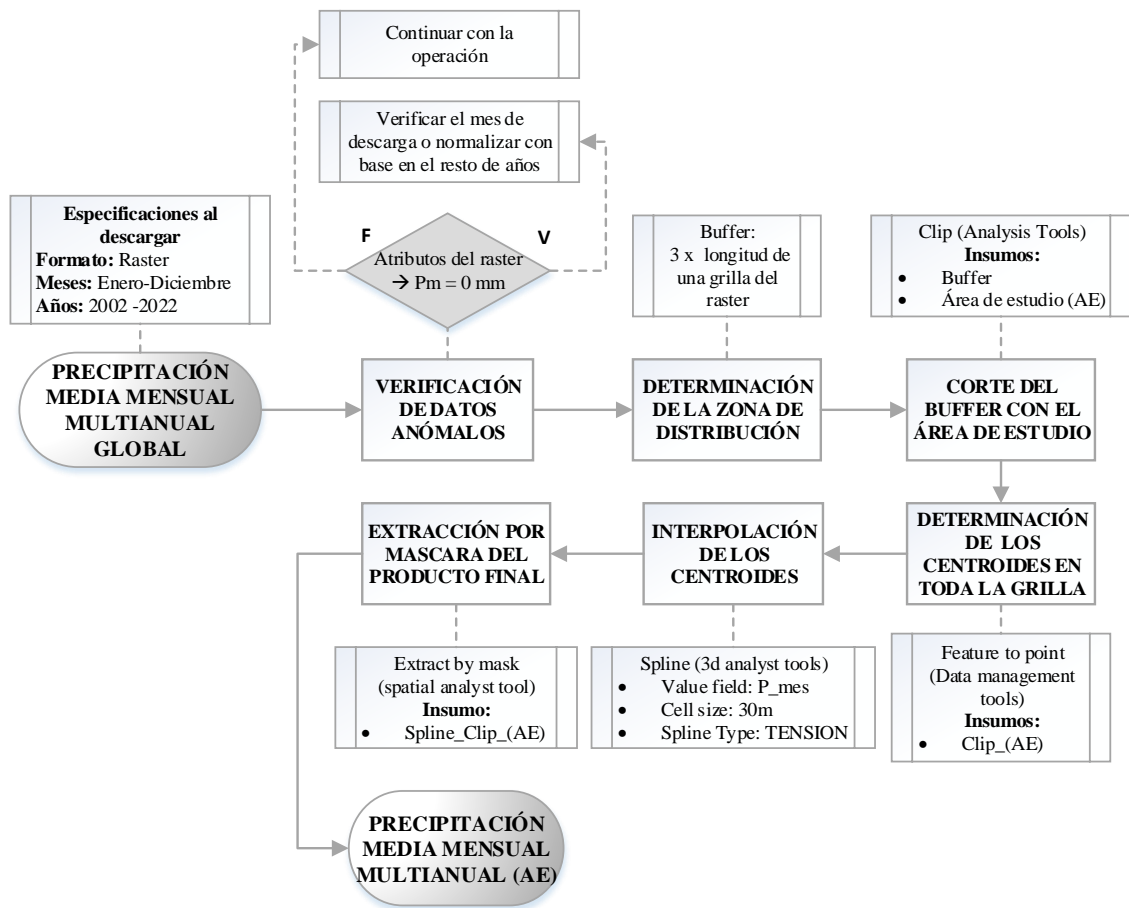


Ilustración 3-12: Algoritmo para determinar las características de la red de drenaje

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.6.2 Estimación de temperatura media

Para determinar la temperatura media de la misma forma que en el caso de la precipitación se extrajo la temperatura media de Global World Climator, donde se tuvo en cuenta que estos valores no deben quedar por debajo de 0°C. Ya que, al comparar con datos registrados por la parroquia Cebadas, el intervalo oscila entre 4 a 20 °C, con una media anual 12°C (Bustamante, 2017, p. 4).

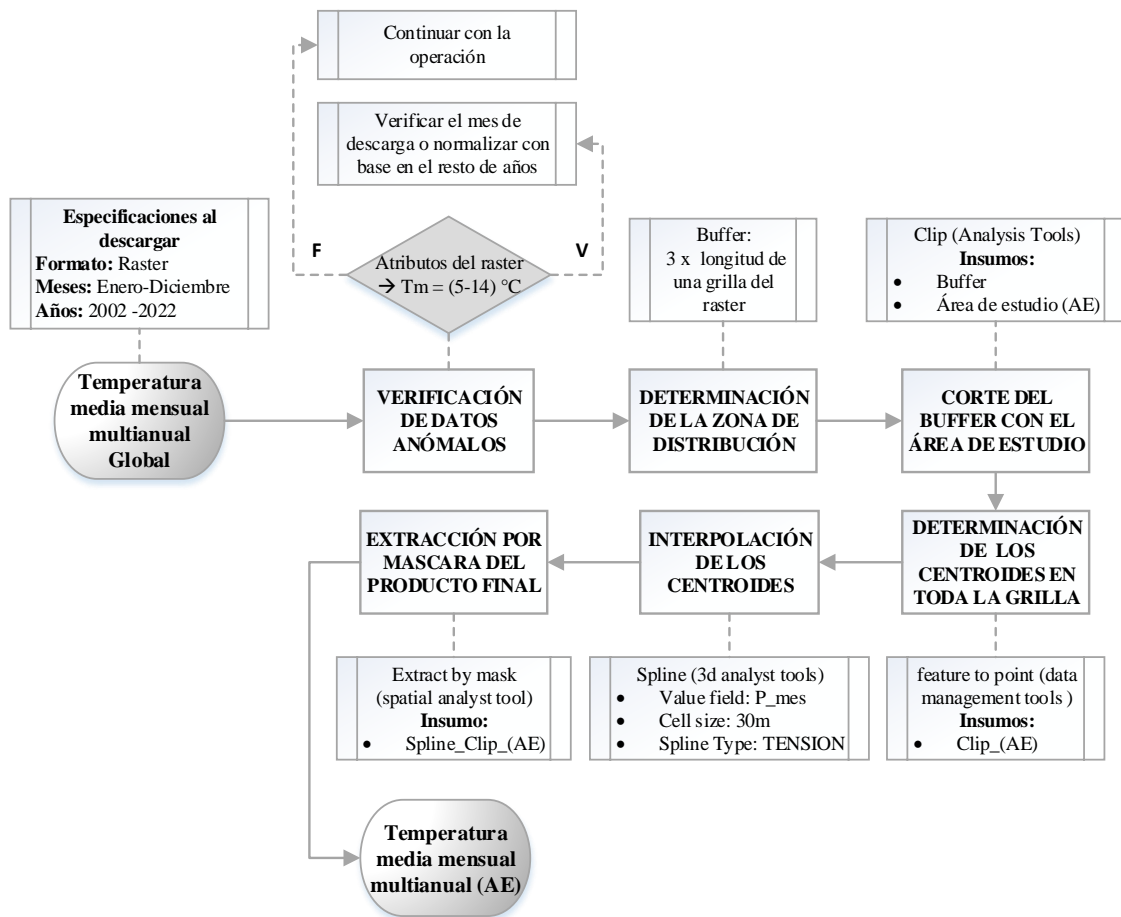


Ilustración 3-13: Algoritmo para determinar las características de la red de drenaje

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.6.3 Aplicación del sistema de Holdridge

Para la aplicación del diagrama del sistema Sistema de Holdridge, se necesita determinar primero los componentes: la Biotemperatura en (°C), la Evapotranspiración Potencial en (mm) y Promedio de la Precipitación Anual Total de una zona escogida en (mm).

A continuación, se detalla ampliamente como se determinó cada variable:

3.6.4 Estimación de la biotemperatura media anual

Se recopilaron todos los datos de temperatura promedio anual (TMA) para transformar a biotemperatura media anual. Donde inicialmente se aplicó la siguiente ecuación con base en la temperatura media y la latitud como se muestra a continuación:

$$BMM = T^{\circ}MM - \left| 3 \times Lat^{\circ} \times \frac{(T^{\circ}MM - 24)^2}{100} \right|$$

Donde:

TMM: Temperatura media mensual

Lat: latitud en coordenadas UTM

Sin embargo, dadas las condiciones extremas de la zona de estudio altoandina, ecuación queda obsoleta debido a que los intervalos de temperatura en los que trabaja no consideran la influencia de la altitud y la presión atmosférica, por ello se optó por aplicar una corrección de temperatura media a través de la calculadora de atmósfera estándar internacional (ISA) y atmósfera estándar de EEUU 1976 (USSA) la cual utiliza la siguiente ecuación:

$$Tc = (TM) + \left(\frac{CT}{100} \right) \times (15 - TM) - \left(\frac{A}{400} \right)$$

Donde:

Tc: Esta es la temperatura corregida que se calcula utilizando la ecuación. Es la temperatura que se obtiene después de aplicar las correcciones por compensación de temperatura y altitud.

TM: Temperatura real medida a nivel del suelo.

CT: Factor que se utiliza para corregir las mediciones de temperatura en función de ciertas variables, como la altitud o la presión atmosférica.

A: Altitud a la que se encuentra el lugar donde se está midiendo la temperatura.

Constantes: Se utilizaron en la ecuación para ajustar el efecto de la altitud en la temperatura.

Finalmente se iguala la ecuación tomando en cuenta el criterio de (Almagro et al. 2019) :

Si la T[°]MM está entre 6°C y 24°C, la Biotemperatura Media Mensual (BMM) es igual a la Temperatura Media Mensual (T[°]MM).

Entonces:

$$Tc = BMM$$

Además, se calculó la biotemperatura media anual (BMA) con los datos de BMM de los años de estudio, es aconsejable probar rangos, si el estudio se enfoca a estudiar el clima a largo plazo, se

consideran 20 años, y por otra parte si se quiere comprobar las condiciones de los últimos años se deben tomar por lo menos 5 años.

3.6.5 Cálculo de la evapotranspiración potencial y razón de evapotranspiración

Se determinó la evapotranspiración potencia con la siguiente ecuación:

$$EP = BMA \times 58.93$$

Donde:

EP: evapotranspiración potencial

BMA: Biotemperatura media anual

Seguidamente se utilizó la fórmula para calcular la razón de evapotranspiración potencial, donde se debe estimar el valor de PMA a partir de los valores de PMM de los años del análisis:

$$REP = \frac{EP}{PMA}$$

Donde:

REP: Razón de evapotranspiración potencial

EP: Evapotranspiración potencial

PMA: Precipitación media anual

Finalmente, luego de haber estimado los valores de la Biotemperatura y Evapotranspiración Potencial se ubicaron los valores obtenidos y se trazaron líneas rectas para determinar la intersección entre el valor de EP/P y las Regiones Latitudinales en el diagrama de Holdridge.

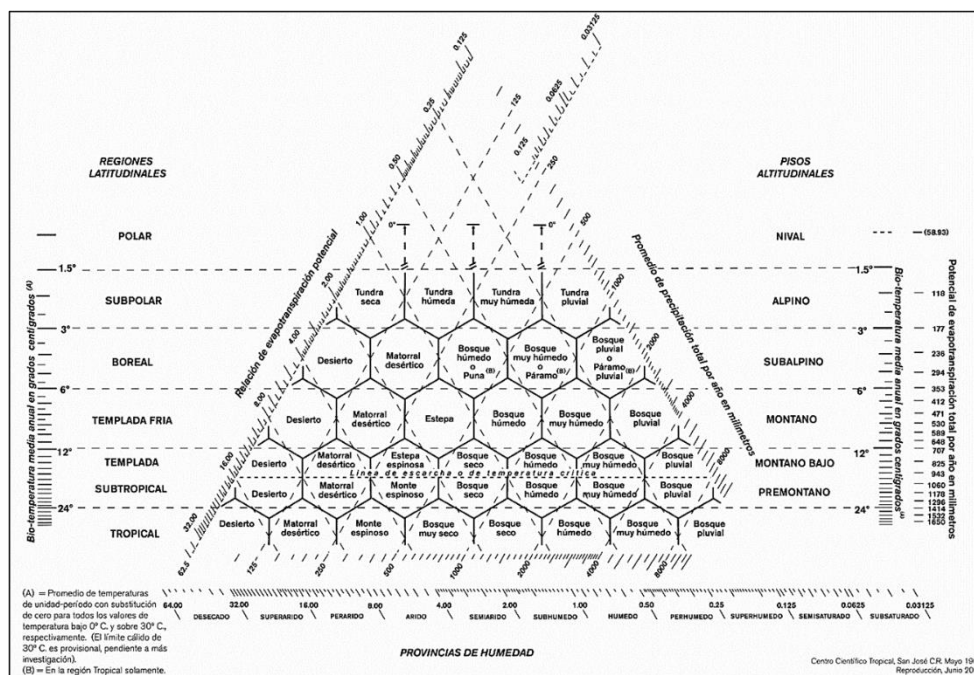


Ilustración 3-14: Diagrama de Holdridge para la clasificación de formas de vida

Fuente: (Alfaro et al. 2020, p. 101)

Se comprobaron en la tabla los intervalos en los que se encuentran los valores determinados anteriormente para saber si tienen concordancia.

Tabla 3-11: Clasificación de Regiones Latitudinales y Pisos Altitudinales según Altitud y Biotemperatura

Regiones latitudinales	Tipos de Pisos Altitudinales	Altitudes (m.s.n.m.)	Biotemperatura (°C)
Tropical	Manglar	0 – 1000	24
Subtropical	Premontano	1000 – 2000	18 y 24
Templado cálido	Montano bajo	2000 – 3000	12 y 18
Templado frío	Montano	3000 – 3 500	6 y 12
Boreal	Subalpino	3500 – 4000	3 y 6
Subpolar (tundra)	Alpino o paramo	4000	1.5 y 3
Polar (glacial)	Nival o de nieves perpetuas	4800	1.5

Fuente: (Holdridge 2000, p. 15)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

A continuación, se trazó una línea desde dicha intersección hacia la base del triángulo para encontrar la "Provincia de Humedad". La Zona de Vida fue determinada según la ubicación en el diagrama, teniendo en consideración la Región Latitudinal, el Piso Altitudinal y la Provincia de Humedad.

Tabla 3-12: Relación entre evapotranspiración potencial y provincias de humedad

Razón de Evapotranspiración potencial	Provincias de humedad
0,125 - 0,25	Superhúmedo o pluvial
0,25 - 0,5	Perhúmedo o muy húmedo
0,5 - 1	Húmedo
1 - 2	Subhúmedo o seco
2 - 4	Semiárido
4 - 8	Árido
8 - 16	Perárido
16 - 32	Superárido

Fuente: (Holdridge 2000, p. 15)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Cabe destacar que esta metodología incluyó la corrección de la temperatura media mensual para tener en cuenta la altitud y la presión atmosférica en zonas altoandinas y de páramo. Esto fue crucial debido a que la ecuación original no resultaba representativa en estos entornos. La corrección de temperatura desempeñó un papel fundamental para obtener resultados más precisos al aplicar el diagrama de Holdridge en tales regiones, dado que el clima de alta montaña puede variar considerablemente en relación con la altitud y la presión atmosférica, lo que influye significativamente en la biodiversidad y los ecosistemas.

3.7 Determinación de los factores del modelo RUSLE

3.7.1 Determinación del Factor R

El Factor R refleja la erosividad de la lluvia y se utiliza en el modelo RUSLE para estimar la erosión del suelo en ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Es importante destacar que el cálculo del IMF se basa en datos mensuales de precipitación y su relación con el valor umbral mensual (P_m). El IMF promedio anual se utiliza luego en la ecuación para determinar el Factor R. Se siguió la siguiente metodología a través de la herramienta raster calculador como se puede visualizar en el siguiente diagrama de flujo:

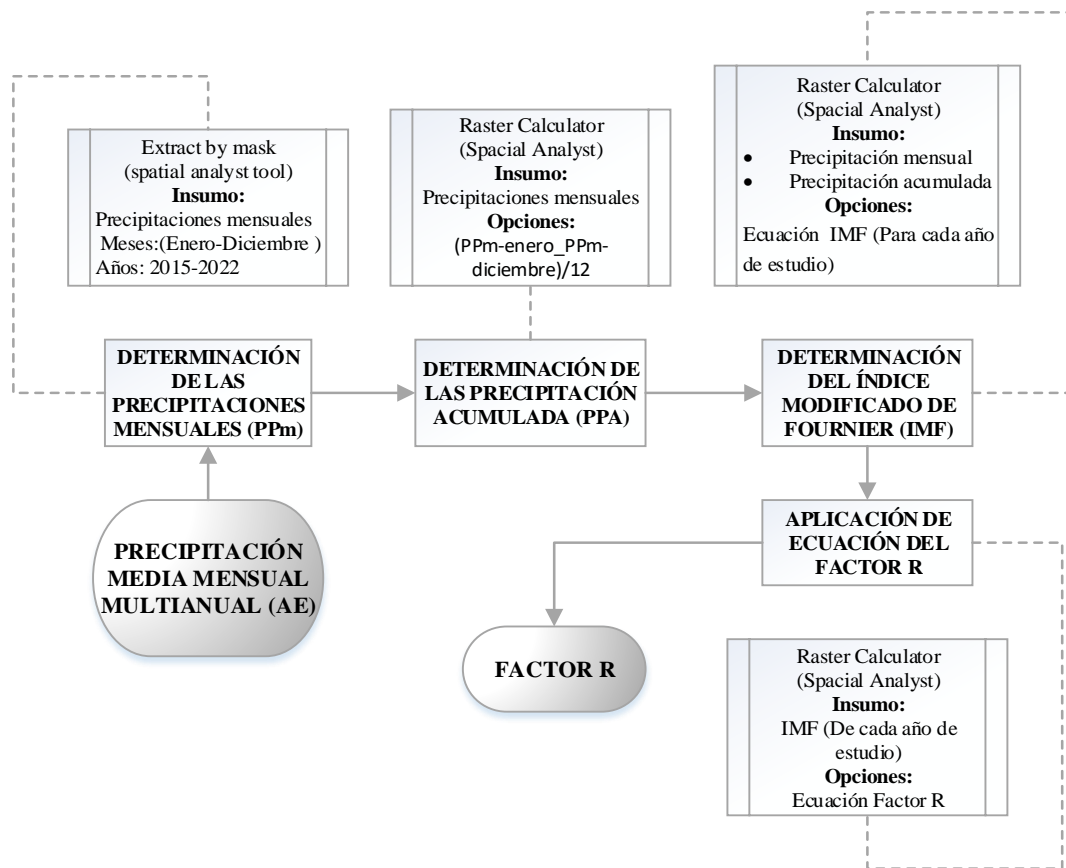


Ilustración 3-15: Algoritmo para determinar el factor R

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Se determinó mediante el cálculo del Índice Modificado de Fournier (IMF), con base en los valores de precipitación media y acumulada determinados anteriormente, caracteriza la agresividad de la precipitación en un área específica:

3.7.1.1 Estimación del Índice modificado de Fournier

A través del índice modificado de Fournier (IFM) se caracterizó la agresividad de la precipitación. Es importante considerar que el cálculo de IFM se debe realizar para cada año y luego se calcula el promedio. Se calculó el índice modificado de Fournier a través de la siguiente ecuación (Canto & Huamán, 2021).

:

$$IMF = \sum_{i=d}^{12} \frac{PPm^2}{PPA}$$

Una vez calculado el IMF, se estimó el factor R a partir del mismo se calculó el IMF con base en la metodología propuesta, la misma que correlaciona los valores promedios mensuales del IFM obtenidos con los valores promedios mensuales del factor R

$$\text{Factor } R = 2,56(\text{IMF})^{1,065}$$

Donde:

IMF: Índice Modificado de Fournier

PPm²: Precipitación mensuales (mm)

PPA: Precipitación acumulada anual (mm)

3.7.2 Determinación del factor K

El factor K mide la erodabilidad de la lluvia y se expresa en (t ha MJ⁻¹ mm⁻¹). Para determinar este factor se llevó a cabo un análisis comparativo entre los datos de textura y carbono orgánico provenientes de la HWSD FAO y SoilGrids. Para saber que fuente de datos me proporcionaba datos más precisos de los componentes de este factor. Inicialmente, se adquirieron y preprocesaron los conjuntos de datos de ambas fuentes. Se generaron capas raster de textura y carbono orgánico a partir de estos datos, considerando los estratos específicos para cada fuente: 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm para HWSD FAO, y 0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm y 30-60 cm para SoilGrids.

Para comparar y seleccionar una fuente de datos específica con base en los estadísticos generados para cada fuente y las correlaciones que presentan estos valores con los resultados en campo. A continuación se presenta el diagrama de flujo explicando el algoritmo para determinar este factor.

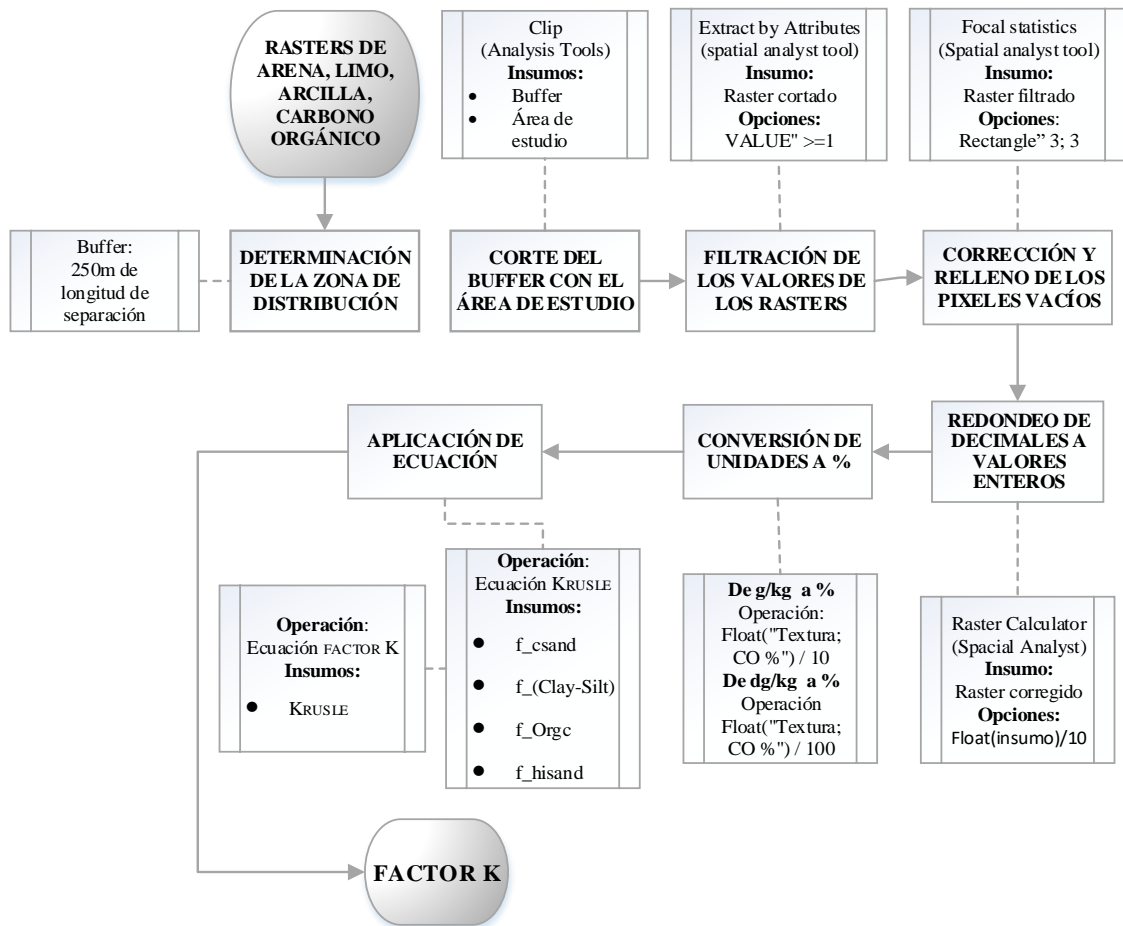


Ilustración 3-16: Algoritmo para determinar el factor K

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Es importante evaluar estadísticamente todos los parámetros de las fuentes, así también es necesario comprobar el comportamiento de la textura y carbono orgánico en diferentes estratos del suelo para verificar cuales guardan relación con la erosión generada por la lluvia (Flores, 2013, P 26). Por ello se determinaron las características generales de los suelos.

3.7.2.1 Caracterización de la taxonomía de los suelos

Para extraer los datos de HWSD se descargó e instaló el visor HWSD v2 tipo exe (FAO e IIASA 2023). Una vez instalado se procedió a buscar manualmente el área geográfica de interés. Al seleccionar con el visor el área de estudio el programa genera una tabla con todas las características fisicoquímicas del suelo seleccionado. Finalmente se extrajo los datos del programa de los diferentes tipos de suelo que contiene el área de interés, con sus respectivos parámetros a estudiar.

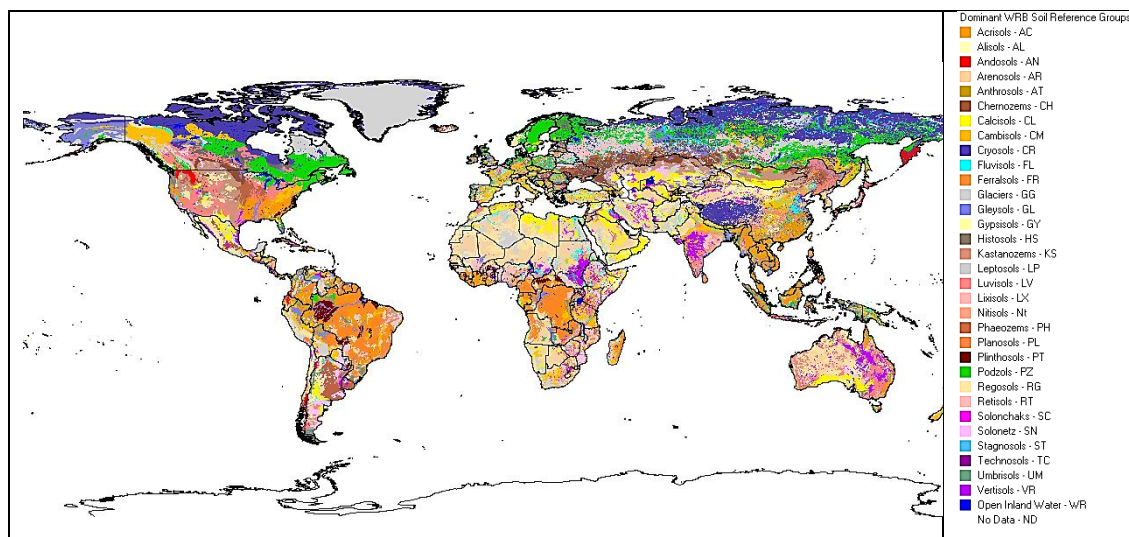


Ilustración 3-17: Taxonomía de suelos del Mundo

Fuente: (FAO e IIASA 2023)

A través de HWSD se extrajeron los datos de taxonomía de los suelos de toda la región para tener una perspectiva amplia de la variabilidad de los órdenes taxonómicos en la región

Tabla 3-13: Características de los suelos del Ecuador según la FAO

Tipo de Suelo	Abreviatura	Características
Acrisoles	AC	Suelos ácidos y pobres en nutrientes, con acumulación de aluminio y hierro en profundidad. Presentan alta erosión.
Andosoles	AN	Suelos volcánicos con alto contenido de materia orgánica y retención de agua. Son fértiles y aptos para la agricultura.
Arenosoles	AR	Suelos arenosos, sueltos y drenantes. Tienen baja capacidad de retención de agua y nutrientes.
Cambisoles	CM	Suelos con horizontes de acumulación y pérdida de arcilla y materia orgánica. Son fértiles, pero pueden presentar problemas de drenaje.
Fluvisoles	FL	Suelos depositados por el agua en áreas de inundación. Son ricos en sedimentos y nutrientes.
Gleysoles	GL	Suelos con drenaje deficiente, presentan condiciones reductoras y acumulación de hierro. Pueden ser anegados temporalmente.
Leptosoles	LP	Suelos poco desarrollados, delgados y con roca cercana a la superficie. Presentan baja fertilidad y retención de agua.
Luvisoles	LV	Suelos con horizontes de acumulación de arcilla y materia orgánica. Son fértiles y aptos para la agricultura.
Phaeozems	PH	Suelos ricos en materia orgánica, con horizontes oscuros. Son fértiles y utilizados para cultivos intensivos.
Planosoles	PL	Suelos planos y poco desarrollados, con baja retención de agua y nutrientes. Presentan problemas de erosión.

Regosoles	RG	Suelos jóvenes, con poca diferenciación de horizontes y escaso desarrollo. Pueden ser fértiles, pero también susceptibles a la erosión.
Tecnosoles	CT	Suelos formados por la actividad humana, como depósitos de construcción o vertederos.
Vertisoles	VR	Suelos arcillosos que se hinchan y se agrietan con los cambios de humedad. Presentan problemas de drenaje y manejo.

Fuente: (FAO & IIASA, 2023, p. 15)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Seguidamente se clasificaron los suelos únicamente que contiene la zona de estudio de cada unidad hidrológica para tener una perspectiva más específica de los suelos que se va a analizar y caracterizar.

3.7.2.2 Selección del estrato de suelo

Para determinar el estrato de suelo más apropiado y preciso para el cálculo del factor K en el modelo RUSLE, se llevó a cabo una exhaustiva evaluación de las fuentes de datos disponibles. Se determinó que la fuente más precisa para obtener los datos requeridos para este factor era SoilGrids en lugar de HWSO FAO. Esta elección se basó en consideraciones de calidad y resolución de datos.

Una vez seleccionada la fuente de datos adecuada, se procedió a realizar un análisis textural y la caracterización de la concentración de carbono orgánico en porcentaje (%). Estos parámetros son esenciales para las fórmulas que componen la metodología utilizada para determinar el factor K en el modelo RUSLE.

Se caracterizaron diversos estratos del suelo, que incluyeron las profundidades de 0-5 cm, 5-15 cm, 15-30 cm y 30-60 cm. Entre estos estratos, se observó que los estratos de 0-5 cm y 5-15 cm emergieron como las opciones más viables debido a la agresividad de la precipitación, que afecta principalmente la parte superficial de los suelos en las zonas de páramo.

La elección del estrato de suelo 5-15 cm en lugar del estrato 0-5 cm se basó en consideraciones técnicas respaldadas por realizado por (Ramos, 2021, P 3) . La capa de 5-15 cm ofrece una mayor estabilidad estructural del suelo, lo que contribuye a una menor erosión durante eventos de lluvia intensa. Además, esta elección permite una mejor representación de la interacción de la vegetación, especialmente las raíces y la materia orgánica, en la estabilidad del suelo, lo que es crucial en los ecosistemas de páramo.

A continuación, se muestra la metodología para analizar la textura y carbono orgánico con base en los datos de solgrids. Donde se comparó los valores de los rangos según las USDA para identificar las propiedades físicas y químicas de cada estrato, seguidamente se asignaron categorías mediante un condicional en la herramienta raster calculator para que cada raster tenga una clasificación acorde a su valor

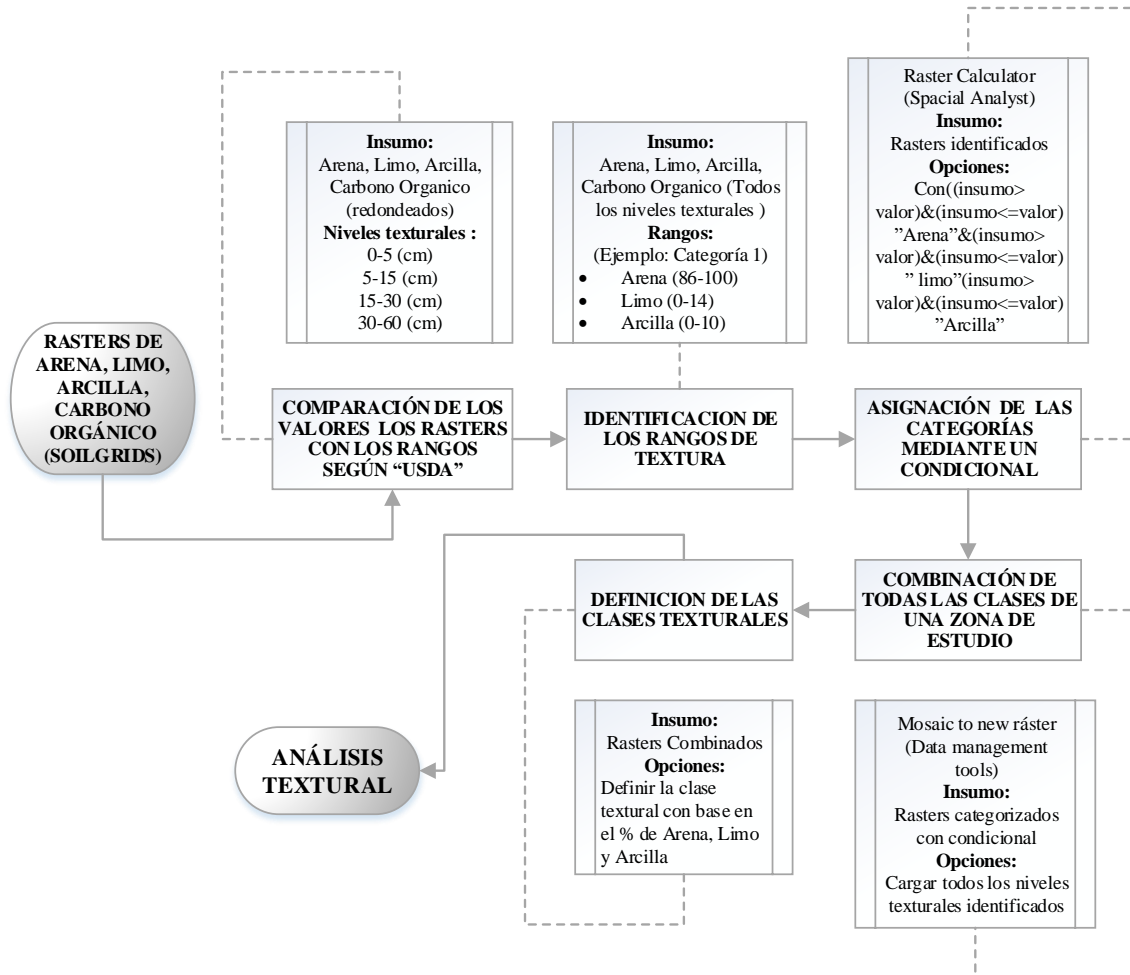


Ilustración 3-18: Algoritmo para obtener los datos de textura y carbono orgánico de soilgrids

Fuente: Imbaquingo, C., 2023

3.7.2.3 Determinación del tipo de textura en los suelos

Para el cálculo del factor K utilizando las capas raster correspondientes para cada estrato de la zona de estudio. Se compararon los valores de textura y carbono orgánico en los estratos mencionados, evaluando las similitudes y diferencias entre los datos obtenidos de las dos fuentes. Se consideraron las medias de los parámetros de HWS Viewer v2 (FAO e IIASA 2023). Ya que estos datos cuentan con valores estandarizados para cada tipo de suelo en la región.

A continuación, se muestra la metodología seguida para analizar la textura y carbono orgánico con base en los datos de HWSO. Donde únicamente se identificó la zona de estudio y se tabularon los datos, seguidamente se realizó el respectivo análisis estadístico.

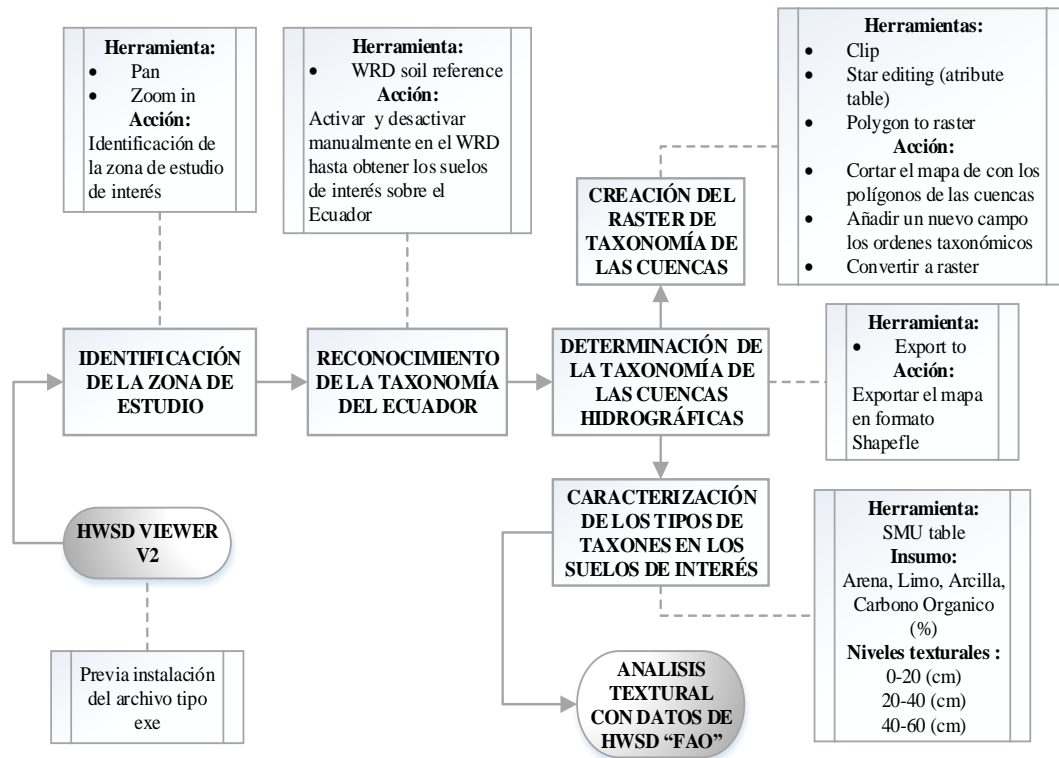


Ilustración 3-19: Algoritmo para obtener los datos de textura y carbono orgánico de HWSO

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Una vez determinados los análisis texturales con las dos fuentes, se determinó los mínimos, máximos, medias y desviación estándar de cada una de las variables de textura y carbono orgánico. Este análisis comparativo permite identificar coincidencias y divergencias en los datos entre las dos fuentes, con el objetivo de determinar si era posible realizar un promedio o normalización de los valores para obtener una estimación más precisa y confiable del factor K. Se evaluaron criterios de consistencia y coherencia de los valores entre las fuentes de datos.

Después de completar el análisis, se seleccionó la fuente de datos más adecuada para cada estrato en función de su calidad y capacidad para representar de manera precisa las propiedades del suelo. Esta elección se basó en la comparación de similitudes y diferencias entre los datos obtenidos de HWSO FAO y SoilGrids en cada estrato específico.

Finalmente se utilizó el triángulo de textura del suelo propuesto por la USDA. La cual es una herramienta gráfica que se usa para clasificar los suelos según su contenido de arena, limo y arcilla (Márquez 2021).

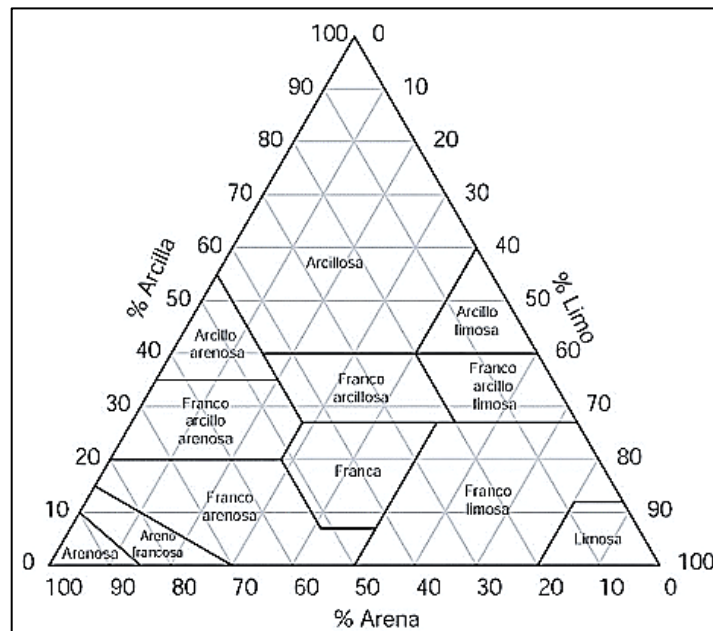


Ilustración 3-20: Diagrama del Triángulo para identificación de la textura del suelo

Fuente: (FAO & IIASA, 2023, p. 27)

Para hacer uso del diagrama del triángulo de textura de suelos de deben trazar líneas rectas en el valor o porcentaje de arena, limo y arcilla obtenidos del análisis textural con el fin de intersectar las líneas y determinar la región intersecada en el diagrama que vendría a ser la clase textural que tiene el suelo en cuestión.

Tabla 3-14: Clasificación de Suelos según Textura y Composición

Nombres coloquiales de los suelos (textura general)	Categoría	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural
Suelos arenosos (textura gruesa)	1	86-100	0-14	0-10	Arenoso
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	2	70-86	0-30	0-15	Areno francosa
	3	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso
Suelos francos (textura mediana)	4	23-52	28-50	7-27	Franco
	5	20-50	74-88	0-27	Franco limoso
	6	0-20	88-100	0-12	Limoso
	7	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso

Suelos francos (textura moderadamente fina)	8	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso
	9	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	10	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso
	11	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso
	12	0-45	0-40	40-100	Arcilloso

Fuente: (Jamieson 1985)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Una vez realizado el análisis textural y determinada la taxonomía de los suelos de las unidades hidrográficas. Se determinó el factor K en función de la textura y el carbono orgánico del suelo. La textura del suelo y el contenido de carbono orgánico son dos de los factores que influyen en el valor del factor K. (Rammahi, 2018)

3.7.2.4 Cuantificación de las propiedades físicas y químicas del suelo

Todas las fracciones de arena, arcilla, limo y carbono orgánico del suelo se representaron en la capa superior del suelo de la cuenca porque se ve afectada directamente por la energía de la gota de lluvia (Rammahi, 2018), por lo anteriormente analizado se trabajó en el estrato de suelo de (5 - 15) cm.

a) Relación Arena- Limo

La distribución de tamaños de partículas en el suelo influye en su capacidad para retener agua y resistir la erosión. Una mayor cantidad de arena generalmente hace que el suelo sea más permeable al agua, mientras que el limo puede retener más agua. Esta relación ayuda a evaluar la textura del suelo y su susceptibilidad a la erosión (Vilema Ramos 2021). La relación entre la arena y el limo se describe mediante la función f_{csand} , que tiene en cuenta el porcentaje de contenido de fracción de arena (m_s) y el porcentaje de contenido de fracción de limo (m_{silt}). Esta función se basa en la ecuación:

$$f_{csand} = \left[0,2 + 0,3 \times \exp \left(-0,256 \times m_s \times \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right) \right]$$

b) Relación entre Limo – Arcilla

La combinación de limo y arcilla en el suelo afecta su cohesión y plasticidad. Un suelo con una mayor proporción de arcilla generalmente es más cohesivo y menos propenso a la erosión. Esta relación ayuda a caracterizar la textura del suelo y su capacidad para retener partículas durante eventos de lluvia (Baque Parrales 2018). La relación entre el limo y la arcilla se expresa a través de la función f_{cl-si} , que depende del porcentaje de contenido de fracción de limo (m_{silt}) y el porcentaje de contenido de fracción de arcilla (m_c). La fórmula utilizada es:

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3}$$

c) Alto contenido de arena

Cuando el suelo tiene un alto contenido de arena, es más propenso a la erosión porque el agua fluye fácilmente a través de él. Esta función ajusta el factor K para tener en cuenta la erosión en suelos con alto contenido de arena (Maciej & Serda et al., 2013). La función f_{hisand} se utiliza cuando hay un alto contenido de arena y tiene en cuenta el porcentaje de contenido de fracción de arena (m_s). Esta función se calcula de la siguiente manera:

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0,70 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right)$$

d) Función de la materia orgánica

La materia orgánica mejora la estructura del suelo y su capacidad para retener agua, lo que reduce la erosión. Esta función tiene en cuenta el contenido de carbono orgánico y su influencia en la resistencia del suelo a la erosión (Cotler et al. 2015). La función f_{orgc} representa la influencia de la materia orgánica y se calcula en función del porcentaje de contenido de fracción de carbono orgánico ($orgC$). Su expresión es la siguiente:

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0,25 \times orgC}{orgC + \exp[3,75 - 2,95 \times orgC]} \right)$$

Donde:

m_s : Porcentaje de contenido de fracción de arena (0,5 - 2 mm de diámetro de partícula) [%]

m_{silt} : Porcentaje de contenido de fracción de limo (0,002-0,05 mm de diámetro de partícula) [%]

mc : Porcentaje de contenido de fracción de arcilla (<0,002 mm de diámetro de partícula) [%]

orgC: Porcentaje de contenido de fracción de carbono orgánico [%]

Finalmente se integró todos los subfactores del factor K en la siguiente ecuación:

$$K_{Rusle} = f_{csand} \times f_{Clay-Silt} \times f_{Orgc} \times f_{hisand}$$

Además, se corrigió el resultado con un factor de corrección que se ha comprobado experimentalmente en la actualización del modelo USLE a RUSLE (Hengl et al., 2017).:

$$\text{FACTOR K} = K_{Rusle} \times (0,1317)$$

3.7.3 *Determinación del factor L.S*

El Factor L.S se calculó multiplicando dos subfactores: el Factor L (Longitud de la pendiente) y el Factor S (Pendiente). Según (Roffe, Penteadó y Perez [sin fecha], p. 5), el Factor L representa la longitud de la pendiente y se refiere a la distancia que el agua recorre en la pendiente antes de llegar a un punto determinado. El Factor S, por otro lado, se relaciona con la pendiente de la pendiente y describe la inclinación de la pendiente en sí misma. Se describe el procedimiento a través del siguiente algoritmo:

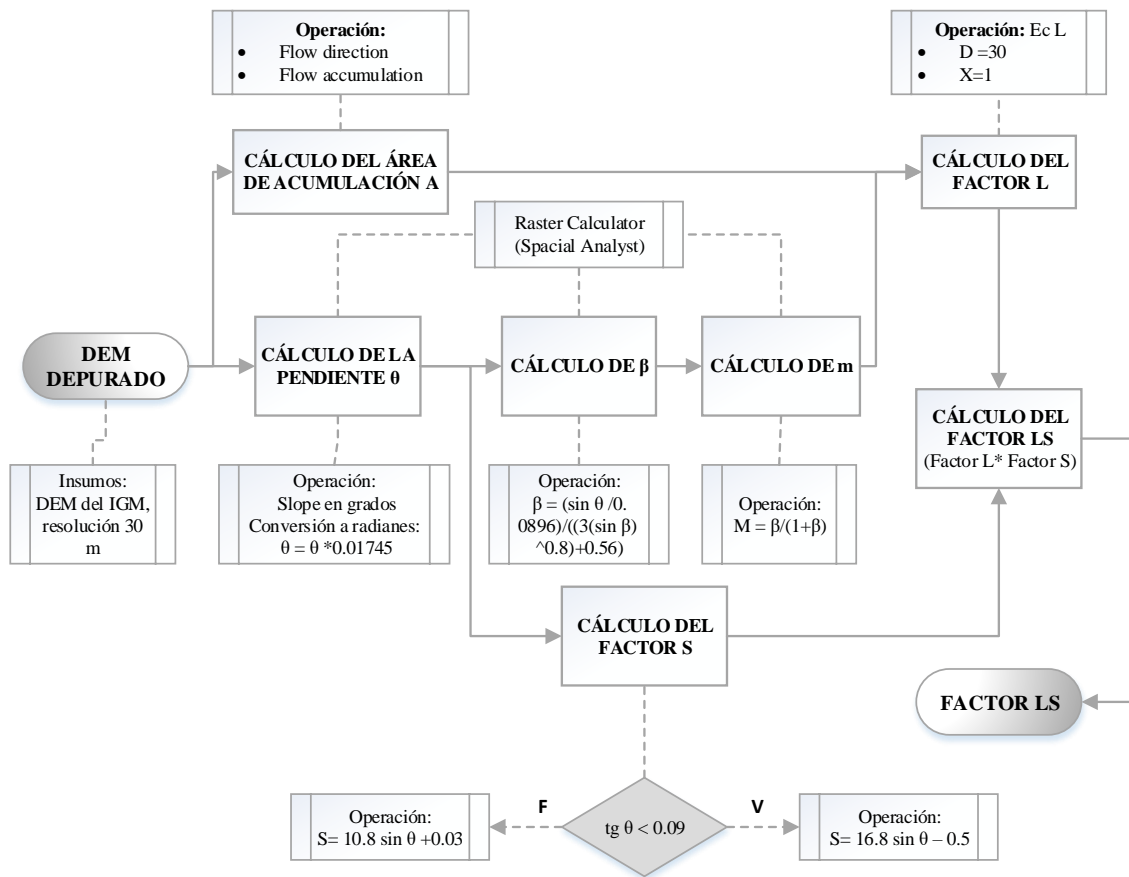


Ilustración 3-21: Algoritmo para determinación del Factor L.S

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

A continuación, se explican detalladamente cada componente de este factor, según los criterios desarrollados por (Wischmeier y Smith 1978) Los factores L y S pueden ser calculados con las siguientes ecuaciones:

3.7.3.1 Cálculo de factor L

Primero se determina el parámetro β . Este parámetro β se calcula utilizando la fórmula:

$$\beta = \frac{\sin \theta}{0,0896}{3 \sin \theta^{0,8} + 0,56}$$

El parámetro β se utiliza para calcular otro parámetro llamado "m", que está en el intervalo de 0 a 1 y se calcula mediante la fórmula:

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

El parámetro m se utiliza para calcular otro parámetro llamado "L", y se calcula mediante la fórmula:

$$L = \frac{[A_{ij} + D]^{(m+1)} - A_{ij}^{(m+1)}}{x^m D^{m+2} (22, 13)^m}$$

Donde:

A: Área de acumulación [m²]

D: Longitud del lado del tamaño del pixel [m]

X: Coeficiente de forma

m: Entre 0 y 1

Θ: Ángulo de la pendiente

β: Tasa de erosión (por surcos a laminar)

3.7.3.2 Cálculo del factor S

El cálculo del Factor S se realiza mediante dos fórmulas diferentes, dependiendo del ángulo de la pendiente. Las fórmulas son las siguientes:

- Si el ángulo de la pendiente (θ) es menor que 0.09 radianes:

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03, \text{ si } tg \theta < 0.09$$

- Si el ángulo de la pendiente (θ) es igual o mayor que 0.09 radianes:

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.05, \text{ si } tg \theta \geq 0.09$$

Para esta metodología se consideró darle más importancia a la longitud de la pendiente donde se utilizaron las fórmulas descritas y se calcularon a partir del modelo de elevación digital con ayuda de la herramienta ráster calculator donde se calculó por separado cada subfactor y luego se multiplicó para obtener el factor L:S , para el factor L se usó una ecuación ajustada a condiciones de alta variabilidad tipográfica , mientras que para el factor S se consideró un condicional para ajustar aún más las ecuaciones y se obtenga un resultado más preciso en comparación a las condiciones reales del terreno de la zona de estudio.

3.7.4 Determinación del Factor C

Para la determinación del factor C se consideró trabajar con la ecuación ajustada a las latitudes tropicales dada la alta variabilidad que existe cuando se quiere estimar una variable relacionada con la cobertura vegetal y la dinámica del suelo. Se siguió la metodología descrita en el siguiente diagrama de flujo:

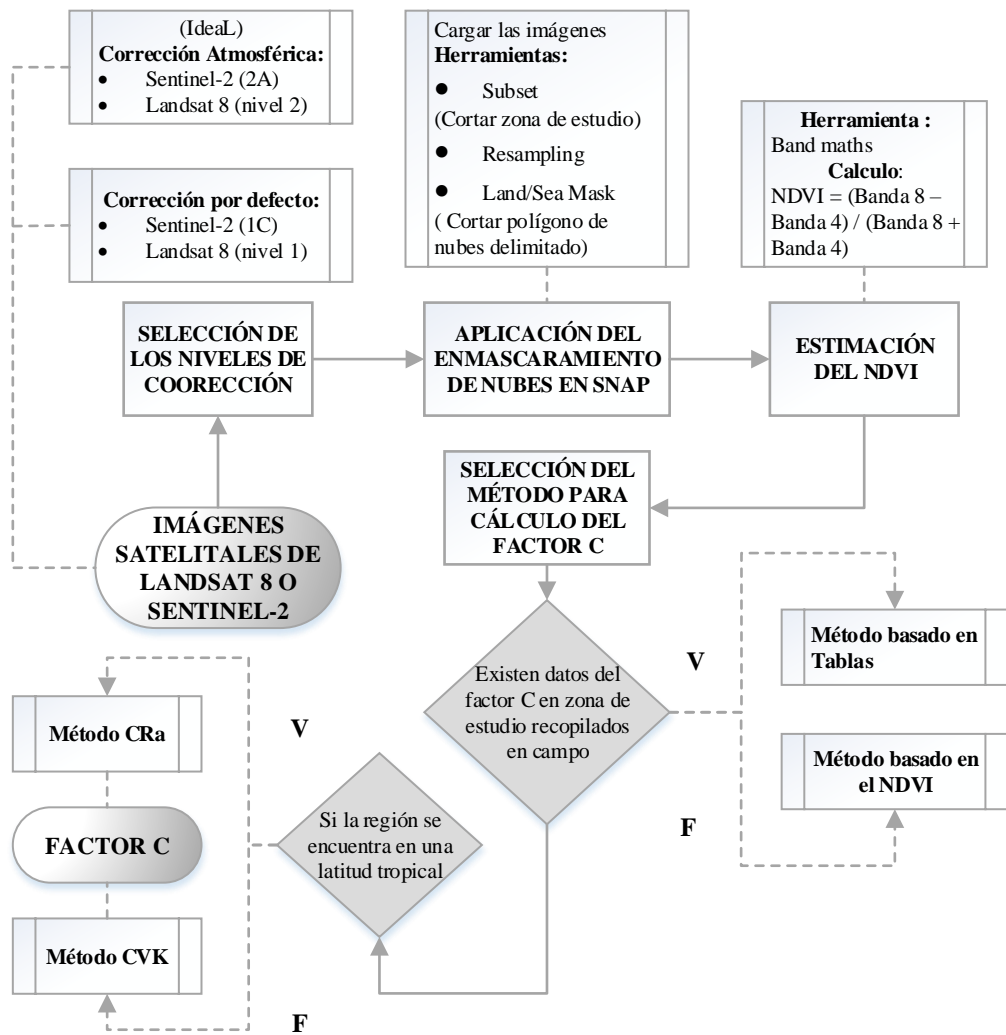


Ilustración 3-22: Algoritmo para determinación del Factor C

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

A continuación, se describen ampliamente cada uno de los pasos utilizados en la estimación del factor:

3.7.4.1 Adquisición de datos y corrección de imágenes satelitales

Se recolectaron imágenes satelitales de reflectancia superficial OLI de Landsat 8 y datos de Sentinel 2 utilizando fuentes de descarga de datos como el Servicio Geológico de los Estados

Unidos (USGS) y EO BROWSER. Se obtuvieron datos de Sentinel 2 con una resolución espacial de 10 m.

Previo a la descarga para en imágenes Sentinel-2, se buscó seleccionar nivel 2A, que proporciona imágenes de reflectancia corregidas atmosféricamente. Para Landsat 8, el nivel 2, que proporciona imágenes de reflectancia corregidas atmosféricamente. Sin embargo, no se encontró la opción de descargar a través de esos niveles de corrección y se descargó los niveles por defecto: 1C para sentinel-2 y nivel 1 para landsat 8

Así mismo, la ubicación geográfica de la zona de estudio presentó un desafío significativo, ya que la presencia de nubosidad en las imágenes satelitales. Afectó la calidad de los datos y limitó la adquisición de datos a los últimos 10 años en las tres microcuencas de interés. Para determinar qué imágenes eran adecuadas para el análisis, se estableció un umbral de 50% estándar para aceptar imágenes satelitales, excluyendo aquellas con una cobertura de nubes que superaba este umbral.

3.7.4.2 Aplicación del enmascaramiento de nubes en SNAP

Dentro del programa SNAP (Sentinel Application Platform), se realizó un enmascaramiento de nubes para identificar y eliminar las áreas de la imagen afectadas por nubes. El proceso de enmascaramiento de nubes se basó en el análisis de la reflectancia espectral en diferentes bandas, lo que permitió detectar la presencia de nubes. Luego de aplicar el enmascaramiento de nubes minucioso, se continuó con el procesamiento de las imágenes para calcular el NDVI.

3.7.4.3 Selección del método para calcular el factor C

Para estimar el factor C, un componente clave en la ecuación RUSLE para calcular la erosión del suelo, se aplicaron tres métodos principales:

- **Método basado en Tablas**

Se consideró la opción de emplear un enfoque basado en tablas como alternativa para estimar el factor C. Este enfoque se basa en la creación de tablas predefinidas que relacionan valores específicos de NDVI con los correspondientes factores C. Estas tablas se construyen mediante datos empíricos recopilados en el terreno o a partir de observaciones satelitales previas. Sin embargo, este enfoque presenta ciertas limitaciones que podrían afectar la precisión y fiabilidad de los resultados (Wischmeier y Smith 1978).

Una de las principales limitaciones del enfoque basado en tablas radica en su dependencia de datos históricos y empíricos, lo que significa que las tablas se elaboran a partir de observaciones pasadas que pueden no reflejar las condiciones actuales del terreno. Esto podría llevar a discrepancias significativas en la estimación del factor C, especialmente si las condiciones del paisaje han experimentado cambios significativos desde la recopilación de los datos utilizados para construir las tablas.

- **Método CRa**

Según (Colman et al. 2018), este método implica la selección y ajuste de parámetros específicos del método CRa según las condiciones climáticas tropicales con precipitaciones intensas en la región de estudio. La fórmula CRa se utilizó para calcular el valor del factor C a partir de los valores de NDVI. Se seleccionó el enfoque CRa debido a que es más adecuado para zonas tropicales, lo que se traduce en una mayor precisión en la estimación del factor C. Se estimó a partir de la siguiente ecuación:

$$C_{rA} = 0,1 \left(\frac{-NDVI + 1}{2} \right)$$

- **Método CVK**

El método según (Van Der Knijff, Jones y Montanarella [sin fecha]), consiste en la relación entre NDVI y el factor C utilizando ecuaciones específicas. Es importante destacar que el enfoque CVK se diseñó originalmente para condiciones climáticas europeas y no es específico para latitudes tropicales.

Se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$C_{VK} = \exp\left(-\alpha \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)}\right)$$

Donde:

α y β : Son valores que se usan para ajustar el resultado del NDVI basados en datos reales obtenidos a partir de mediciones en el campo o datos recopilados por sensores remotos.

Para determinar los valores de α y β en el enfoque CVK, se emplea un método iterativo que busca minimizar la discrepancia entre los valores calculados de C y los valores observados. El proceso inicia con una estimación inicial de α y β . Luego, se usa la fórmula CVK para calcular C y se compara con los valores observados. Si se detecta una diferencia significativa entre los valores calculados y los observados, se ajustan los valores de α y β , y el proceso se repite hasta alcanzar una convergencia satisfactoria.

Finalmente luego de haber analizado los métodos se optó por el enfoque CRa. Debido a su adaptación específica a las condiciones tropicales de la zona altoandina de estudio, lo que implica una mayor precisión en la estimación del factor C. Este enfoque se consideró superior en este contexto particular debido a su capacidad para ajustarse a las condiciones climáticas y topográficas de la región, lo que resultaría en estimaciones más precisas y aplicables a la realidad local. En contraste, los otros enfoques, como el CVK diseñado originalmente para climas europeos en latitudes medias o polares y el enfoque basado en tablas con sus limitaciones debidas a su dependencia de datos históricos y además no existen registros de estimaciones del factor C en la zona de estudio.

3.7.5 Determinación del Factor P

Es importante considera para la metodología de este factor que es necesario que en la zona de estudio haya prácticas de apoyo o labranza del suelo, por ende, existe 2 enfoques, uno que se considera cuando hay prácticas de apoyo y otro que considera la ausencia de practicas

Para determinar el factor P existen 2 enfoques descritos en el siguiente diagrama:

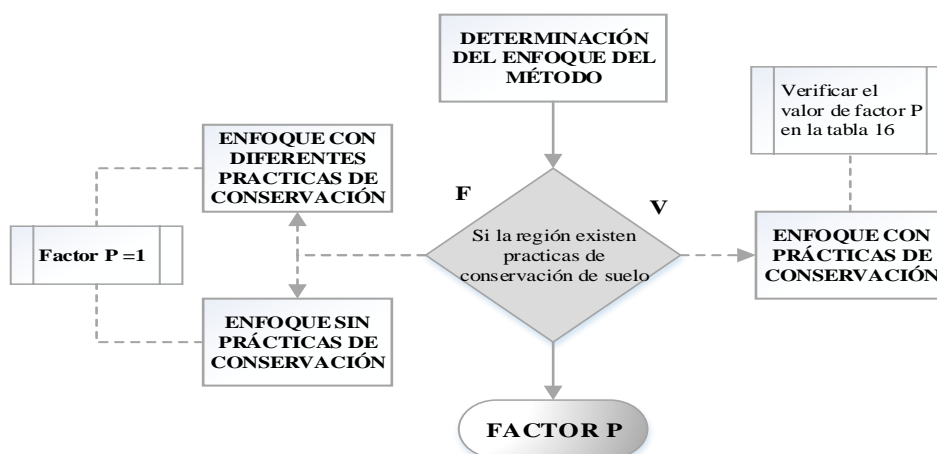


Ilustración 3-23: Algoritmo para determinación del Factor P

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

3.7.5.1 Enfoque con prácticas de conservación

Este enfoque consiste en reconocer si en el área de interés se realizan prácticas de conservación, si es así se considera la tabla recomendada por (Wischmeier y Smith 1978).

Tabla 3-15: Valores del Factor P para diferentes prácticas de conservación

Pendiente (%)	Cultivo a Nivel	Longitud de la lardera (m)	Cultivo en Fajas	Terrazas de Desagüe encespedadas	Terrazas de Infiltración con Contrapendiente
1-2	0.60	(L<122)	0.30	0.12	0.05
3-8	0.50	(L<61)	0.25	0.10	0.05
13-16	0.60	(L<37)	0.30	0.12	0.05
13-16	0.70	(L<24)	0.35	0.14	0.05
17-20	0.80	(L<18)	0.40	0.16	0.06
21-25	0.90	(L<15)	0.45	0.18	0.06

Fuente: (Wischmeier y Smith 1978)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Para aplicar este método se debe medir la pendiente del terreno en porcentaje (%) en la zona de estudio. Hay que tener en cuenta que estos valores de factor P se aplican según la pendiente y las prácticas de conservación, y se pueden ajustar según las condiciones específicas de tu zona de estudio.

3.7.5.2 Enfoque con diferentes prácticas o sin prácticas de conservación

Si en la zona de estudio se aplican prácticas de conservación no contempladas en la tabla, si la pendiente es inferior al 0,2%, o si en su defecto no se aplican prácticas de conservación se asignar un valor de factor P de 1 (Wischmeier y Smith 1978).

Finalmente, analizados estos 2 enfoques, se consideró el segundo enfoque, ya que en la zona de estudio no hay prácticas de conservación como las que muestra en la tabla. Esto se debe a la falta de aplicabilidad de las técnicas específicas mencionadas en la tabla en el contexto de la zona altoandina de estudio, donde las condiciones y recursos no permiten la implementación de tales prácticas. Por lo tanto, se optó por un enfoque más general que contempla tanto la ausencia de prácticas de conservación como la aplicación de otras técnicas que puedan no estar reflejadas en la tabla.

Una vez que se han calculado todos estos factores, simplemente multiplicamos sus valores para obtener la tasa de erosión del suelo anual. Como este valor es esencial para comprender y gestionar la erosión del suelo en la zona de estudio, lo que puede ser de gran importancia para la conservación del suelo y los recursos naturales locales.

3.7.6 Determinación de la pérdida de suelo por del modelo RUSLE

A continuación, se presenta el esquema global de los factores que componen el modelo

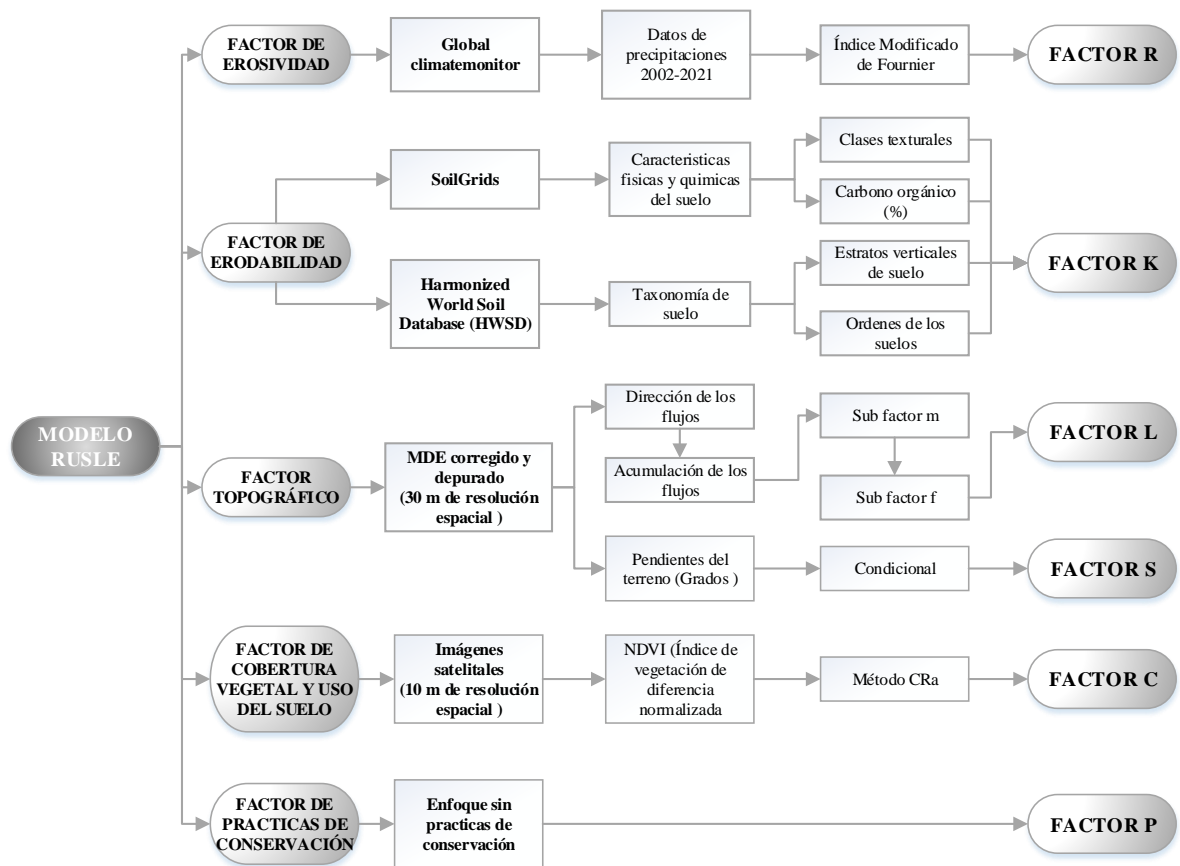


Ilustración 3-24: Algoritmo global de los factores del modelo RUSLE

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Una vez que se han calculado y obtenido todos los factores individuales del modelo RUSLE, se procede a la fase final de la estimación de la pérdida de suelo anual. Esta estimación se realiza multiplicando los valores de los factores, que representan las condiciones específicas de la zona de estudio y su susceptibilidad a la erosión.

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

Donde:

A: Representa la tasa de erosión del suelo anual en toneladas por hectárea por año (t/ha/año).

El resultado de esta multiplicación es la tasa de erosión del suelo expresada en toneladas por hectárea por año ($T \times Ha^{-1} \times Año^{-1}$). Esta tasa representa la cantidad estimada de suelo que se pierde anualmente debido a la erosión hídrica en la zona de estudio. Además, se compara con la tabla 2 “Tasas de erosión hídrica tolerable” para comprobar el nivel de erosión potencial con base en la tasa de erosión.

3.8 Determinación de estadísticos de cada uno de los factores determinados

Es fundamental realizar un análisis detallado de los estadísticos asociados a cada factor que incide en el modelo. En el caso de la temperatura y precipitación media multianual, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA). Sin embargo, al realizar pruebas de normalidad, se determinó que estas variables no siguen una distribución normal, lo que indica la necesidad de enfoques no paramétricos.

3.8.1 *Estadísticos temporales (2002-2021) para variables con series de tiempo*

- **Mínimo:** Se determinó el valor mínimo anual, representando el punto más bajo registrado en cada año para la variable específica.
- **Máximo:** Se identificó el valor máximo anual, indicando el punto más alto alcanzado durante cada año.
- **Rango:** Se calculó la diferencia entre el valor máximo y mínimo de los 12 meses de cada año, proporcionando una medida de la variabilidad dentro de cada periodo anual.
- **Promedio:** Se obtuvo la media de los valores mensuales de cada año, representando la tendencia central de la variable en cuestión.
- **Mediana:** Se determinó el valor central de la distribución anual, lo que proporciona una medida robusta frente a posibles valores extremos.
- **Desviación Estándar:** Se calculó la medida de dispersión de los datos mensuales de cada año, evaluando cuánto se alejan los valores individuales de la media anual.
- **Coefficiente de Variación (%):** Se obtuvo la proporción de la desviación estándar al promedio, expresada como un porcentaje, para evaluar la relativa variabilidad respecto a la media.
- **Error Estándar:** Se estimó la variabilidad de la media anual, proporcionando información sobre cuán confiables son las mediciones promedio a lo largo del tiempo.
- **Cuartil Inferior y Superior:** Se calcularon los valores que separan el 25% inferior y superior de la distribución anual, ofreciendo información sobre la distribución de los datos.
- **Rango Intercuartílico:** Se determinó el rango entre el cuartil superior e inferior, abarcando el 50% central de los datos anuales. Este estadístico se utilizó para identificar la presencia de posibles valores atípicos.

3.8.2 *Estadísticos extraídos de las propiedades de cada raster*

Se extrajeron los estadísticos: mínimo, máximo, media, desviación estándar, directamente de las propiedades de cada raster. Además, se calcularon con base en estos estadísticos, el rango que es

la diferencia del valor mínimo y máximo del raster y también se calculó el coeficiente de variación: en porcentaje que es la proporción de la desviación estándar a la media y mide la variabilidad relativa de una variable en este caso de los raster.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Interpretación de las geomorfometrías de las unidades hidrográficas

4.1.1 Análisis de parámetros físicos de las unidades hidrográficas

Tabla 4-1: Resultados de los parámetros físicos de las microcuencas

	Siglas	Unidades	Atillo	Ozogoche	Yasepan
Parámetros físicos de la cuenca					
Área de la cuenca	A	km ²	101,40	190,59	153,39
Perímetro de una cuenca	P	km	62,89	87,90	79,64
Longitud axial de la cuenca	Lax	Km	17,27	26,37	25,81
Ancho de la cuenca	W	km	5,87	7,23	5,94

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

4.1.1.1 Resultados del cálculo del área (A)

Los resultados revelan que Ozogoche ostenta la mayor extensión territorial entre las tres microcuencas, abarcando 190,59 km², equivalente a 19058 ha. Le sigue Yasepan con 153,39 km², aproximadamente 15,339 ha, y Atillo con 101,40 km², correspondientes a 10140 ha. Esta variabilidad en el área sugiere posibles disparidades en la capacidad de acumulación de agua, lo que podría ejercer influencia en la dinámica hidrológica y los procesos erosivos.

4.1.1.2 Resultados del cálculo del perímetro (P)

En términos de forma y contorno de la cuenca, Ozogoche exhibe el perímetro más largo con 87.90 km, seguido por Yasepan con 79,64 km y Atillo con 62,89 km. Estas diferencias en perímetro sugieren una mayor complejidad y fragmentación en la forma de la cuenca de Ozogoche, lo que podría tener implicaciones en la velocidad de escurrimiento y el potencial erosivo.

4.1.1.3 Interpretación de la estimación de longitud axial de las cuencas (Lax)

Los resultados indican que Ozogoche tiene la longitud axial de cuenca (Lax) más extensa, con 26.37 km, seguida por Yasepan con 25,81 km y Atillo con 17,27 km. Esto implica que la cuenca

de Ozogoche tiene una configuración alargada en su sistema de drenaje principal, lo que podría influir en la velocidad y dirección del flujo de agua y la erosión a lo largo de su red fluvial.

4.1.1.4 Resultados del cálculo de ancho de las cuencas (W)

El ancho de la cuenca (W) refleja la extensión transversal de la cuenca. Ozogoche tiene el ancho más amplio con 7,23 km, seguido por Yasepan con 5,94 km y Atillo con 5.87 km. Esta diferencia en el ancho puede tener un impacto en cómo se distribuye el flujo de agua y la erosión en cada microcuenca.

4.1.1.5 Comparación de los parámetros físicos de las unidades hidrográficas

Ozogoche sobresale por tener el área más grande, el perímetro más largo y la longitud axial de la cuenca más extensa, lo que sugiere una mayor extensión territorial y una configuración alargada en su sistema de drenaje. Esto podría influir en una mayor capacidad de acumulación de agua y en una mayor complejidad en la dirección y velocidad del flujo de agua. En contraste, Atillo tiene el área más pequeña y el menor perímetro, indicando una cuenca más compacta y potencialmente una velocidad de escurrimiento más rápida. Por otro lado, Yasepan se sitúa en un punto intermedio en términos de área, perímetro y longitud axial de la cuenca. La diferencia en el ancho de la cuenca también es relevante, con Ozogoche teniendo el ancho más amplio.

4.1.2 Análisis de parámetros de forma de las unidades hidrográficas

Tabla 4-2: Resultados de los parámetros de forma de las microcuencas

	Siglas	Unidades	Atillo	Ozogoche	Yasepan
Parámetros de forma de la cuenca					
Coefficiente de compacidad de Gravelius	Kc	-	1,76	1,80	1,81
Factor de forma	Kf	-	0,34	0,27	0,23
Coefficiente de masividad	Km	-	35,63	19,83	22,81

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

4.1.2.1 Resultados del cálculo del coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)

Los resultados del cálculo del coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc) para las microcuencas de Ozogoche, Yasepan y Atillo, presentados en la tabla 4, revelan diferencias significativas en la forma de estas cuencas. Ozogoche muestra el valor más alto de 1,80, seguido por Yasepan con 1.81, mientras que Atillo presenta el valor más bajo con 1,76. De acuerdo con la clasificación

asociada en la tabla, Ozogoche y Yasepan se ubican en la categoría de "Oval redonda a oval oblonga," indicando formas más alargadas y menos compactas. En contraste, Atillo se clasifica como "Casi redonda a oval redonda," sugiriendo una forma más redonda y compacta.

Esta variabilidad en la clasificación del coeficiente de compacidad de Gravelius entre las microcuencas puede tener implicaciones significativas en el comportamiento hidrológico de cada una. Para Ozogoche y Yasepan, al presentar formas más alargadas, es probable que tengan tiempos de concentración más largos, lo que podría influir en la velocidad de drenaje del agua y aumentar su susceptibilidad a inundaciones rápidas después de eventos de precipitación. Por otro lado, Atillo, al ser clasificada como casi redonda a oval redonda, podría poseer tiempos de concentración más cortos, haciéndola menos susceptible a inundaciones rápidas.

4.1.2.2 Interpretación del valor del factor de forma (Kf)

La evaluación del factor de forma (Kf) revela que Atillo presenta un valor de 0,34, indicando una forma ligeramente alargada en su cuenca, mientras que Ozogoche y Yasepan muestran formas más alargadas con valores de 0,27 y 0,23, respectivamente. Haciendo referencia a la tabla 5, estos valores sitúan a Atillo en la categoría de "Ligeramente alargada", mientras que Ozogoche y Yasepan caen en la clasificación de "Alargada".

Estas interpretaciones sugieren que Atillo puede tener un equilibrio entre la eficiencia del drenaje y la retención de agua, mientras que Ozogoche y Yasepan, al ser consideradas "Alargadas", podrían experimentar un drenaje más eficiente debido a su forma alargada. Estas diferencias en la forma de las cuencas tienen implicaciones significativas para la dinámica hidrológica, destacando la importancia de considerar la forma de la cuenca en las estrategias de gestión del agua y la planificación del uso del suelo para garantizar un manejo adecuado de los recursos hídricos y reducir los riesgos asociados a eventos climáticos extremos.

4.1.2.3 Resultados del cálculo del coeficiente de masividad (Km)

Los resultados del cálculo del coeficiente de masividad (Km) para las microcuencas de Ozogoche, Yasepan y Atillo, detallados en la tabla 6, revelan notables disparidades en la topografía de estas áreas. Atillo muestra el valor más alto con 35,63, indicando una topografía más montañosa con pendientes moderadas y altitudes intermedias. Por otro lado, Ozogoche presenta el valor más bajo con 19,83, seguido por Yasepan con 22,81, sugiriendo que ambas microcuencas tienen una topografía muy montañosa caracterizada por pendientes empinadas y altitudes elevadas.

En concordancia con la clasificación establecida en la tabla, Atillo se encuentra en la categoría de "Muy Montañosa," corroborando la presencia de una topografía muy accidentada. En contraste, Ozogoche y Yasepan caen en la clasificación de "Montañosa," destacando su topografía accidentada con pendientes pronunciadas y altitudes considerables. Estas diferencias en la masividad de las microcuencas pueden tener implicaciones sustanciales en la dinámica hidrológica y la erosión en cada área. Las microcuencas con topografías más montañosas y empinadas, como Ozogoche y Yasepan, pueden experimentar procesos hidrológicos más intensos, incluyendo la posibilidad de una erosión más pronunciada. Por otro lado, Atillo, al tener una topografía menos accidentada, podría presentar una dinámica hidrológica y erosión menos extrema.

4.1.2.4 Comparación de los parámetros de forma de las unidades hidrográficas

La evaluación conjunta de los parámetros de forma de las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan proporciona una perspectiva integral de sus características distintivas. Atillo se destaca al presentar valores más altos en el coeficiente de compacidad de Gravelius (K_c) y el coeficiente de masividad (K_m), indicando una forma más compacta y una topografía menos accidentada. Además, su factor de forma (K_f) sugiere una forma ligeramente alargada. Estas características sugieren que Atillo puede experimentar un drenaje de agua más lento, una menor susceptibilidad a inundaciones y menos erosión del suelo en comparación con las otras microcuencas.

En contraste, tanto Ozogoche como Yasepan exhiben valores más bajos en K_c y K_m , indicando formas más alargadas y topografías más montañosas, caracterizadas por pendientes pronunciadas y altitudes elevadas. La forma de estas microcuencas, según el factor de forma (K_f), se clasifica como "Alargada". Estas características sugieren que Ozogoche y Yasepan pueden ser más propensos a un drenaje rápido y a la erosión del suelo debido a sus formas alargadas y topografías montañosas.

Esta variabilidad en los parámetros de forma tiene importantes implicaciones en la dinámica hidrológica y la erosión en cada área. Atillo, con su forma compacta y topografía menos accidentada, puede experimentar una dinámica hidrológica más controlada, mientras que Ozogoche y Yasepan, al ser más alargados y montañosos, podrían estar sujetos a procesos hidrológicos más intensos, incluida una mayor susceptibilidad a inundaciones y erosión del suelo.

4.1.3 Interpretación de la altimetría de la cuenca hidrográfica

Tabla 4-3: Resultados de los parámetros de altimetría de las microcuencas

	Siglas	Unidades	Atillo	Ozogoche	Yasepan
Altimetría de la cuenca					
Cota máxima	Hmax	m.s.n.m.	3917	4247	3726
Cota mínima	Hmin	m.s.n.m.	3308	3312	3273
Desnivel altitudinal	Dac	m	609	935	453
Altitud media	Hmc	m.s.n.m.	3613	3780	3500
Altitud más frecuente	Hfc	m.s.n.m.	3460	3546	3386

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

4.1.3.1 Resultados de la cota mínima (*Hmin*) y cota máxima (*Hmax*) de las cuencas

El análisis de altimetría de las microcuencas muestra variaciones notables en sus cotas mínimas y máximas. Atillo presenta una cota máxima de 3917 m.s.n.m. y una cota mínima de 3308 m.s.n.m., lo que resulta en un desnivel altitudinal (*Dac*) de 609 m. Ozogoche, por otro lado, exhibe una cota máxima de 4247 m.s.n.m. y una cota mínima de 3312 m.s.n.m., generando un *Dac* de 935 m. En contraste, Yasepan tiene una cota máxima de 3726 m.s.n.m. y una cota mínima de 3273 m.s.n.m., con un *Dac* de 453 m. Estas diferencias altitudinales son fundamentales para comprender la dinámica hidrológica y la erosión en cada microcuenca.

4.1.3.2 Interpretación del cálculo del desnivel altitudinal (*Dac*)

El *Dac* proporciona información sobre la variación altitudinal en las microcuencas. Atillo y Ozogoche, con *Dac* de 609 y 935 m respectivamente, indican topografías montañosas y pronunciadas diferencias de altitud. Estas características pueden influir en la generación de flujos de agua y erosión en las cuencas. Por otro lado, Yasepan, con un *Dac* de 453 m, muestra una topografía menos abrupta, lo que podría afectar la velocidad del flujo de agua y la erosión en su área.

4.1.3.3 Resultados de la aproximación de la altitud media (*Hmc*)

Los valores de altitud media (*Hmc*) reflejan las altitudes promedio de las microcuencas. Atillo y Ozogoche tienen *Hmc* de 3613 y 3780 m.s.n.m. respectivamente, siendo más elevadas en comparación con Yasepan, que registra una *Hmc* de 3500 m.s.n.m. Estas diferencias altitudinales influyen en la disponibilidad de agua y la erosión en las microcuencas. Atillo y Ozogoche, al estar a altitudes más elevadas, pueden experimentar cambios en los patrones de precipitación y escurrimiento de agua, lo que impacta en la erosión del suelo. Yasepan, a altitudes más bajas, puede tener una dinámica hidrológica diferente.

4.1.3.4 Comparación de los parámetros de altimetría de las unidades hidrográficas

A comparación de las cotas máximas y mínimas revela diferencias notables entre las microcuencas. Atillo posee la cota máxima más baja, de 3917 m.s.n.m., y la cota mínima más alta, de 3308 m.s.n.m., lo que da como resultado un desnivel altitudinal (Dac) de 609 m. En contraste, Ozogoche tiene la cota máxima más alta, de 4247 m.s.n.m., y la cota mínima más baja, de 3312 m.s.n.m., generando un Dac de 935 m. Yasepan se encuentra en un punto intermedio, con una cota máxima de 3726 m.s.n.m. y una cota mínima de 3273 m.s.n.m., lo que da lugar a un Dac de 453 m.

Estas diferencias en la altimetría influyen en la velocidad y la dirección del flujo de agua, así como en la erosión del suelo en cada microcuenca. Por otra parte, la altitud media (Hmc) de Atillo y Ozogoche es más alta, 3613 y 3780 m.s.n.m. respectivamente, en comparación con Yasepan, que registra una Hmc de 3500 m.s.n.m. Esta variación en la altitud media tiene un impacto significativo en la disponibilidad de agua y la dinámica hidrológica. Atillo y Ozogoche, debido a sus altitudes más elevadas, pueden experimentar patrones de precipitación y escurrimiento de agua diferentes, lo que influye en la erosión del suelo y la dinámica de los ríos en estas cuencas. Yasepan, al encontrarse a altitudes más bajas, puede tener un comportamiento hidrológico distinto.

4.1.4 Análisis de parámetros de relieve de las unidades hidrográficas

Tabla 4-4: Resultados de los parámetros de relieve de las microcuencas

	Siglas	Unidades	Atillo	Ozogoche	Yasepan
Parámetros de relieve de una cuenca					
Tipos de relieve	-	-	Accidentado	Accidentado	Medianamente accidentado
Pendiente media de la cuenca	Pmc	%	17,85	16,68	14,80
Curva Hipsométrica (zona)	Hc	-	B	B	A
Elevación mediana de la cuenca	Emc	m.n.mm	3643	3826	3477

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

4.1.4.1 Interpretación de la aproximación de la pendiente media de la cuenca (Pmc)

Con base en la Tabla 7, que presenta los rangos de pendiente media y sus correspondientes características de relieve, se determinaron los valores específicos para cada microcuenca. La pendiente media (Pmc) en Atillo se registró como la más pronunciada, alcanzando un 17,85%. Ozogoche exhibió una Pmc ligeramente menor, con un 16,68%, mientras que Yasepan presentó la menor, con un 14,80%. Estos resultados indican que Atillo posee pendientes más considerables, coincidiendo con la presencia de montañas, valles profundos y terreno abrupto. Ozogoche también muestra una topografía accidentada, mientras que Yasepan es menos abrupta. Esta variación en Pmc podría influir significativamente en la capacidad de drenaje y la erosión del suelo en cada microcuenca.

4.1.4.2 Análisis de la caracterización del tipo de relieve

El análisis detallado de la caracterización del tipo de relieve, tomando como referencia la Tabla 7, revela que Atillo y Ozogoche comparten un relieve accidentado, en consonancia con los valores de Pmc. Esta condición se traduce en pendientes pronunciadas, la presencia de colinas, valles profundos y terreno desafiante para actividades agrícolas y de construcción. Por otro lado, Yasepan exhibe un relieve medianamente accidentado, con pendientes menos marcadas en comparación con las otras dos microcuencas. Esta diferencia en las características del relieve puede tener implicaciones significativas en la eficiencia del drenaje y la retención de agua en cada área, afectando directamente la dinámica hidrológica y los procesos erosivos. Asimismo, estas variaciones podrían influir en la capacidad de acumulación de agua en cada microcuenca, lo que podría tener consecuencias importantes para la gestión sostenible del recurso suelo en estas regiones.

4.1.4.3 Resultados de la estimación de curva hipsométrica (Hc)

Con base en la Tabla 8, que clasifica los cauces fluviales según su evolución y características, se procedió a evaluar los resultados de la estimación de la Curva Hipsométrica (Hc) para cada microcuenca. La Hc refleja la distribución altitudinal de las microcuencas y proporciona información valiosa sobre la evolución de los cauces en función de su edad. En este contexto, se observa que Atillo y Ozogoche exhiben cauces maduros, indicando un predominio en el transporte de sedimentos y agua, y sugiriendo que la cuenca está en una fase de equilibrio. Esta condición implica una mayor producción de sedimentos y agua, lo que aumenta su potencial erosivo. Ambas microcuencas comparten características geográficas similares debido a sus altitudes elevadas y topografía montañosa.

En contraste, Yasepan muestra cauces jóvenes, lo que sugiere que prevalece la producción de sedimentos y aguas, indicando un mayor potencial erosivo. Aunque Yasepan tiene altitudes más bajas, la presencia de cauces jóvenes puede asociarse con una topografía más abrupta o factores geomorfológicos que aumentan su capacidad erosiva. Esta variación en la evolución de los cauces entre las microcuencas puede tener implicaciones importantes para la gestión del suelo y la conservación, ya que las áreas con cauces jóvenes podrían requerir medidas más intensivas de control de erosión para mitigar su potencial impacto en el suelo y los recursos hídricos circundantes

Tabla 4-5: Análisis de la curva hipsométrica y frecuencia de altimetrías en microcuenca del río Atillo

Zona de intervalos	Cota(m.s.n.m.)			Área (km ²)				Altimetría
	Mínimo	Máximo	Altura Promedio	Área entre intervalos	Área Acumulada	% Área Acumulada	% Área entre curvas	
1	3308,0	3368,9	3338,5	14,7	102,3	100,0	14,4	
2	3368,9	3429,8	3399,4	7,1	87,6	85,6	6,9	
3	3429,8	3490,7	3460,3	6,2	80,5	78,7	6,1	
4	3490,7	3551,6	3521,2	7,0	74,3	72,6	6,9	
5	3551,6	3612,5	3582,1	6,7	67,3	65,8	6,5	
6	3612,5	3673,4	3643,0	21,7	60,6	59,3	21,2	
7	3673,4	3734,3	3703,9	3,5	38,9	38,0	3,4	
8	3734,3	3795,2	3764,8	3,5	35,4	34,6	3,4	
9	3795,2	3856,1	3825,7	3,6	31,9	31,2	3,6	
10	3856,1	3917,0	3886,6	28,3	28,3	27,6	27,6	
Total			3612,5	102,3				

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

La tabla proporciona datos detallados sobre la distribución altitudinal de la microcuenca Atillo. Con intervalos de elevación y áreas acumuladas, se puede observar claramente cómo se distribuyen las altitudes en esta cuenca. La elevación media de 3643 m.s.n.m. coincide con la elevación mediana obtenida de la curva hipsométrica, y el área acumulada en la zona de transporte (B) representa el 59,3% del área total.

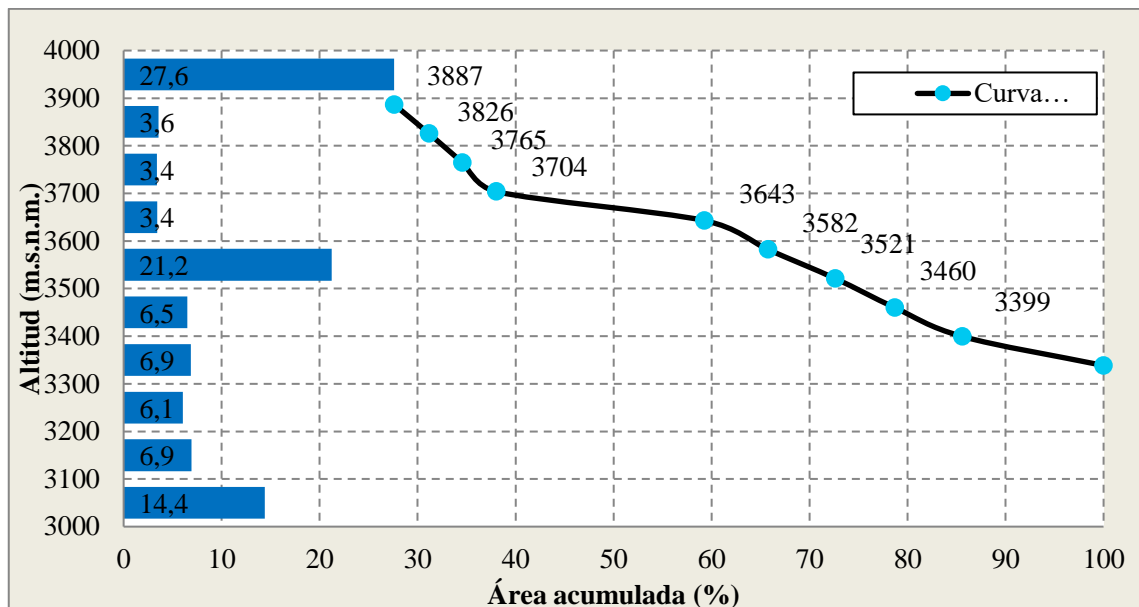


Ilustración 4-1: Curva hipsométrica de la microcuenca de Atillo

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

La curva hipsométrica de la microcuenca Atillo revela una distribución altitudinal equilibrada con una elevación mediana de 3643 m.s.n.m. La zona de transporte (B) abarca el 59,3% del área acumulada, indicando un potencial erosivo moderado y una capacidad de drenaje media. La tabla complementaria muestra que el área total de la microcuenca es de 8.6 km², con una elevación mínima de 2800 m.s.n.m. y una elevación máxima de 4200 m.s.n.m., confirmando la información de la curva hipsométrica.

Tabla 4-6: Análisis de la curva hipsométrica y frecuencia de altimetrías en microcuenca del río Ozogche

Zona de Intervalos	Cota(m.s.n.m.)			Área (km ²)				Altimetría
	Mínimo	Máximo	Altura Promedio	Área entre intervalos	Área Acumulada	% Área Acumulada	% Área entre curvas	
1	3312,0	3405,5	3358,8	5,1	191,9	100,0	2,7	
2	3405,5	3499,0	3452,3	11,7	186,8	97,3	6,1	
3	3499,0	3592,5	3545,8	13,5	175,1	91,2	7,0	
4	3592,5	3686,0	3639,3	31,3	161,6	84,2	16,3	
5	3686,0	3779,5	3732,8	24,6	130,3	67,9	12,8	
6	3779,5	3873,0	3826,3	74,3	105,7	55,1	38,7	
7	3873,0	3966,5	3919,8	12,7	31,3	16,3	6,6	
8	3966,5	4060,0	4013,3	10,0	18,7	9,7	5,2	
9	4060,0	4153,5	4106,8	4,1	8,7	4,5	2,1	
10	4153,5	4247,0	4200,3	4,6	4,6	2,4	2,4	
Total			3779,5	191,9				

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Esta tabla proporciona una representación más detallada de la distribución altitudinal en la microcuenca Ozogoche, incluyendo intervalos de elevación y áreas acumuladas. La elevación media de 3826 m.s.n.m. coincide con la elevación mediana obtenida de la curva hipsométrica, y el área acumulada en la zona de sedimentación (C) representa el 55.1% del área total.

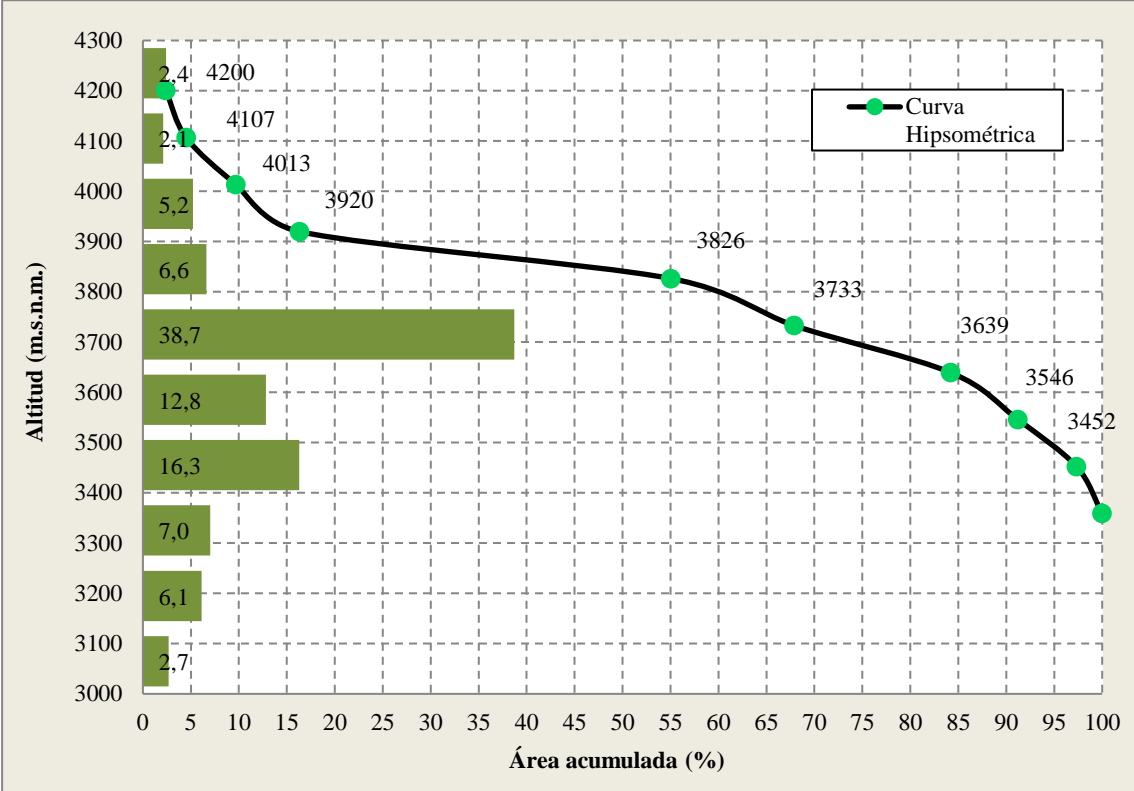


Ilustración 4-2: Curva hipsométrica de la microcuenca de Ozogoche

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

La curva hipsométrica de la microcuenca Ozogoche exhibe una distribución altitudinal desigual con una elevación mediana de 3826 m.s.n.m. La zona de sedimentación (C) predomina con un 55,1% el área acumulada, lo que sugiere un potencial erosivo bajo y una alta capacidad de drenaje. La tabla correspondiente muestra que el área total de la microcuenca es de 7.5 km², con una elevación mínima de 3400 m.s.n.m. y una elevación máxima de 4600 m.s.n.m., respaldando los resultados de la curva hipsométrica.

Tabla 4-7: Análisis de la curva hipsométrica y frecuencia de altimetrías en microcuenca del río Yasepan

Zona de Intervalos	Cota(m.s.n.m.)			Área (km ²)				Altimetría
	Mínimo	Máximo	Altura Promedio	Área entre intervalos	Área Acumulada	% Área Acumulada	% Área entre curvas	
1	3273,0	3318,3	3295,7	2,4	154,6	100,0	1,6	
2	3318,3	3363,6	3341,0	5,2	152,2	98,4	3,4	
3	3363,6	3408,9	3386,3	7,9	146,9	95,1	5,1	
4	3408,9	3454,2	3431,6	10,2	139,1	90,0	6,6	
5	3454,2	3499,5	3476,9	8,3	128,8	83,3	5,4	
6	3499,5	3544,8	3522,2	7,9	120,5	78,0	5,1	
7	3544,8	3590,1	3567,5	8,2	112,7	72,9	5,3	
8	3590,1	3635,4	3612,8	10,3	104,4	67,6	6,6	
9	3635,4	3680,7	3658,1	10,3	94,2	60,9	6,7	
10	3680,7	3726,0	3703,4	83,8	83,8	54,2	54,2	
Total			3499,5	154,6				

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

La tabla proporciona información clave sobre la distribución altitudinal en la microcuenca Yasepan, incluyendo intervalos de elevación y áreas acumuladas. La elevación media de 3477 m.s.n.m. coincide con la elevación mediana obtenida de la curva hipsométrica, y el área acumulada en la zona de erosión (A) representa el 54,2% del área total. Estos datos indican una distribución equilibrada de altitudes en esta microcuenca.

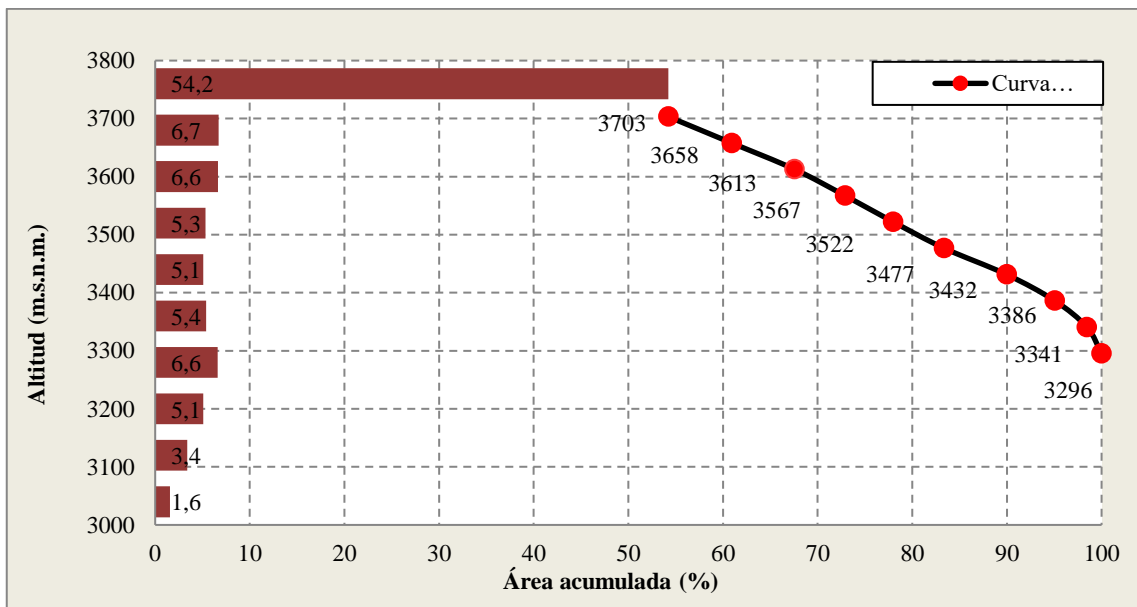


Ilustración 4-3: Curva hipsométrica de la microcuenca de Yasepan

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

La curva hipsométrica de la microcuenca Yasepan muestra una distribución altitudinal uniforme con una elevación mediana de 3477 m.s.n.m. La zona de erosión (A) prevalece con un 54,2% del área acumulada, indicando un potencial erosivo alto y una capacidad de drenaje baja. La tabla correspondiente detalla que el área total de la microcuenca es de 9 km², con una elevación mínima de 2800 m.s.n.m. y una elevación máxima de 4,200 m.s.n.m., respaldando los resultados de la curva hipsométrica. Interpretación de la aproximación de la elevación mediana de la cuenca (Emc)

Los valores de elevación mediana de la cuenca (Emc) señalan diferencias considerables en la altitud promedio de las microcuencas. Atillo, con la elevación mediana más alta de 3643 m.s.n.m., destaca por su topografía montañosa. Ozogoche sigue con 3826 m.s.n.m., manteniendo características geográficas similares. Por el contrario, Yasepan, con 3477 m.s.n.m., exhibe altitudes más bajas y una topografía menos abrupta. Estas diferencias son clave para comprender las variaciones en la dinámica hidrológica y erosiva entre las microcuencas.

4.1.4.4 Comparación de los parámetros de relieve de las unidades hidrográficas

Los resultados de la evaluación detallada de los parámetros de relieve de las microcuencas, como se presenta en la Tabla 21, brindan una visión integral de las características topográficas de Atillo, Ozogoche y Yasepan. Con base en la interpretación de la pendiente media de la cuenca (Pmc), se observa que Atillo exhibió la Pmc más pronunciada, registrando un valor de 17,85%, indicando un relieve accidentado acorde con la presencia de montañas, valles profundos y terreno abrupto. Ozogoche, aunque presenta una topografía también accidentada, mostró una Pmc ligeramente menor, con un 16,68%, mientras que Yasepan exhibió la Pmc más baja, con un 14,80%, evidenciando un relieve medianamente accidentado.

El análisis de la caracterización del tipo de relieve, considerando la Tabla 7 como referencia, revela que Atillo y Ozogoche comparten un relieve accidentado, respaldando los resultados de la Pmc y destacando la presencia de pendientes pronunciadas, colinas y valles profundos. En contraste, Yasepan exhibe un relieve medianamente accidentado, caracterizado por pendientes menos marcadas en comparación con las otras dos microcuencas. En términos de la distribución altitudinal y la evolución de los cauces, según la Curva Hipsométrica (Hc) y la clasificación de los cauces fluviales, se observa que Atillo y Ozogoche presentan cauces maduros, indicando una fase de equilibrio y una mayor capacidad de transporte de sedimentos y agua. Yasepan, por otro lado, muestra cauces jóvenes, señalando un potencial erosivo significativo.

La comparación de los parámetros de relieve entre las unidades hidrográficas destaca la influencia directa de la topografía en la dinámica hidrológica de cada microcuenca. Atillo, con su relieve montañoso y pendiente pronunciado, se destaca como la microcuenca con mayor potencial erosivo. Ozogoche, aunque también accidentada, presenta características que sugieren una capacidad de drenaje y retención de agua más equilibrada. Yasepan, con su relieve medianamente accidentado, muestra la menor pendiente y elevación, indicando una menor susceptibilidad a procesos erosivos intensos.

Esta información proporciona una base sólida para la comprensión de las variaciones en la dinámica hidrológica y erosiva entre las microcuencas, lo que a su vez es crucial para el diseño e implementación de estrategias de conservación y gestión sostenible del recurso suelo en estas áreas.

4.2 Cuantificación de las hidromorfometrías de las unidades hidrográficas

4.2.1 Análisis y evaluación de la red de drenaje

Tabla 4-8: Parámetros de las características de red de drenaje

	Siglas	Unidades	Atillo	Ozogoche	Yasepan
Características de la red de drenaje					
Longitud del cauce principal	Lrp	km	16,05	21,11	17,92
Longitud de la red hídrica (Aportaciones)	Lrh	km	11,64	21,04	19,61
Pendiente media del cauce principal	Pmrp	%	5,50	18,76	22,61

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

4.2.1.1 Resultados del cálculo de la longitud del cauce principal (*Lcp*)

Los resultados del cálculo de la longitud del cauce principal para las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan muestran que Atillo tiene un cauce principal de 16,05 km, Ozogoche de 21,11 km y Yasepan de 17,92 km. Estas diferencias en las longitudes de los cauces principales pueden indicar la extensión de la red de drenaje en cada microcuenca, lo que tiene un impacto en la generación de escurrimiento y la erosión.

4.2.1.2 Resultados del cálculo de la longitud de la red hídrica (*Lrh*)

La longitud de la red hídrica también proporciona información importante sobre la extensión de las redes de drenaje en las microcuencas. Atillo tiene una *Lrh* de 11,64 km, Ozogoche de 21,04 km y Yasepan de 19,61 km. Estos valores indican la longitud total de las corrientes y canales de drenaje en cada microcuenca, lo que influye en la cantidad de agua que fluye a través de ellas y, por lo tanto, en la erosión potencial.

4.2.1.3 Interpretación de la estimación de la pendiente media del cauce principal (*Pmcp*)

La interpretación de la estimación de la pendiente media del cauce principal (*Pmcp*) proporciona información valiosa sobre las características hidrológicas específicas de cada microcuenca. Según la Tabla 9, Atillo se caracteriza por una pendiente suave, con un *Pmcp* del 5,50%. Esta condición sugiere un flujo de agua moderado en el cauce principal, con la posibilidad de experimentar erosión del suelo durante eventos de lluvia intensa. Ozogoche, por otro lado, exhibe una pendiente moderada, con un *Pmcp* del 18,76%, indicando un flujo de agua más rápido y la posibilidad de experimentar erosión significativa.

En contraste, Yasepan presenta una pendiente fuerte en su cauce principal, con un P_{mcp} del 22,61%. Este valor señala un flujo de agua muy rápido, lo que aumenta la susceptibilidad a la erosión severa y deslizamientos de tierra en esta microcuenca. Estas diferencias en la pendiente del cauce principal entre las microcuencas tienen implicaciones directas en la dinámica hidrológica y en la posibilidad de procesos erosivos más intensos.

4.2.1.4 Representación del perfil longitudinal (PI)

El perfil longitudinal (PI) proporciona una representación gráfica de cómo varía la elevación a lo largo de un cauce. El análisis de estos perfiles permitirá comprender mejor cómo se comporta el flujo de agua y cómo la topografía influye en la erosión en cada microcuenca. La representación detallada de estos perfiles en futuros estudios contribuirá a una comprensión más profunda de los procesos erosivos y de drenaje en las microcuencas.

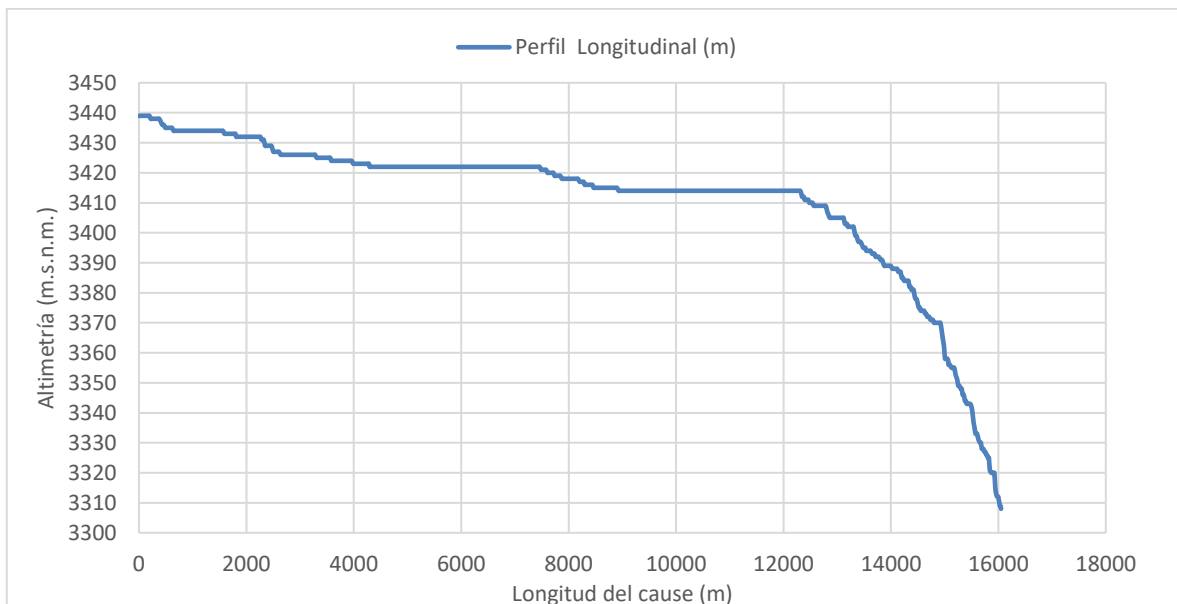


Ilustración 4-4: Perfil longitudinal del río Atillo

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En el análisis del perfil del cauce principal del río Atillo refleja por su forma en la gráfica que tiende a ser mayormente un río maduro por sus patrones significativos. Inicialmente, en la parte superior del recorrido, la altimetría se encuentra en niveles relativamente altos y, a medida que avanza a lo largo del cauce principal, experimenta una disminución con variabilidad en la altitud, de forma descendente.

Desde el inicio del cauce a los 3440 tiene una pendiente pronunciada e irregular hasta los 3425 m.s.n.m. dónde la pendiente empieza a tener pendiente suave aproximadamente unos 3 km hasta

los 3420 dónde nuevamente adquiere el terreno empieza adquirir una pendientes pronunciada descendiente de 1.5 km hasta los 3415 m.s.n.m. donde mantiene el terreno plano por aproximadamente 4 km hasta 3410 donde finalmente adquiere una pendiente pronunciada descendiente y contante hasta la cota mínima del cauce principal.

Las variaciones en la altitud señalan la presencia de cambios en la topografía del terreno en ciertos puntos específicos. Estas fluctuaciones pueden atribuirse a factores geográficos locales, como colinas, valles o características particulares del entorno geográfico.

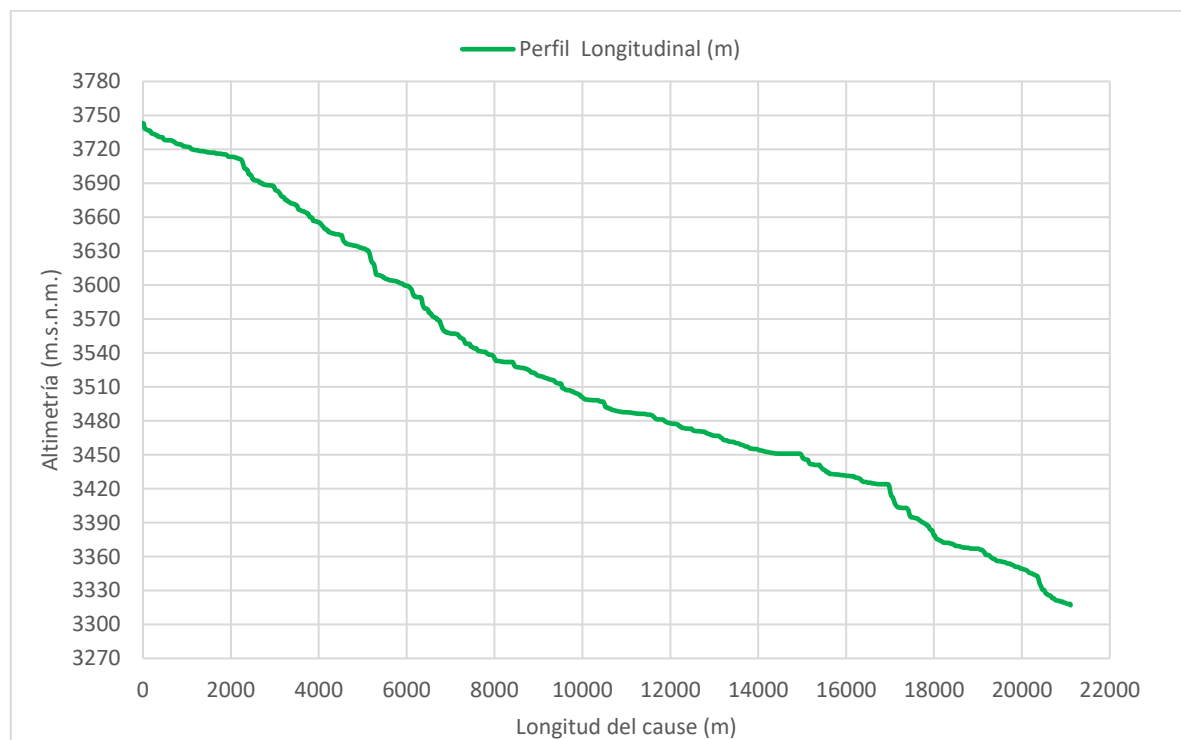


Ilustración 4-5: Perfil longitudinal del río Ozogoche

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis del perfil del río Ozogoche muestra una tendencia a ser un río maduro a viejo, por la representación gráfica de la altimetría versus la longitud del cauce. En cuanto a la variación altimétrica a lo largo de su cauce principal. En casi en todo el trayecto del río este se mantiene en un relieve con tendencia a ser accidentado medianamente accidentado con una pendiente pronunciada descendiente desde los 3743 m.s.n.m. hasta los 3318 indicando un desnivel altitudinal considerable que atraviesa montañas y colinas hasta llegar al valle del río.

Al observar los datos de longitud del cauce principal (m) y altimetría de la microcuenca m.s.n.m., podemos identificar patrones importantes alrededor de los 3700, 3600, 3420 m.s.n.m. donde se marcan tendencias con pendiente más pronunciadas hasta el término del cauce donde se encuentra con el río Atillo.

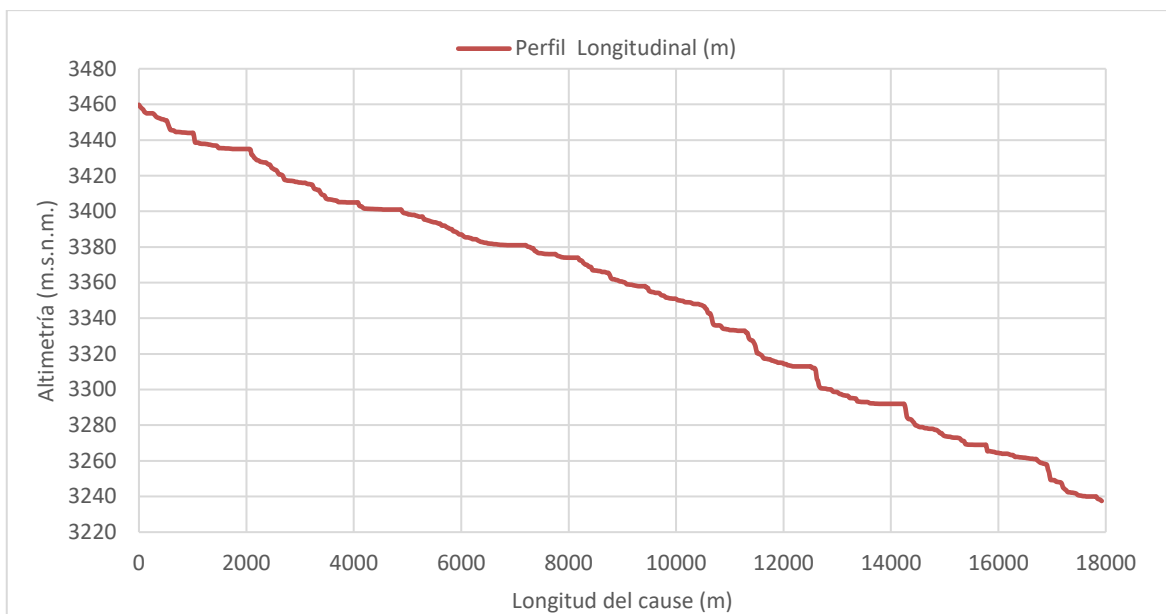


Ilustración 4-6: Perfil longitudinal del río Yasepan

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El perfil longitudinal del río Yasepan comienza a una altitud de 3460 (m.s.n.m.), se observa un descenso gradual a medida que avanza aguas abajo. En general el río presenta secciones con pendientes pronunciadas, siguiendo una tendencia de pendiente decreciente constante, lo que indica una topografía montañosa desde la cabecera de la microcuenca, hasta el término de esta.

Luego, la altimetría se estabiliza ligeramente alrededor de los 3400 m.s.n.m. durante una distancia corta, de 2 km sugiriendo una zona con relieve suave hasta 3350 m.s.n.m. a 4km de donde empezaba a estabilizarse, donde marca una tendencia medianamente accidentada en cuanto a su relieve, hasta el término de su cauce dónde se encuentra con el río Atillo y Ozogoche que antes de este punto ya habían convergido. En entre fragmento del río, se marca un relieve escalonado en forma de terrazas lo que puede reflejar la influencia de factores geológicos y geográficos locales.

4.2.1.5 Comparación de los parámetros la red de drenaje de las unidades hidrográficas

La comparación detallada de los parámetros de la red de drenaje en las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan como se muestra en la tabla 25, destaca divergencias significativas en la longitud de los cauces principales, la longitud de la red hídrica y la pendiente media del cauce principal.

Atillo presenta un cauce principal de longitud moderada, abarcando 16,05 km, con una red hídrica de 11,64 km y una pendiente suave del 5,50%. Esta configuración sugiere una dinámica hidrológica que, aunque podría favorecer una menor erosión debido a su pendiente más suave, podría también limitar la velocidad del flujo de agua. En contraste, Ozogoche exhibe un cauce principal más extenso, alcanzando 21,11 km, con una longitud de red hídrica de 21,04 km y una pendiente moderada del 18,76%.

Estos valores indican una mayor generación de escurrimiento y la posibilidad de una erosión más significativa, dada la pendiente más pronunciada. Yasepan, por su parte, presenta una longitud de cauce principal de 17,92 km, una longitud de red hídrica de 19,61 km y una pendiente más pronunciada del 22,61%. Estos parámetros sugieren una mayor velocidad del flujo de agua, lo que podría aumentar la susceptibilidad a procesos erosivos en esta microcuenca.

En consecuencia, estas variaciones en la red de drenaje son fundamentales para comprender y gestionar adecuadamente el comportamiento hidrológico y la erosión en cada microcuenca. Atillo, con su pendiente suave y cauces más cortos, podría presentar una dinámica hidrológica más controlada. Por otro lado, Ozogoche, con cauces extensos y una pendiente moderada, podría experimentar una mayor carga de sedimentos y erosión. Yasepan, con su pendiente pronunciada, podría ser más susceptible a procesos erosivos debido a la velocidad incrementada del flujo de agua.

4.2.2 Interpretación de la altimetría de los ríos

Tabla 4-9: Parámetros de la altimetría de los cuses principales.

	Siglas	Unidades	Atillo	Ozogoche	Yasepan
Altimetría del río					
Cota máxima	H_{rmax}	m.s.n.m.	3308	3317	3726
Cota mínima	H_{rmin}	m.s.n.m.	3439	3743	3273
Desnivel altitudinal	D_{ar}	m	22	426	453
Altitud media del río	H_{mr}	m.s.n.m.	3411	3524	3500
Elevación mediana del río	E_{mr}	m.s.n.m.	3417	3503	3386

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

4.2.2.1 Resultado de la cota mínima (H_{min}) y cota máxima (H_{max})

Los resultados revelan diferencias notables en las altitudes extremas de los ríos en las tres microcuencas. En Atillo, la cota máxima es de 3308 m.s.n.m., mientras que en Ozogoche, se eleva

a 3317 m.s.n.m., y en Yasepan, alcanza los 3726 m.s.n.m. Esto sugiere que los ríos en Yasepan fluyen a altitudes significativamente más elevadas que los de Atillo. Por otro lado, la cota mínima también muestra variaciones, siendo más alta en Ozogoche (3743 m.s.n.m.) que en Atillo (3439 m.s.n.m.) y Yasepan (3273 m.s.n.m.). Estas diferencias en las cotas máximas y mínimas pueden influir en la dinámica de los ríos y la erosión del suelo en cada microcuenca.

4.2.2.2 Interpretación del cálculo del desnivel altitudinal (Dar)

El desnivel altitudinal (Dar) es un parámetro relevante para comprender la topografía de las microcuencas. Atillo presenta un desnivel moderado de 22 m, lo que sugiere una topografía relativamente plana en comparación con las otras dos microcuencas. Ozogoche muestra un desnivel altitudinal sustancial de 426 m, indicando una topografía más accidentada y empinada. Yasepan presenta un desnivel de 453 m, similar al de Ozogoche. Estas diferencias en el desnivel altitudinal pueden influir en la velocidad del flujo de agua, la erosión del suelo y la susceptibilidad a inundaciones en estas áreas.

4.2.2.3 Resultado de la aproximación de la altitud media de los ríos (Hmr)

La altitud media del río (Hmr) refleja la altitud promedio a la que fluyen los ríos en cada microcuenca. Atillo tiene una altitud media del río de 3411 m.s.n.m., mientras que Ozogoche y Yasepan tienen valores más altos, con 3524 m.s.n.m. y 3500 m.s.n.m., respectivamente. Esto sugiere que, en promedio, los ríos en Ozogoche y Yasepan fluyen a altitudes más elevadas que en Atillo. Estas diferencias pueden influir en la velocidad del flujo y la erosión, ya que ríos a mayor altitud pueden tener un mayor potencial erosivo.

4.2.2.4 Cálculo de la altitud mediana de los ríos (Hmr)

La altitud mediana del río (Hmr) es otro indicador relevante para comprender la elevación de los cursos de agua en las microcuencas. Atillo tiene una altitud mediana de 3417 m.s.n.m., Ozogoche de 3503 m.s.n.m. y Yasepan de 3386 m.s.n.m. Estos valores refuerzan la tendencia de que los ríos en estas microcuencas fluyen a altitudes elevadas. La altitud mediana del río es un factor importante para la dinámica fluvial y la erosión en estas áreas montañosas.

4.2.2.5 Comparación de los parámetros de altimetría de los ríos

Atillo presenta ríos con cotas máximas y mínimas más cercanas en altitud, lo que sugiere una topografía relativamente plana y un desnivel altitudinal modesto de 22 m. En contraste, Ozogoche y Yasepan exhiben ríos que fluyen a altitudes más elevadas, con desniveles altitudinales considerables de 426 y 453 m, respectivamente. Esta diferencia en altitudes extremas y desnivel altitudinal implica que los ríos en Ozogoche y Yasepan tienen un mayor potencial erosivo debido a pendientes más pronunciadas y una mayor velocidad de flujo.

Además, la altitud media y mediana de los ríos en Ozogoche y Yasepan también son más elevadas en comparación con Atillo, lo que sugiere que estos ríos fluyen en promedio a altitudes superiores. Estas diferencias altimétricas tienen un impacto significativo en la erosión y la dinámica hidrológica de estas microcuencas, ya que los ríos a mayor altitud pueden transportar más sedimentos y presentar un mayor riesgo de erosión en áreas montañosas.

4.2.3 Cuantificación de la hidráulica de la red fluvial

Tabla 4-10: Parámetros de la hidráulica de la red fluvial.

	Siglas	Unidades	Atillo	Ozogoche	Yasepan
Hidráulica de la red fluvial					
Orden de la red de la red hídrica	Nc	-	Primer orden	Primer orden	Segundo orden
Numero de tributarios	Nc	-	3	7	6
Densidad de drenaje	Dd	km/km²	0,11	0,11	0,13
Tiempo de concentración	Tc	h	1,79	1,74	1,49
Sinuosidad de las corrientes	Sc	-	1,56	1,33	1,42

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

4.2.3.1 Resultado de la cuantificación del número de cauces o tributarios (Nc)

Los resultados de la cuantificación del número de cauces o tributarios (Nc) para las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan indican que Atillo y Ozogoche tienen un orden de red de primer orden, lo que significa que sus sistemas de drenaje constan principalmente de un único cauce principal sin tributarios de segundo orden. En cambio, Yasepan tiene un orden de red de segundo orden, lo que sugiere la presencia de tributarios de primer orden que contribuyen a su red de drenaje. Esta diferencia en el orden de red puede influir en la capacidad de transporte de sedimentos y la erosión en cada microcuenca.

4.2.3.2 Cuantificación de la densidad de drenaje (Dd)

La cuantificación de la densidad de drenaje (D_d) en las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan, revela valores bajos en todas ellas, con $0,11 \text{ km/km}^2$ para Atillo y Ozogoche, y ligeramente superior en Yasepan con $0,13 \text{ km/km}^2$. Estos resultados posicionan a las microcuencas en la categoría de "Baja" según la Tabla 10 de valores interpretativos de densidad de drenaje.

La interpretación ambiental de esta baja densidad sugiere que las microcuencas tienen un sistema de drenaje moderadamente desarrollado. Este escenario podría ser el resultado de un equilibrio entre la permeabilidad del suelo, la cantidad de precipitación y la topografía, factores que influyen en la formación y extensión de la red de drenaje. En este contexto, una baja densidad de drenaje indica un potencial de erosión más bajo debido a la presencia de una cantidad moderada de canales de drenaje.

4.2.3.3 Estimación del tiempo de concentración (T_c)

La estimación del tiempo de concentración (T_c) en las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan revela que todas comparten la característica de tener tiempos de concentración lentos. Los valores específicos son de $1,79 \text{ h}$ para Atillo, $1,74 \text{ h}$ para Ozogoche y $1,49 \text{ h}$ para Yasepan, situándose en la categoría "Lento" según la Tabla 11 de clases de tiempo de concentración.

La categorización de tiempos de concentración lentos sugiere que el agua se desplaza de manera gradual a lo largo de las cuencas, indicando posiblemente la presencia de pendientes suaves, suelos con baja capacidad de infiltración o una combinación de ambos factores. Este comportamiento del flujo de agua puede tener implicaciones significativas en la retención de agua en la cuenca y en los procesos erosivos asociados.

Estos hallazgos se alinean con otros resultados previamente analizados, como las pendientes suaves y moderadas, las longitudes de cauces principales y la baja densidad de drenaje. En conjunto, estos factores sugieren un sistema hidrológico que tiende a retener agua durante periodos más prolongados, limitando la velocidad del escurrimiento y, por ende, influyendo en la dinámica de erosión.

4.2.3.4 Evaluación de la sinuosidad de las corrientes (Sc)

La evaluación de la sinuosidad de las corrientes (Sc) en las microcuencas revela patrones distintivos en la morfología de los ríos. Según la Tabla 12 que clasifica la sinuosidad en una

cuenca hidrográfica, se observa que el río en Atillo exhibe una sinuosidad regular, característica de cursos de agua que mantienen un patrón de flujo relativamente constante. Este comportamiento sugiere una dinámica fluvial más estable en comparación con otras regiones.

En contraste, tanto Ozogoché como Yasepan presentan una sinuosidad transicional, indicando que sus ríos pueden encontrarse en áreas montañosas con topografías variadas. Este fenómeno implica que los cursos de agua en estas microcuencas experimentan cambios direccionales significativos. Es importante destacar que esta sinuosidad transicional puede atribuirse a la topografía cambiante, especialmente en las laderas de las montañas que se suavizan hacia los valles.

La sinuosidad transicional puede tener implicaciones directas en la dinámica fluvial y los procesos de erosión en estas microcuencas. Los cambios direccionales significativos en el curso de agua pueden afectar la velocidad del flujo y, por ende, la erosión del suelo.

4.2.3.5 Comparación de los parámetros de la hidráulica de la red fluvial

La comparación de los parámetros de la hidráulica de la red fluvial entre las microcuencas de Atillo, Ozogoché y Yasepan revela diferencias significativas en varios aspectos. Atillo y Ozogoché comparten un orden de red de primer orden, indicando una estructura de drenaje más simple con un solo cauce principal. Ambas microcuencas también exhiben una densidad de drenaje (D_d) baja, con valores idénticos de $0,11 \text{ km/km}^2$, sugiriendo un sistema de drenaje moderadamente desarrollado.

No obstante, divergen en la sinuosidad de las corrientes (S_c), donde Atillo muestra una sinuosidad regular, indicativa de un patrón de flujo más constante, mientras que Ozogoché presenta una sinuosidad transicional, señalando cambios direccionales más pronunciados debido a su topografía. Por su parte, Yasepan se distingue al tener un orden de red de segundo orden, indicando la presencia de tributarios de primer orden en su red de drenaje. Aunque comparte una sinuosidad transicional con Ozogoché, presenta una D_d ligeramente más alta de $0,13 \text{ km/km}^2$.

Estos hallazgos sugieren que Yasepan puede experimentar cambios más significativos en el flujo de agua debido a la presencia de tributarios de primer orden y la topografía montañosa. En cuanto al tiempo de concentración, las tres microcuencas compartieron la característica de tener tiempos de concentración lentos, indicando que el agua se desplazaba de manera gradual a lo largo de sus

cuenca. Esta lentitud en el tiempo de concentración puede atribuirse a pendientes suaves, suelos con baja capacidad de infiltración o una combinación de ambos factores en las tres microcuencas.

4.3 Evaluación integral de las características geomorfológicas y hidromorfológicas de las microcuencas

La comparación detallada de los parámetros geomorfológicos y hidromorfológicos entre las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan proporciona una visión integral de sus características distintivas. En términos de los parámetros físicos, Ozogoche destaca por su área extensa, perímetro largo y longitud axial de cuenca, sugiriendo una mayor extensión territorial y una configuración alargada en su sistema de drenaje. En contraste, Atillo presenta una cuenca más compacta, mientras que Yasepan se sitúa en un punto intermedio. La variabilidad en el ancho de la cuenca es notable, con Ozogoche exhibiendo el ancho más amplio.

En cuanto a los parámetros de forma, Atillo se distingue por su forma más compacta y topografía menos accidentada, lo que puede influir en un drenaje más lento y una menor susceptibilidad a inundaciones y erosión. Por otro lado, tanto Ozogoche como Yasepan muestran formas más alargadas y topografías montañosas, indicando una posible propensión a un drenaje rápido y a la erosión del suelo.

La altimetría revela diferencias notables en las cotas máximas y mínimas, así como en el desnivel altitudinal. Atillo presenta la altitud media más alta, lo que puede influir en patrones de precipitación y escurrimiento de agua diferentes. Ozogoche, con su mayor desnivel altitudinal, puede experimentar una mayor generación de escurrimiento y erosión, mientras que Yasepan se encuentra en un punto intermedio. En cuanto a los parámetros de relieve, Atillo exhibe la pendiente más pronunciada y un relieve accidentado, sugiriendo un mayor potencial erosivo. Ozogoche, aunque también accidentado, muestra una pendiente moderada, y Yasepan exhibe la pendiente más baja y un relieve medianamente accidentado, indicando una menor susceptibilidad a procesos erosivos intensos.

La evaluación de la red de drenaje destaca divergencias en la longitud de los cauces principales, la longitud de la red hídrica y la pendiente media del cauce principal. Atillo presenta una dinámica hidrológica más controlada, Ozogoche indica una mayor generación de escurrimiento y Yasepan sugiere una mayor velocidad del flujo de agua. La altimetría de los ríos revela diferencias en altitudes extremas y desnivel altitudinal, con implicaciones en la erosión y la dinámica hidrológica. Atillo presenta ríos con altitudes más cercanas y un desnivel altitudinal modesto,

mientras que Ozogoche y Yasepan muestran ríos a mayores altitudes y con desniveles altitudinales considerables.

En una evaluación integral, se destaca que las microcuencas presentan variaciones significativas en términos de forma, altimetría, relieve y red de drenaje. Estas diferencias sugieren respuestas hidrológicas y erosivas distintivas en cada área. Atillo, con su cuenca compacta y relieve pronunciado, puede experimentar una dinámica hidrológica más controlada, mientras que Ozogoche y Yasepan, con formas alargadas y topografías montañosas, podrían estar más sujetos a procesos hidrológicos intensos, incluida una mayor susceptibilidad a inundaciones y erosión del suelo.

4.4 Interpretación del comportamiento bioclimático de la región de estudio

4.4.1 *Análisis de la precipitación media (PM)*

4.4.1.1 *Análisis de la precipitación media en la microcuenca de Atillo*

En el análisis de los datos de precipitación registrados en la serie temporal que abarca desde el año 2002 hasta 2021, se observan variaciones significativas en la cantidad de lluvia mensual a lo largo de estos 20 años. En el mes de enero, se puede notar una amplia variabilidad en la precipitación, con valores que oscilan entre 6 mm en 2002 y 180 mm en 2017. Febrero también muestra una gran variabilidad, con valores que van desde 33 mm en 2021 hasta un máximo de 422 mm en 2008. Marzo presenta picos de precipitación en varios años, destacando los 276 mm en 2008 y 208 mm en 2017. Abril muestra un rango amplio, desde 44 mm en 2005 hasta 525 mm en 2008. Mayo y junio presentan valores bajos en varios años, mientras que julio muestra menos variabilidad en la mayoría de los años. Agosto también tiene valores más bajos, con excepción de 2008, que alcanza 151 mm. Septiembre es variable, con un mínimo de 10 mm en 2009 y un máximo de 123 mm en 2021. Octubre presenta valores dispares, con un máximo de 174 mm en 2019. Noviembre muestra una gran variabilidad, con valores que oscilan entre 26 mm en 2006 y 214 mm en 2011. Finalmente, diciembre tiene valores bajos en la mayoría de los años, con excepción de 2017, que llega a 185 mm. Estos datos indican la variabilidad estacional de la precipitación a lo largo de las dos décadas analizadas.

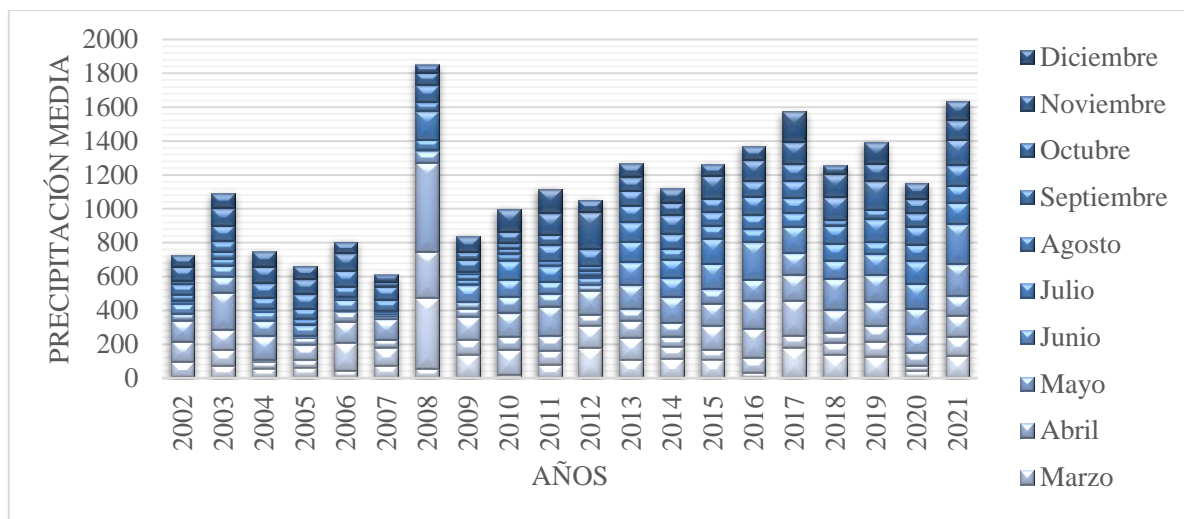


Ilustración 4-7: Histograma de la distribución de precipitación media histórica de la microcuena de Atillo

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En cuanto al histograma, se observa que enero, febrero y marzo muestran un sesgo hacia la derecha, con una concentración de meses con baja precipitación, mientras que unos pocos años registran valores extremadamente altos. Abril, por otro lado, presenta un marcado pico en el rango de precipitación más alto, indicando la presencia de años con lluvias excepcionalmente intensas. Los meses de mayo y junio tienden a tener una distribución más uniforme, aunque con una ligera tendencia hacia valores más bajos. Julio exhibe una distribución relativamente uniforme en la mayoría de los años. Agosto y septiembre presentan concentraciones de años con baja precipitación, con algunos valores más altos en años específicos. Octubre muestra una mayor concentración de años con precipitación moderada, mientras que noviembre refleja una variabilidad significativa, con algunos años con precipitación muy alta. Diciembre, al igual que enero y febrero, muestra un sesgo hacia la derecha con una mayoría de años con baja precipitación. Este análisis del histograma complementa la comprensión de la distribución y variabilidad de la precipitación a lo largo de la serie temporal de 20 años.

Para un análisis más detallado de los valores obtenidos para la precipitación media de la microcuena de Atillo se determinaron los analizaron los siguientes estadísticos:

Tabla 29: Estadísticos de la precipitación media multianual en la microcuenca de Atillo

Años	Mínimo	Máximo	Rango	Precipitación acumulada	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Error Estándar	Cuartil Inferior	Cuartil Superior	Rango Inter-cuartílico
2002	6,4	124,1	117,7	727,6	60,6	60,3	39,0	64,3	11,3	28,7	86,3	57,6
2003	41,1	220,5	179,4	1088,6	90,7	88,0	47,5	52,4	13,7	63,0	99,3	36,3
2004	4,7	138,7	134,0	746,3	62,2	59,4	40,1	64,5	11,6	26,5	90,2	63,6
2005	3,9	88,5	84,6	663,9	55,3	61,3	29,0	52,4	8,4	38,4	83,0	44,6
2006	3,7	164,6	160,9	805,7	67,1	63,5	48,8	72,6	14,1	29,2	98,2	69,0
2007	8,2	124,0	115,8	611,1	50,9	45,7	38,4	75,5	11,1	14,7	77,6	62,8
2008	3,3	524,6	521,4	1850,3	154,2	72,7	165,0	107,0	47,6	54,5	223,0	168,4
2009	11,1	140,0	128,9	839,6	70,0	63,4	41,0	58,6	11,8	36,1	96,7	60,6
2010	18,1	146,4	128,4	999,5	83,3	88,1	45,4	54,5	13,1	35,7	122,1	86,4
2011	26,1	175,2	149,0	1118,0	93,2	84,8	39,1	42,0	11,3	73,7	111,7	38,0
2012	17,5	218,5	200,9	1053,2	87,8	70,0	65,8	75,0	19,0	31,5	136,0	104,5
2013	67,2	141,4	74,2	1265,8	105,5	104,0	24,3	23,0	7,0	85,1	127,2	42,1
2014	59,5	151,4	91,8	1120,7	93,4	85,7	26,3	28,2	7,6	73,8	110,9	37,1
2015	60,3	151,1	90,8	1265,0	105,4	95,3	34,3	32,6	9,9	77,1	138,2	61,1
2016	34,1	220,4	186,4	1369,2	114,1	100,3	51,0	44,7	14,7	82,0	145,0	63,0
2017	73,1	206,4	133,2	1573,9	131,2	129,9	43,3	33,0	12,5	95,1	166,6	71,5
2018	33,7	186,5	152,8	1258,6	104,9	104,7	43,9	41,9	12,7	66,5	136,4	69,9
2019	56,9	166,9	110,0	1393,8	116,1	126,3	34,5	29,7	10,0	89,6	139,0	49,4
2020	30,9	154,7	123,7	1153,5	96,1	97,1	37,9	39,4	10,9	76,1	121,8	45,7
2021	103,0	237,1	134,1	1636,7	136,4	122,3	39,2	28,7	11,3	114,2	141,8	27,6

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Al analizar los estadísticos de la precipitación media en la microcuenca de Atillo durante un período de 20 años, se observa una variabilidad significativa en los datos. Los valores de precipitación acumulada varían desde un mínimo de 611,1 mm en 2007 hasta un máximo de 1850,3 mm en 2008. Esto demuestra la amplitud de la precipitación en la región a lo largo del tiempo. El promedio anual oscila desde 50,9 mm en 2007 hasta 154,2 mm en 2008, lo que indica la presencia de años con sequías excepcionales y otros con una alta pluviosidad. La desviación estándar es también notable, con un valor máximo de 165,0 mm en 2008, lo que sugiere una gran dispersión en los datos a lo largo de los años. El coeficiente de variación varía desde 11,1% en 2007 hasta 75,5% en el mismo año, lo que refleja la variabilidad de la precipitación y la influencia de eventos climáticos extremos en la región. Estos resultados señalan la importancia de comprender la variabilidad climática a largo plazo para la gestión de recursos hídricos y la mitigación de la erosión hídrica en la zona altoandina de páramo.

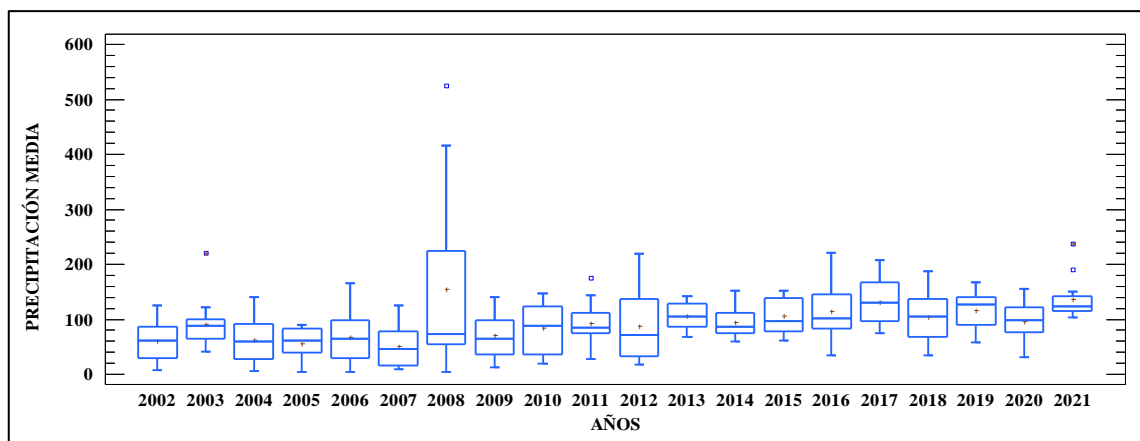


Ilustración 4-8: Diagrama de caja y bigotes de precipitación media histórica de la microcuenca de Atillo

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Los resultados del diagrama de caja y bigotes para la precipitación media de la microcuenca de Atillo muestran una distribución amplia y heterogénea de la precipitación a lo largo de los meses de cada año. Los valores mínimos mensuales varían desde alrededor de 2,3 mm hasta 77,0 mm, lo que indica una amplia gama de condiciones de baja precipitación en diferentes momentos del año. Los máximos mensuales también varían considerablemente, desde aproximadamente 10,0 mm hasta 177,0 mm, lo que resalta la variabilidad en las condiciones de alta precipitación. La mediana mensual se encuentra en un rango que va desde 43,3 mm hasta 109,6 mm, mostrando cómo la mitad de los datos supera estos valores. Los cuartiles refuerzan la variabilidad con un rango intercuartílico que va desde 33,0 mm hasta 99,3 mm. La presencia de valores atípicos en los años 2003, 2008, 2011 y 2021 indica la influencia de eventos climáticos extremos en la precipitación.

4.4.1.2 Análisis de la precipitación media en la microcuenca de Ozogoche

En el análisis de los datos de precipitación registrados en la microcuenca de Ozogoche durante el período de 2002 a 2021, se observan variaciones notables en la cantidad de lluvia mensual a lo largo de estos 20 años. Durante los meses de enero y febrero, se puede apreciar una gran variabilidad en la precipitación, con valores que oscilan entre 6 mm en 2002 y 422 mm en febrero de 2008. Marzo presenta picos de precipitación en varios años, destacando los 276 mm en marzo de 2008 y 208 mm en marzo de 2017. Abril muestra un rango amplio, desde 44 mm en 2005 hasta 525 mm en abril de 2008. Mayo y junio presentan valores bajos en varios años, mientras que julio muestra menos variabilidad en la mayoría de los años. Agosto también tiene valores más bajos, con excepción de 2008, que alcanza 151 mm. Septiembre es variable, con un mínimo de 10 mm en septiembre de 2009 y un máximo de 123 mm en septiembre de 2021. Octubre presenta valores dispares, con un máximo de 174 mm en octubre de 2019. Noviembre muestra una gran variabilidad, con valores que oscilan entre 26 mm en noviembre de 2006 y 214 mm en noviembre de 2011. Finalmente, diciembre tiene valores bajos en la mayoría de los años, con excepción de diciembre de 2017, que llega a 185 mm. Estos datos indican la variabilidad estacional de la precipitación en la microcuenca de Ozogoche.

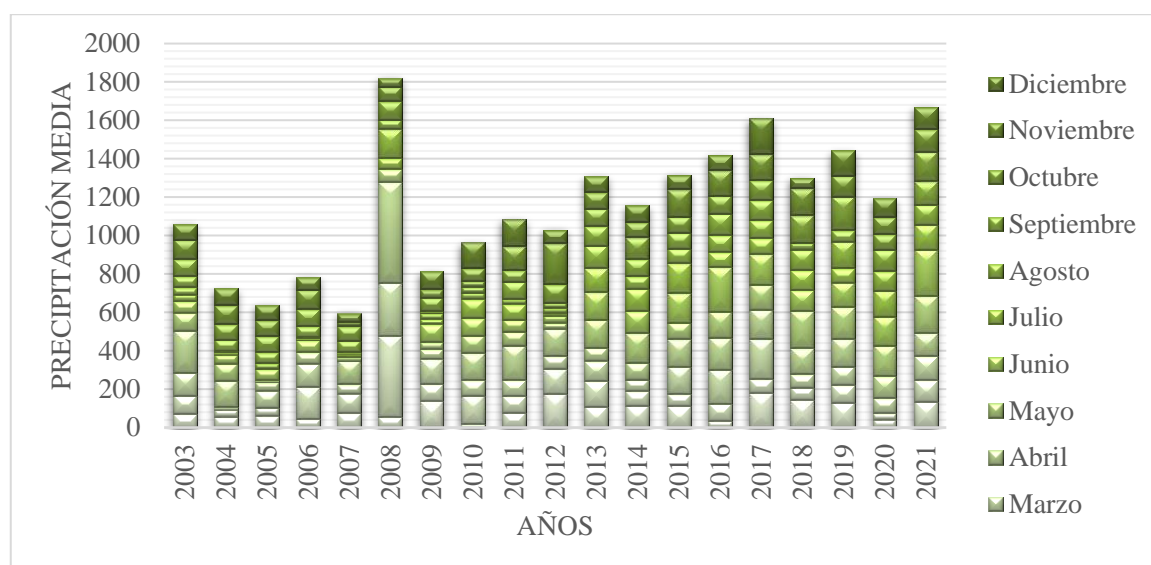


Ilustración 4-9: Histograma de la distribución de precipitación media histórica de la microcuenca de Ozogoche

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En lo que respecta al histograma que ilustra la distribución de la precipitación en los diferentes meses a lo largo de los años en la microcuenca de Ozogoche, se pueden identificar patrones específicos. Enero, febrero y marzo presentan un sesgo hacia la derecha, donde la mayoría de los

años registran valores bajos, pero en algunos casos excepcionales se observan altas precipitaciones. Abril muestra un pico en el rango de precipitación más alto, indicando años con lluvias excepcionalmente intensas. Mayo y junio presentan una distribución más uniforme, con una tendencia a valores más bajos. Julio exhibe una distribución relativamente uniforme en la mayoría de los años. Agosto y septiembre reflejan una concentración de años con baja precipitación, pero también algunos años con valores más altos. Octubre muestra una mayor concentración de años con precipitación moderada. Noviembre demuestra una variabilidad significativa, con algunos años con precipitación muy alta. Diciembre, al igual que enero y febrero, muestra un sesgo hacia la derecha con una mayoría de años con baja precipitación. Este análisis del histograma complementa la comprensión de la distribución y variabilidad de la precipitación a lo largo de la serie temporal de 20 años en la microcuenca de Ozogoche.

Tabla 4-11: Estadísticos de la precipitación media en la microcuenca de Ozogoché

Años	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación (%)	Error Estándar	Precipitación acumulada	Cuartil Inferior	Cuartil Superior	Rango Inter-cuartílico
2002	6,1	123,4	117,3	58,9	55,5	39,6	67,3	11,4	706,3	26,1	85,7	59,7
2003	36,3	220,2	183,9	88,4	86,0	48,8	55,3	14,1	1060,4	58,0	97,8	39,8
2004	4,3	137,8	133,5	60,3	57,1	40,0	66,4	11,5	723,1	25,6	88,0	62,4
2005	3,6	88,3	84,8	53,2	56,7	28,4	53,5	8,2	638,1	36,1	80,4	44,2
2006	3,6	167,1	163,5	65,3	59,0	49,2	75,2	14,2	784,2	27,7	95,2	67,5
2007	7,3	123,4	116,2	49,6	44,3	38,6	77,8	11,1	594,8	13,8	75,1	61,4
2008	3,0	525,2	522,2	151,9	71,3	166,9	109,9	48,2	1822,3	51,2	213,3	162,1
2009	10,3	138,8	128,6	67,7	61,9	41,1	60,7	11,9	812,6	33,2	91,5	58,2
2010	17,4	149,4	132,0	80,3	85,9	45,4	56,6	13,1	963,3	32,7	115,0	82,3
2011	23,2	179,0	155,8	90,3	83,2	40,6	44,9	11,7	1083,7	68,5	107,5	38,9
2012	15,4	214,2	198,8	85,8	68,1	66,0	76,9	19,1	1029,7	29,8	136,7	106,9
2013	69,0	146,9	77,9	108,9	106,7	24,9	22,9	7,2	1306,7	88,4	129,7	41,4
2014	59,9	154,0	94,1	96,4	89,0	26,8	27,8	7,7	1157,1	77,4	114,2	36,9
2015	62,0	156,3	94,4	109,6	99,2	35,6	32,5	10,3	1314,7	80,2	142,5	62,3
2016	34,7	229,7	195,0	118,3	104,1	53,3	45,1	15,4	1419,3	82,8	151,1	68,4
2017	72,5	207,8	135,3	134,1	133,1	43,9	32,7	12,7	1608,8	98,2	169,9	71,6
2018	35,0	193,2	158,2	108,3	108,6	45,9	42,3	13,2	1299,8	66,8	141,1	74,3
2019	59,0	174,1	115,1	120,2	129,8	35,6	29,7	10,3	1442,4	93,4	143,2	49,8
2020	32,6	160,6	127,9	99,4	99,6	38,8	39,1	11,2	1192,8	78,9	125,3	46,4
2021	105,3	242,0	136,7	139,2	124,3	40,2	28,9	11,6	1670,4	117,4	143,1	25,7

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Al evaluar los estadísticos descriptivos de la precipitación media en la microcuenca de Ozogoche durante un período de 20 años, se observa una variabilidad significativa en los datos. La precipitación acumulada oscila desde un mínimo de 594,8 mm en 2007 hasta un máximo de 1822,3 mm en 2008, destacando la amplitud de las precipitaciones en la región a lo largo del tiempo. El promedio anual varía desde 49,6 mm en 2007 hasta 139,2 mm en 2021, lo que indica la existencia de años con condiciones de sequía excepcionales y otros con una alta pluviosidad. La desviación estándar muestra una dispersión considerable, con un valor máximo de 166,9 mm en 2008, reflejando la variabilidad de los datos a lo largo de los años. El coeficiente de variación varía desde un 28,9% en 2021 hasta un 77,8% en 2008, lo que sugiere la influencia de eventos climáticos extremos en la región. Estos resultados subrayan la importancia de comprender la variabilidad climática en la gestión de recursos hídricos y la conservación de ecosistemas en la zona altoandina de páramo.

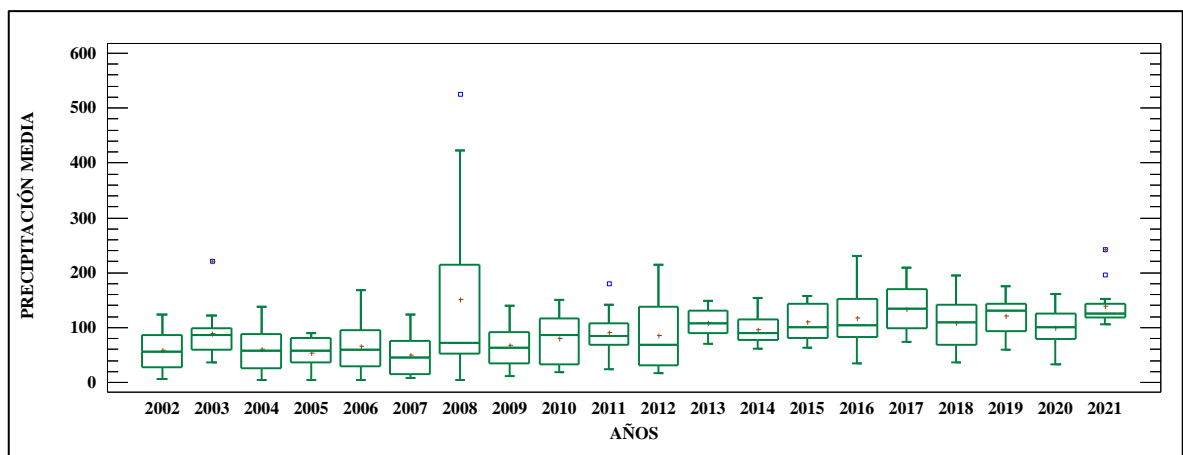


Ilustración 4-10: Diagrama de caja y bigotes de precipitación media histórica de la microcuenca de Ozogoche

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Al observar el diagrama de caja y bigotes para la precipitación media en la microcuenca de Ozogoche, se revela una distribución heterogénea y variabilidad estacional de las precipitaciones a lo largo de los meses de cada año. Los valores mínimos mensuales varían desde alrededor de 3,6 mm hasta 72,5 mm, lo que demuestra una amplia gama de condiciones de baja precipitación en diferentes momentos del año. Los máximos mensuales también exhiben variabilidad significativa, con valores que oscilan entre 88,3 mm y 242,0 mm, destacando la influencia de eventos climáticos extremos en la región. Las medianas mensuales varían desde 44,9 mm hasta 107,5 mm, indicando cómo la mitad de los datos supera estos valores en diferentes momentos. Los cuartiles refuerzan la variabilidad con un rango intercuartílico que va desde 25,7 mm hasta

106,9 mm. La presencia de valores atípicos en algunos meses y años subraya la influencia de eventos climáticos extremos en la precipitación.

4.4.1.3 Análisis de la precipitación media en la microcuenca de Yasepan

En el análisis de los datos de precipitación media registrada en la microcuenca de Yasepan durante el período que abarca desde 2002 hasta 2021, se aprecia una variabilidad significativa en la cantidad de lluvia a lo largo de los distintos meses y años. El mes de enero presenta fluctuaciones en la precipitación, con valores que oscilan entre 6 mm en 2002 y 192 mm en 2017. En febrero, se observa una variabilidad similar, con registros que van desde 28 mm en 2020 hasta 387 mm en 2008. Marzo exhibe un rango de precipitación amplio, con máximos de 205 mm en 2017 y mínimos de 14 mm en varios años. Abril presenta un rango amplio, con valores que oscilan entre 45 mm en 2005 y 504 mm en 2008.

El mes de mayo refleja un rango de precipitación más bajo en la mayoría de los años, con un mínimo de 2 mm en 2005 y un máximo de 185 mm en 2018. Junio muestra una variabilidad significativa, con registros que van desde 3 mm en 2005 hasta 244 mm en 2021. Julio presenta una distribución más uniforme en la mayoría de los años, aunque con un mínimo de 3 mm en 2005. Agosto tiende a tener valores más bajos en la mayoría de los años, salvo en 2008, cuando alcanza 187 mm. Septiembre exhibe una variabilidad considerable, con un mínimo de 11 mm en 2009 y un máximo de 124 mm en 2021. Octubre muestra valores diversos, con un máximo de 158 mm en 2019. Noviembre presenta una variabilidad notable, con valores que oscilan entre 27 mm en 2005 y 213 mm en 2011. Finalmente, diciembre refleja valores más bajos en la mayoría de los años, con una excepción de 173 mm en 2017. Estos datos ponen de manifiesto la variabilidad de la precipitación a lo largo de los 20 años en la microcuenca de Yasepan.

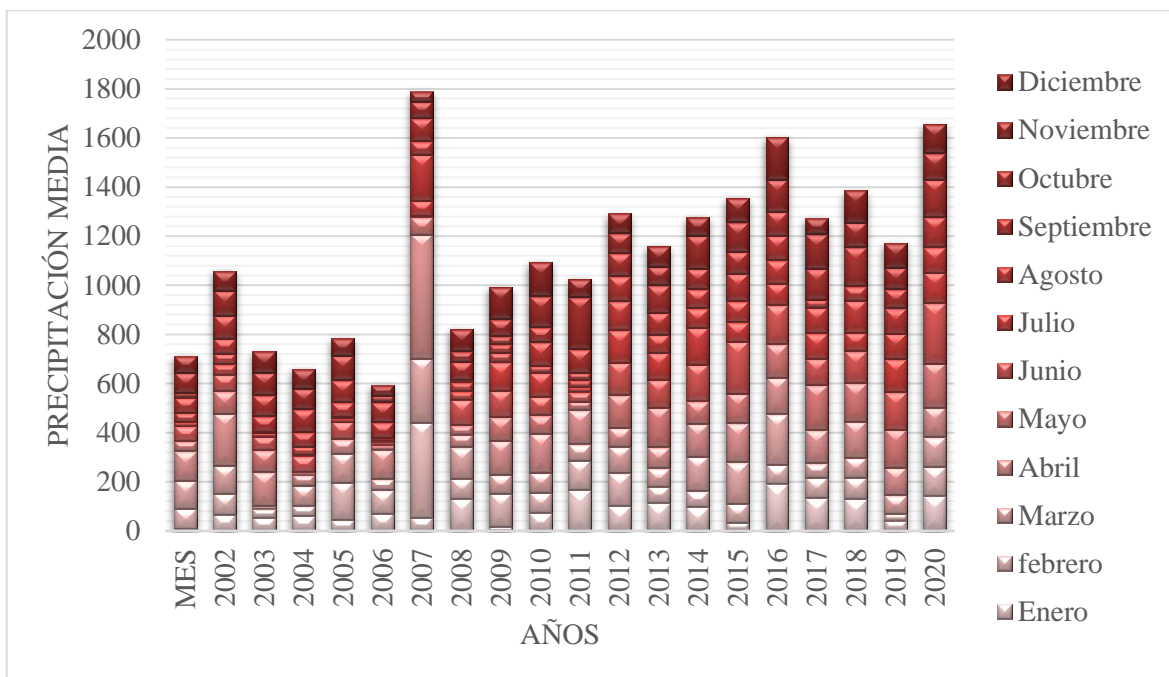


Ilustración 4-11: Histograma de la distribución de precipitación media histórica de la microcuenca de Ozogоче

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En cuanto al histograma que representa la distribución de la precipitación a lo largo de los diferentes meses durante estos años, se destaca que enero, febrero y marzo muestran una asimetría hacia la derecha, con una concentración de meses con baja precipitación y algunos años con valores muy altos. Abril exhibe un pico distintivo en el rango de precipitación más alto, indicando años con lluvias excepcionalmente intensas. Mayo y junio tienden a tener una distribución más uniforme, aunque con una ligera inclinación hacia valores más bajos. Julio muestra una distribución relativamente uniforme en la mayoría de los años. Agosto y septiembre presentan una concentración de años con baja precipitación, junto con algunos valores más altos en años específicos. Octubre muestra una mayor concentración de años con precipitación moderada, mientras que noviembre refleja una variabilidad significativa, con algunos años con precipitación muy alta. Diciembre, similar a enero y febrero, muestra una asimetría hacia la derecha, con una mayoría de años con baja precipitación. Este análisis del histograma complementa la comprensión de la distribución y variabilidad de la precipitación en la microcuenca de Yasepan a lo largo de las dos décadas.

Tabla 4-12: Estadísticos de la precipitación media en la microcuenca de Yasepan

Años	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Error Estándar	Precipitación acumulada	Cuartil Inferior	Cuartil Superior	Rango Intercuartílico
2002	6,0	120,2	114,2	59,4	61,5	37,0	0,6	10,7	727,6	29,0	82,9	54,0
2003	42,3	212,3	170,0	88,1	83,0	44,8	0,5	12,9	1088,6	63,8	97,2	33,4
2004	4,3	135,2	130,9	60,9	59,8	39,0	0,6	11,3	746,3	25,8	87,4	61,5
2005	3,4	91,9	88,5	54,9	60,2	28,7	0,5	8,3	663,9	38,4	80,9	42,5
2006	2,3	153,7	151,3	65,3	64,6	46,2	0,7	13,3	805,7	28,6	95,6	67,0
2007	8,6	120,0	111,4	49,4	44,2	36,6	0,7	10,6	611,1	14,8	75,5	60,8
2008	3,0	504,3	501,3	149,0	70,3	156,8	1,1	45,3	1850,3	54,2	223,6	169,5
2009	11,2	131,5	120,2	68,5	62,7	38,7	0,6	11,2	839,6	37,7	96,0	58,3
2010	17,0	138,5	121,4	82,7	86,7	43,9	0,5	12,7	999,5	36,9	123,1	86,2
2011	27,7	158,6	130,9	91,2	82,1	35,6	0,4	10,3	1118,0	73,9	111,2	37,3
2012	18,6	212,7	194,1	85,5	69,9	62,2	0,7	18,0	1053,2	32,3	129,4	97,1
2013	76,7	134,3	57,5	107,6	105,2	22,1	0,2	6,4	1265,8	87,9	131,8	43,9
2014	68,4	159,6	91,2	96,7	87,4	26,0	0,3	7,5	1120,7	75,9	111,8	35,8
2015	64,9	149,5	84,6	106,5	94,7	32,4	0,3	9,4	1265,0	78,5	138,1	59,5
2016	34,0	211,8	177,8	112,9	104,6	47,9	0,4	13,8	1369,2	82,5	139,7	57,2
2017	77,0	205,1	128,1	133,7	134,3	43,0	0,3	12,4	1573,9	96,4	166,0	69,7
2018	33,3	185,4	152,1	106,0	105,4	42,2	0,4	12,2	1258,6	72,7	133,8	61,1
2019	58,3	157,5	99,3	115,4	129,4	33,6	0,3	9,7	1393,8	84,7	140,1	55,4
2020	27,6	153,8	126,2	97,6	101,4	39,2	0,4	11,3	1153,5	76,6	123,4	46,8
2021	103,6	244,3	140,7	137,9	123,4	39,5	0,3	11,4	1636,7	118,0	146,1	28,1

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Los resultados estadísticos de la precipitación media en la microcuenca de Yasepan reflejan una variabilidad significativa en los datos recopilados durante los veinte años de estudio. Los resultados estadísticos de la precipitación media en la microcuenca de Yasepan ofrecen una visión detallada de las condiciones climáticas en esta zona altoandina. En el primer conjunto de estadísticas, se observa una precipitación acumulada promedio de 1085,6 mm anuales, con un promedio anual de 90,5 mm. La desviación estándar de 42,6 mm indica una dispersión moderada en los valores de precipitación, respaldada por un coeficiente de variación del 47,0%. El error estándar de 12,7 mm señala la precisión de las mediciones. Se destacan los años 2008 y 2017 con los valores más altos de precipitación acumulada, 1850,3 mm y 1573,9 mm respectivamente, y los años 2007 y 2020 con los valores más bajos, 611,1 mm y 1153,5 mm. La mediana de 94,5 mm refleja una distribución de datos relativamente simétrica. Esta información es valiosa para comprender la variabilidad climática en la microcuenca de Yasepan.

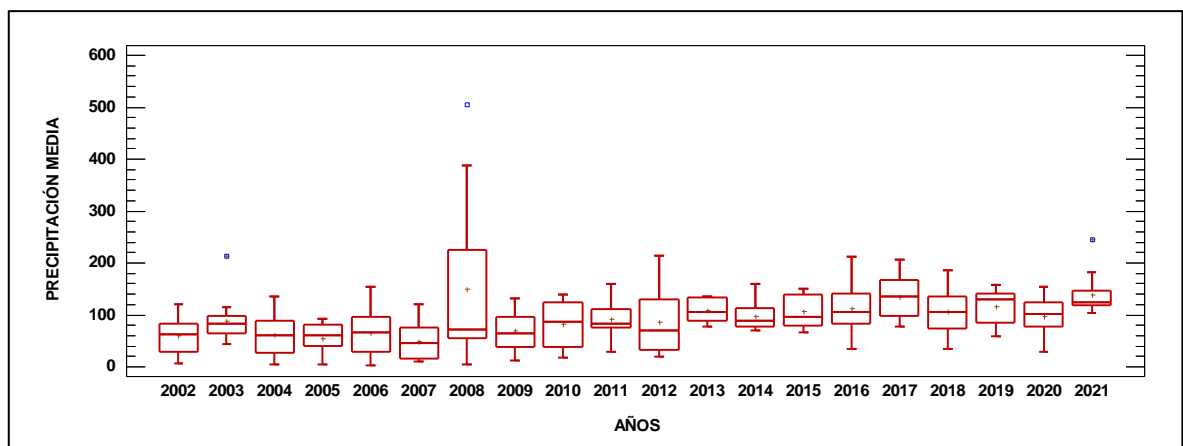


Ilustración 4-12: Diagrama de caja y bigotes de precipitación media histórica de la microcuenca de Yasepan

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Los años 2008 y 2017 sobresalen con máximos extremos de 1850,3 mm y 1573,9 mm, respectivamente, mientras que 2004 y 2005 presentan los valores mínimos más bajos con 746,3 mm y 663,9 mm. Estos valores extremos contribuyen a la alta desviación estándar de 156,8 mm en 2008. Los cuartiles inferior y superior, con un rango intercuartílico de 169,5 mm, subrayan la variabilidad en la distribución de la precipitación. La presencia de valores atípicos, destacados por puntos fuera del rango intercuartílico en un diagrama de caja y bigotes, resalta la variabilidad en los datos. Los años 2008, 2009, 2010 y 2012 se destacan por tener valores atípicos en la precipitación. Esto demuestra que la microcuenca de Yasepan es sensible a eventos climáticos extremos y subraya la necesidad de una gestión cuidadosa de los recursos hídricos en esta zona de páramo.

4.4.1.4 Análisis global de la precipitación media en las unidades hidrológicas

El análisis comparativo de las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan revela tendencias notables en la distribución de la precipitación a lo largo de los 20 años analizados. Atillo exhibe una amplia variabilidad estacional, con un rango de precipitación significativo en varios meses, con notables valores máximos en 2008 y mínimos en 2007. Ozogoche, por su parte, muestra un patrón similar con variabilidad en meses como enero, febrero y marzo, y destacando 2008 como un año de alta precipitación. Yasepan también presenta variabilidad estacional, con años sobresalientes como 2008 y 2017, caracterizados por altos valores de precipitación.

En términos generales, se observa que Atillo y Ozogoche comparten una tendencia hacia valores extremos en febrero y marzo, mientras que Yasepan muestra una distribución más uniforme en esos meses. Atillo destaca por tener valores de precipitación acumulada más bajos en comparación con Ozogoche y Yasepan, lo que indica una menor tendencia a la erosión hídrica debido a una menor cantidad de agua disponible. Ozogoche, con valores promedio más altos, es más propenso a eventos de erosión en ciertos períodos del año, mientras que Yasepan presenta variabilidad en la precipitación, lo que puede influir en su susceptibilidad a la erosión hidráulica. La comprensión de estos patrones es crucial para la gestión de recursos hídricos y la mitigación de la erosión en estas microcuencas altoandinas.

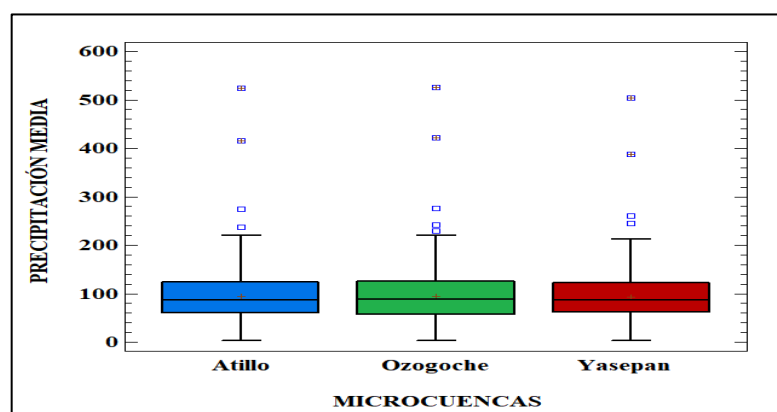


Ilustración 4-13: Diagrama de caja y bigotes de la precipitación media global de las microcuencas

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Los diagramas de caja y bigotes de precipitación media para la microcuenca Atillo, Ozogoche y Yasepan, señalan tendencias similares en cuanto a los valores. En el caso de Atillo, se observa que la mediana se encuentra cerca del valor promedio, con un rango intercuartílico que muestra una variabilidad moderada en la precipitación. Los valores mínimo y máximo sugieren un amplio

espectro de condiciones hidroclimáticas, mientras que la presencia de valores atípicos en los años 2003, 2008, 2011 y 2021 refleja la influencia de eventos climáticos extremos.

Para Ozogoche, se observa una mediana ligeramente más baja que la media, indicando una posible asimetría hacia valores más bajos. El rango intercuartílico resalta la variabilidad en la precipitación, y la presencia de valores atípicos en 2003, 2008, 2011 y 2021 subraya la influencia de eventos extremos.

En Yasepan, la mediana se encuentra relativamente cerca del promedio, con un rango intercuartílico que sugiere una variabilidad moderada en la precipitación. Los valores mínimo y máximo indican una amplia gama de condiciones climáticas. Los valores atípicos en 2008, 2009, 2010 y 2012 demuestran la susceptibilidad de Yasepan a eventos climáticos extremos. Estos diagramas resaltan la importancia de comprender la variabilidad de la precipitación en estas microcuencas y su relevancia para la gestión de recursos hídricos y la conservación de ecosistemas.

4.4.2 *Análisis de temperatura media (TM)*

4.4.2.1 *Análisis de la temperatura media en la microcuenca de Atillo*

El análisis de las temperaturas medias en la microcuenca de Atillo durante el período de 2002 a 2021 muestra un patrón de variación a lo largo de los meses, durante el mes de enero las temperaturas medias oscilan entre un mínimo de 9,3°C en 2021 y un máximo de 12,7°C en 2016, febrero presenta una variación similar con valores que van desde 10,1°C en 2012 a 13,1°C en 2018, marzo refleja un rango más amplio con un mínimo de 9,4°C en 2021 y un máximo de 13,2°C en 2019, abril muestra temperaturas que oscilan entre 10,3°C en 2006 y 13,8°C en 2017, mayo y junio exhiben una variabilidad más baja con valores máximos en torno a 14,5°C en junio de 2017, julio tiene una variación semejante con un mínimo de 7,8°C en 2017 y un máximo de 12,4°C en 2016, agosto refleja una variabilidad moderada con temperaturas que oscilan entre 8,3°C en 2020 y 11,8°C en 2009, septiembre presenta una variabilidad similar con un mínimo de 8,0°C en 2013 y un máximo de 11,7°C en 2009, octubre exhibe valores entre 8,3°C en 2020 y 12,9°C en 2015, noviembre muestra temperaturas que varían desde 9,2°C en 2013 hasta 13,4°C en 2014, diciembre presenta una variabilidad moderada con temperaturas que oscilan entre 9,3°C en 2019 y 13,2°C en 2016, estos datos revelan una variación estacional en las temperaturas a lo largo de los años en la microcuenca de Atillo.

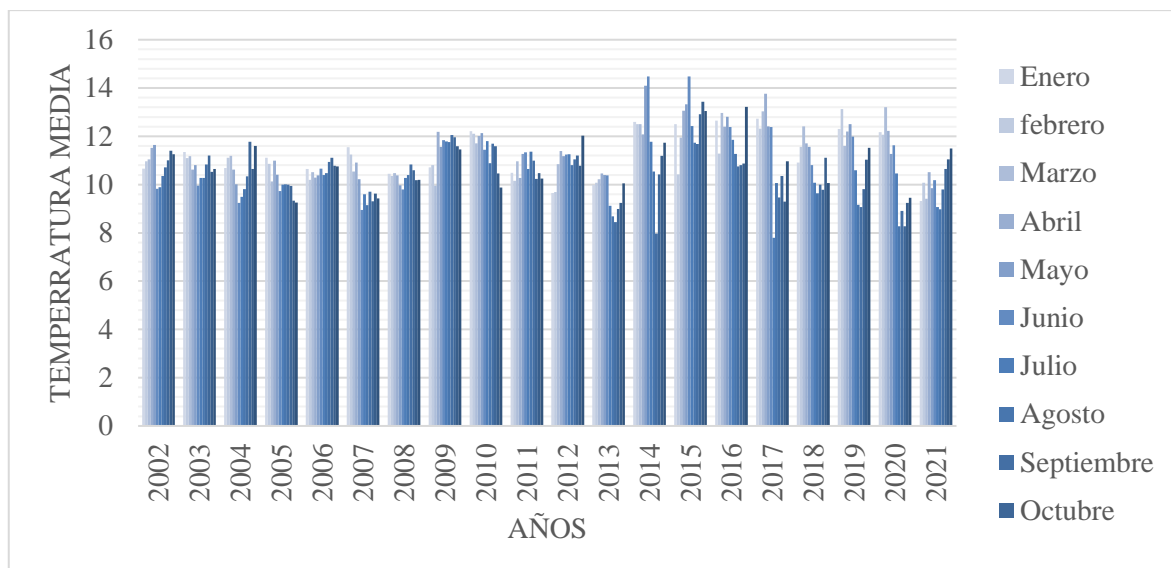


Ilustración 4-14: Histograma de la distribución de temperatura media histórica de la microcuenca de Atillo

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El histograma que ilustra la distribución de las temperaturas medias en los diferentes meses a lo largo de los años en la microcuenca de Atillo muestra patrones característicos. Enero, febrero y marzo reflejan una distribución sesgada hacia la izquierda, donde la mayoría de los años registran temperaturas más altas. Abril exhibe un pico en el rango medio, indicando años con temperaturas significativamente más altas. Mayo y junio presentan una distribución más uniforme, con una tendencia hacia temperaturas más altas. Julio muestra una variabilidad considerable, con algunos años con temperaturas más bajas. Agosto y septiembre reflejan una concentración de años con temperaturas más bajas, pero también algunos años con valores más altos. Octubre muestra una distribución bastante uniforme, con una tendencia hacia temperaturas más altas. Noviembre demuestra una variabilidad significativa, con algunos años con temperaturas muy altas. Diciembre, al igual que enero y febrero, muestra una distribución sesgada hacia la izquierda con una mayoría de años con temperaturas más altas. Este análisis del histograma complementa la comprensión de la distribución y variabilidad de las temperaturas a lo largo de la serie temporal de 20 años en la microcuenca de Atillo.

Tabla 4-13: Estadísticos de la temperatura media en la microcuenca de Atillo

Años	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Error Estándar	Cuartil Inferior	Cuartil Superior	Rango Intercuartílico
2002	9,8	11,6	1,8	10,9	11,0	0,6	5,5	0,2	10,5	11,3	0,8
2003	10,0	11,3	1,4	10,7	10,7	0,4	4,0	0,1	10,4	11,1	0,7
2004	9,2	11,8	2,5	10,5	10,6	0,8	7,6	0,2	9,9	11,2	1,2
2005	9,3	11,1	1,9	10,1	10,0	0,6	5,9	0,2	9,8	10,6	0,8
2006	10,2	11,1	0,9	10,6	10,6	0,3	2,6	0,1	10,4	10,8	0,4
2007	8,9	11,6	2,6	10,0	9,7	0,9	8,6	0,2	9,4	10,7	1,4
2008	9,8	10,8	1,0	10,3	10,4	0,3	2,7	0,1	10,2	10,5	0,3
2009	10,0	12,2	2,2	11,5	11,7	0,7	5,7	0,2	11,1	11,9	0,8
2010	9,9	12,2	2,3	11,5	11,7	0,7	6,3	0,2	11,2	12,1	0,9
2011	10,2	11,4	1,2	10,7	10,6	0,5	4,3	0,1	10,3	11,1	0,9
2012	9,7	12,0	2,4	10,9	11,1	0,7	6,2	0,2	10,8	11,2	0,5
2013	8,4	10,5	2,0	9,7	10,0	0,7	7,5	0,2	9,0	10,3	1,3
2014	8,0	14,5	6,5	11,8	11,9	1,7	14,6	0,5	10,9	12,5	1,7
2015	10,4	14,5	4,1	12,6	12,7	1,0	8,3	0,3	11,8	13,2	1,4
2016	10,7	13,2	2,5	11,9	12,1	0,9	7,6	0,3	11,1	12,7	1,7
2017	7,8	13,8	6,0	11,2	11,6	1,8	16,3	0,5	9,8	12,6	2,8
2018	9,6	12,4	2,8	10,8	10,9	0,9	8,2	0,3	10,0	11,6	1,5
2019	9,1	13,1	4,1	11,2	11,6	1,3	11,9	0,4	10,2	12,3	2,1
2020	8,3	13,2	4,9	10,6	10,9	1,7	16,2	0,5	9,1	12,1	3,1
2021	9,0	11,5	2,5	10,0	10,0	0,8	7,9	0,2	9,4	10,6	1,2

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Se observa que el rango de temperaturas varía de manera significativa a lo largo de los años, con un mínimo de 7,8°C en 2017 y un máximo de 14,5°C en 2014. Esto demuestra la amplitud de las variaciones anuales en la temperatura en la microcuenca. El promedio anual se sitúa en torno a los 10,8°C, con una mediana de 10,9°C, lo que indica una distribución de temperaturas cercana a la normalidad. La desviación estándar, que mide la dispersión de los datos con respecto al promedio, es relativamente baja, con un valor promedio de 0,8°C. El coeficiente de variación, que relaciona la desviación estándar con el promedio, sugiere que la variabilidad relativa de las temperaturas es del 7,5%. Además, se observa una correlación entre los valores de los cuartiles, donde el cuartil inferior se encuentra en torno a 10,0°C y el cuartil superior cerca de 11,6°C, lo que indica que la mayoría de los datos están concentrados en este rango de temperaturas. El rango intercuartílico, que mide la dispersión de los datos en el rango medio, es de 1,5°C, lo que refleja la consistencia en la distribución de las temperaturas en la microcuenca.

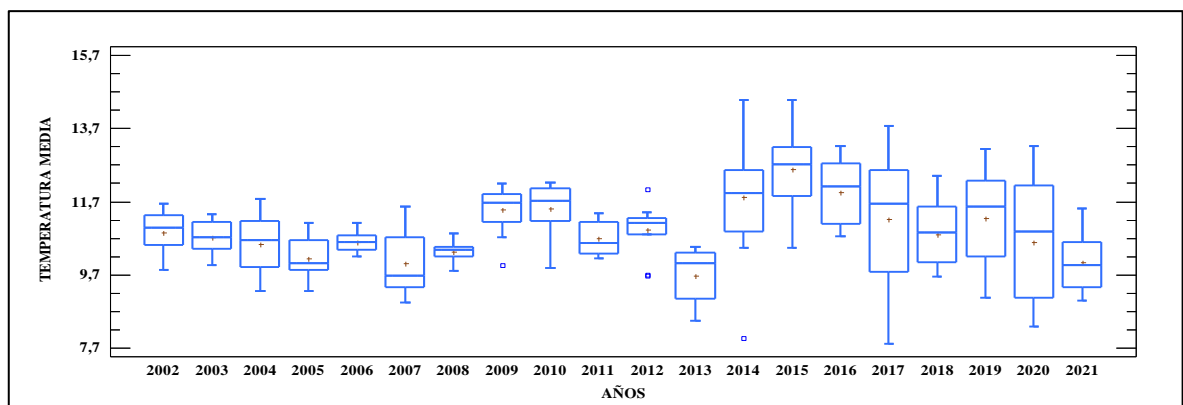


Ilustración 4-15: Diagrama de caja y bigotes de temperatura media histórica de la microcuenca de Atillo

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El diagrama de caja muestra que la distribución de las temperaturas en la microcuenca de Atillo es bastante homogénea en la mayoría de los años, con valores atípicos evidentes en 2014 y 2017. Estos dos años presentan temperaturas significativamente más altas que el resto de la serie temporal, con un rango que supera los 14°C. Por otro lado, 2013 muestra temperaturas más bajas, siendo el año con menor temperatura promedio en la serie temporal. Además, el diagrama de caja revela que la mayoría de los datos se concentran en el rango intercuartílico, lo que indica la consistencia de las temperaturas a lo largo de los años, con una variabilidad moderada en el rango medio. Las temperaturas más extremas se representan como valores atípicos fuera de los bigotes del diagrama, confirmando la presencia de años inusuales en términos de temperaturas.

4.4.2.2 Análisis de la temperatura media en la microcuenca de Ozogоче

El análisis de las temperaturas medias en la microcuenca de Ozogоче, durante el período de 2002 a 2021, revela diferentes patrones en la variación de las temperaturas a lo largo de los meses. En enero, las temperaturas oscilan entre un mínimo de 9,0°C en 2021 y un máximo de 12,4°C en 2017. Febrero presenta una variación similar, con valores que varían desde 9,3°C en 2020 hasta 12,8°C en 2018. Marzo refleja un rango más amplio, con temperaturas que oscilan entre 9,1°C en 2021 y 12,9°C en 2019. Abril muestra temperaturas que varían desde 10,2°C en 2006 hasta 13,4°C en 2017. Mayo y junio exhiben una variabilidad moderada, con temperaturas máximas en torno a 13,7°C en mayo de 2017. Julio presenta una variabilidad considerable, con un mínimo de 7,5°C en 2017 y un máximo de 11,5°C en 2011. Agosto y septiembre reflejan una concentración de años con temperaturas más bajas, pero también algunos años con valores más altos. Octubre muestra una distribución uniforme, con una tendencia hacia temperaturas más altas, con un máximo de 11,6°C en 2006. Noviembre muestra temperaturas que varían desde 8,9°C en 2018 hasta 11,0°C en 2011. Diciembre, al igual que enero y febrero, muestra una distribución sesgada hacia la izquierda, con una mayoría de años con temperaturas más altas, con un máximo de 12,9°C en 2015. Estos datos reflejan una variación estacional en las temperaturas medias a lo largo de los años en la microcuenca de Ozogоче.

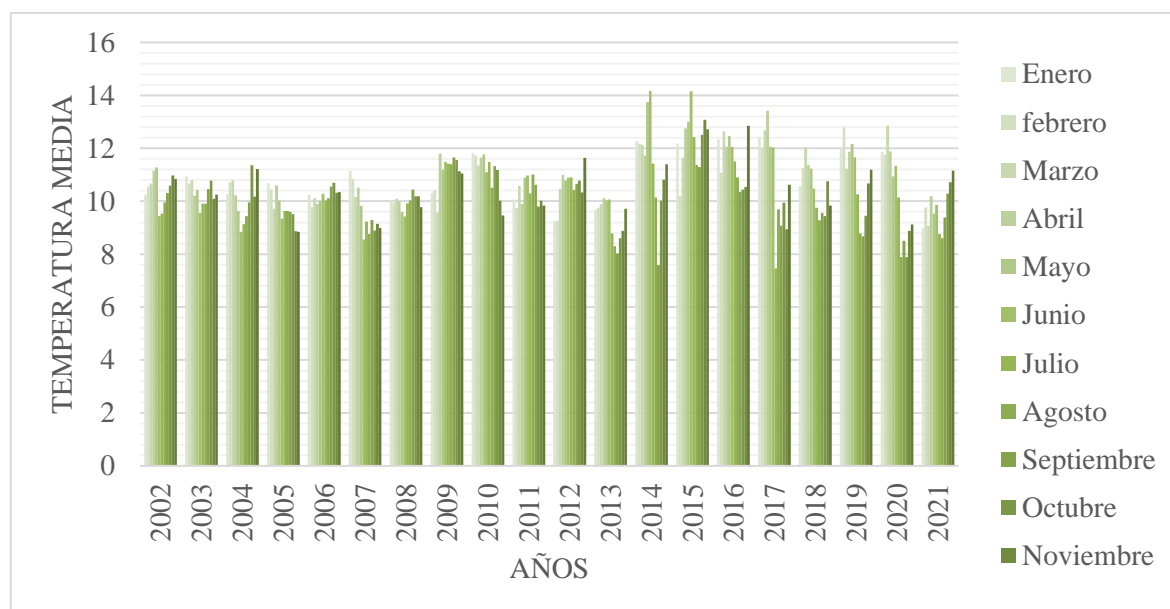


Ilustración 4-16: Histograma de la distribución de temperatura media histórica de la microcuenca de Ozogоче

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El histograma que ilustra la distribución de las temperaturas medias en los diferentes meses a lo largo de los años en la microcuenca de Ozogoche muestra diferentes patrones. Enero, febrero y marzo reflejan una distribución sesgada hacia la izquierda, donde la mayoría de los años registran temperaturas más altas. Abril exhibe una variabilidad moderada, con un pico en el rango medio, indicando años con temperaturas significativamente más altas. Mayo y junio muestran una distribución uniforme, con una tendencia hacia temperaturas más altas. Julio presenta una variabilidad considerable, con algunos años con temperaturas más bajas. Agosto y septiembre reflejan una concentración de años con temperaturas más bajas, pero también algunos años con valores más altos. Octubre muestra una distribución uniforme, con una tendencia hacia temperaturas más altas. Noviembre demuestra una variabilidad significativa, con algunos años con temperaturas más altas. Diciembre, al igual que enero y febrero, muestra una distribución sesgada hacia la izquierda con una mayoría de años con temperaturas más altas. Este análisis del histograma complementa la comprensión de la distribución y variabilidad de las temperaturas a lo largo de la serie temporal de 20 años en la microcuenca de Ozogoche.

Tabla 4-14: Estadísticos de la temperatura media en la microcuenca de Ozogоче

Años	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación (%)	Error Estándar	Cuartil Inferior	Cuartil Superior	Rango Intercuartílico
2002	9,4	11,3	1,8	10,5	10,6	0,6	5,7	0,2	10,1	10,9	0,8
2003	9,6	10,9	1,4	10,3	10,3	0,4	4,1	0,1	10,0	10,7	0,7
2004	8,8	11,4	2,5	10,1	10,2	0,8	7,8	0,2	9,5	10,8	1,2
2005	8,8	10,7	1,8	9,7	9,6	0,6	6,2	0,2	9,4	10,2	0,8
2006	9,8	10,7	0,9	10,2	10,2	0,3	2,6	0,1	10,0	10,3	0,3
2007	8,5	11,1	2,6	9,6	9,3	0,9	9,0	0,2	8,9	10,3	1,4
2008	9,4	10,4	1,0	10,0	10,0	0,3	2,7	0,1	9,8	10,1	0,3
2009	9,6	11,8	2,2	11,1	11,3	0,7	5,9	0,2	10,7	11,5	0,8
2010	9,5	11,8	2,4	11,1	11,3	0,7	6,7	0,2	10,8	11,7	0,9
2011	9,7	11,0	1,3	10,3	10,2	0,5	4,7	0,1	9,9	10,8	0,9
2012	9,2	11,6	2,4	10,5	10,7	0,7	6,5	0,2	10,4	10,9	0,5
2013	8,0	10,1	2,1	9,3	9,7	0,8	8,1	0,2	8,7	10,0	1,3
2014	7,6	14,2	6,6	11,5	11,6	1,7	15,2	0,5	10,5	12,2	1,7
2015	10,2	14,2	4,0	12,3	12,5	1,0	8,4	0,3	11,5	12,9	1,4
2016	10,4	12,9	2,5	11,6	11,8	0,9	7,9	0,3	10,7	12,4	1,7
2017	7,5	13,4	5,9	10,9	11,3	1,8	16,9	0,5	9,4	12,2	2,9
2018	9,3	12,0	2,8	10,5	10,5	0,9	8,5	0,3	9,7	11,2	1,6
2019	8,7	12,8	4,1	10,9	11,2	1,4	12,4	0,4	9,9	11,9	2,1
2020	7,9	12,9	5,0	10,3	10,5	1,7	17,0	0,5	8,7	11,8	3,1
2021	8,6	11,2	2,6	9,7	9,6	0,8	8,2	0,2	9,0	10,2	1,2

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El rango de temperaturas varía considerablemente en estos años, con un mínimo de 7,5°C en 2017 y un máximo de 14,2°C en 2015 y 2016. El promedio anual se sitúa alrededor de 10,5°C, con una mediana de 10,7°C, lo que sugiere una distribución de temperaturas cercana a la normalidad, aunque con ligeras variaciones interanuales. La desviación estándar, que mide la dispersión de los datos con respecto al promedio, es en promedio de 0,7°C, indicando una variabilidad moderada. El coeficiente de variación, que relaciona la desviación estándar con el promedio, muestra una variabilidad relativa del 6,5%, lo que indica que la dispersión de las temperaturas en la microcuenca es relativamente baja. Además, los cuartiles revelan una consistencia en la distribución de las temperaturas, con un cuartil inferior en torno a 9,7°C y un cuartil superior cerca de 11,2°C, lo que indica que la mayoría de los datos se concentran en este rango de temperaturas. El rango intercuartílico, que mide la dispersión de los datos en el rango medio, es de 1,5°C, lo que refleja la coherencia en la distribución de las temperaturas en la microcuenca.

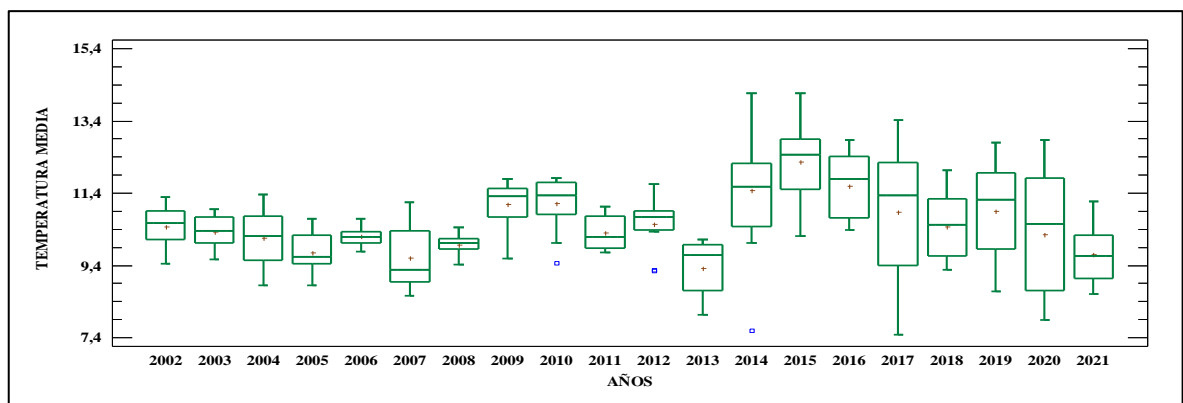


Ilustración 4-17: Diagrama de caja y bigotes de temperatura media histórica de la microcuenca de Yasepan

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El cuartil inferior se encuentra en torno a 9,9°C, mientras que el cuartil superior se sitúa en 11,2°C, lo que indica que la mayoría de los datos de temperatura se concentra en este rango. El rango intercuartílico es de 1,3°C, lo que demuestra una consistencia en la distribución de las temperaturas en la microcuenca de Ozogoché. Se observan valores atípicos, particularmente en los años 2014 y 2017, donde las temperaturas fueron significativamente más altas que en otros años. Esto se ilustra claramente en el diagrama de caja y bigotes, que muestra una distribución bastante uniforme en la mayoría de los años, con una dispersión notoria en los años mencionados. Este análisis del diagrama de caja y bigotes complementa la evaluación de la distribución y variabilidad de las temperaturas en la microcuenca de Ozogoché, ofreciendo una

4.4.2.3 Análisis de la temperatura media en la microcuenca de Yasepan

El análisis de las temperaturas medias en la microcuenca de Yasepan, durante el período de 2002 a 2021, revela patrones de variación estacional en la temperatura a lo largo de los meses. Durante el mes de enero, las temperaturas oscilan entre un mínimo de 9,6°C en 2021 y un máximo de 12,9°C en 2014. Febrero muestra una variación similar, con temperaturas que varían desde 10,3°C en 2011 hasta 13,4°C en 2018. Marzo refleja un rango más amplio, con temperaturas que oscilan entre 9,7°C en 2021 y 13,6°C en 2019. Abril muestra temperaturas que varían desde 10,8°C en 2006 hasta 14,0°C en 2017. Mayo y junio exhiben una variabilidad moderada, con temperaturas máximas en torno a 14,8°C en junio de 2020. Julio presenta una variabilidad considerable, con un mínimo de 8,0°C en 2020 y un máximo de 12,7°C en 2016. Agosto y septiembre reflejan una concentración de años con temperaturas más bajas, pero también algunos años con valores más altos. Octubre muestra una distribución uniforme, con una tendencia hacia temperaturas más altas, con un máximo de 12,3°C en 2017. Noviembre muestra temperaturas que varían desde 9,5°C en 2018 hasta 11,8°C en 2017. Diciembre, al igual que enero y febrero, muestra una distribución sesgada hacia la izquierda, con una mayoría de años con temperaturas más altas, con un máximo de 13,6°C en 2013.

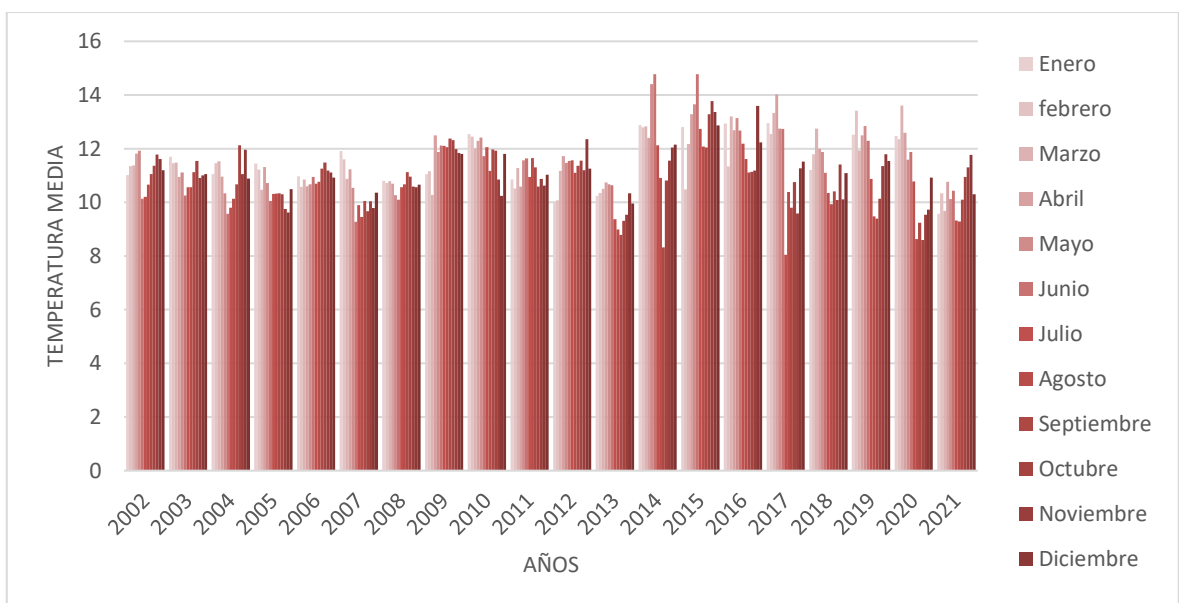


Ilustración 4-18: Histograma de la distribución de temperatura media histórica de la microcuenca de Yasepan

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis del histograma que representa la distribución de las temperaturas medias en los diferentes meses a lo largo de los años en la microcuenca de Yasepan ofrece una visión más detallada. Enero, febrero y marzo reflejan una distribución sesgada hacia la izquierda, con la mayoría de los años registrando temperaturas más altas. Abril exhibe una variabilidad moderada, con un pico en el rango medio, indicando años con temperaturas significativamente más altas.

Mayo y junio muestran una distribución uniforme, con una tendencia hacia temperaturas más altas. Julio presenta una variabilidad considerable, con algunos años con temperaturas más bajas. Agosto y septiembre reflejan una concentración de años con temperaturas más bajas, pero también algunos años con valores más altos. Octubre muestra una distribución uniforme, con una tendencia hacia temperaturas más altas. Noviembre demuestra una variabilidad significativa, con algunos años con temperaturas más altas. Diciembre, al igual que enero y febrero, muestra una distribución sesgada hacia la izquierda, con una mayoría de años con temperaturas más altas. Este análisis del histograma complementa la comprensión de la distribución y variabilidad de las temperaturas a lo largo de la serie temporal de 20 años en la microcuenca de Yasepan.

Tabla 4-15: Estadísticos de la temperatura media en la microcuenca de Yasepan

Años	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Error Estándar	Cuartil Inferior	Cuartil Superior	Rango Inter-cuartílico
2002	10,1	11,9	1,8	11,2	11,4	0,6	5,4	0,2	10,8	11,7	0,9
2003	10,2	11,7	1,4	11,1	11,1	0,4	4,0	0,1	10,7	11,5	0,7
2004	9,6	12,1	2,5	10,9	11,0	0,8	7,5	0,2	10,2	11,5	1,3
2005	9,6	11,4	1,8	10,5	10,3	0,6	5,6	0,2	10,2	11,0	0,8
2006	10,6	11,5	0,9	10,9	10,9	0,3	2,6	0,1	10,7	11,2	0,5
2007	9,3	11,9	2,6	10,4	10,0	0,9	8,3	0,2	9,7	11,0	1,3
2008	10,1	11,1	1,0	10,7	10,7	0,3	2,6	0,1	10,6	10,8	0,2
2009	10,3	12,5	2,2	11,8	12,0	0,7	5,5	0,2	11,5	12,2	0,7
2010	10,2	12,5	2,3	11,8	12,0	0,7	6,0	0,2	11,4	12,4	0,9
2011	10,5	11,6	1,1	11,0	10,9	0,4	3,9	0,1	10,6	11,4	0,8
2012	10,0	12,3	2,3	11,3	11,4	0,7	5,8	0,2	11,1	11,6	0,4
2013	8,8	10,7	1,9	10,0	10,3	0,7	7,1	0,2	9,3	10,6	1,2
2014	8,3	14,8	6,5	12,2	12,3	1,7	14,0	0,5	11,2	12,9	1,6
2015	10,5	14,8	4,3	12,9	13,0	1,1	8,5	0,3	12,1	13,5	1,4
2016	11,1	13,6	2,5	12,2	12,4	0,9	7,5	0,3	11,3	13,0	1,8
2017	8,0	14,0	6,0	11,5	11,9	1,8	15,8	0,5	10,1	12,8	2,8
2018	9,9	12,7	2,8	11,1	11,2	0,9	8,2	0,3	10,2	11,8	1,6
2019	9,4	13,4	4,0	11,5	11,9	1,3	11,4	0,4	10,5	12,5	2,0
2020	8,6	13,6	5,0	10,9	11,2	1,7	15,8	0,5	9,4	12,4	3,0
2021	9,3	11,8	2,5	10,3	10,2	0,8	7,6	0,2	9,6	10,9	1,2

Realizado por: (Imbaquingo C, 2023)

Los valores fluctúan dentro de un rango anual que varía desde un mínimo de 8,0°C en 2017 hasta un máximo de 14,8°C en 2016, lo que da como resultado un rango promedio de 2,5°C. El promedio anual se mantiene en alrededor de 11,1°C, con una mediana de 11,0°C. Esto sugiere una tendencia central estable en las temperaturas. La desviación estándar es aproximadamente 0,8°C, lo que indica una dispersión moderada de los datos con respecto al promedio. Además, el coeficiente de variación se sitúa en torno al 7,1%, señalando una variabilidad relativa en las temperaturas a lo largo de los años. El error estándar mantiene un valor de aproximadamente 0,2°C, lo que subraya la precisión en las estimaciones del promedio. Estos estadísticos resumen la variabilidad y la tendencia central de las temperaturas en la microcuenca de Yasepan durante el período analizado.

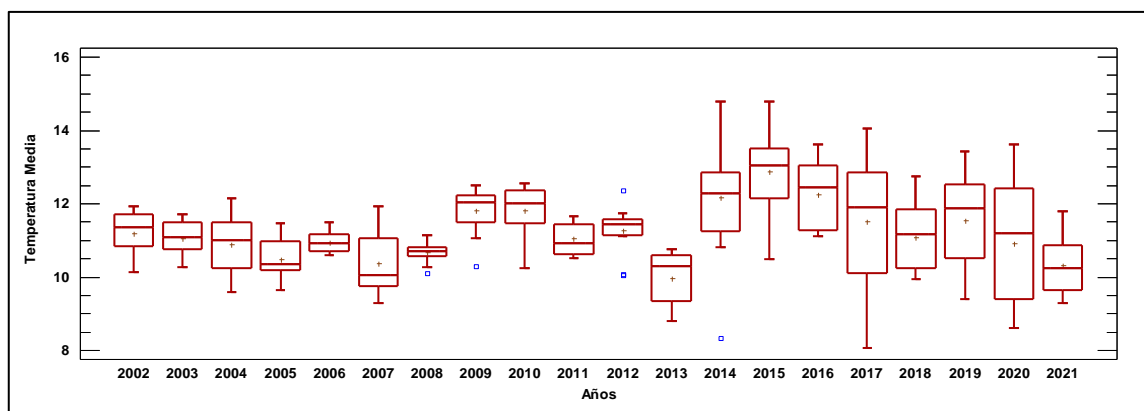


Ilustración 4-19: Diagrama de caja y bigotes de temperatura media histórica de la microcuenca de Yasepa

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El cuartil inferior se encuentra en torno a 10,4°C, mientras que el cuartil superior se ubica en 12,5°C, lo que sugiere que la mayoría de los datos de temperatura se agrupa en este rango. El rango intercuartílico es de 1,8°C, lo que indica una consistencia en la distribución de temperaturas en la microcuenca de Yasepan. Se observan valores atípicos notables, especialmente en los años 2014 y 2017, en los que las temperaturas presentan desviaciones significativas en comparación con otros años. Esto se refleja claramente en el diagrama de caja y bigotes, que evidencia una distribución más uniforme en la mayoría de los años, con una dispersión destacada en los años mencionados. Este análisis del diagrama de caja y bigotes refuerza la evaluación de la distribución y variabilidad de las temperaturas en la microcuenca de Yasepan, proporcionando una representación visual de los estadísticos analizados en el primer párrafo.

4.4.2.4 Análisis global de la distribución de la temperatura media en las unidades hidrográficas

El análisis de las temperaturas medias en las microcuencas de Atillo, Ozogoché y Yasepan durante el período de 2002 a 2021 reveló patrones de variación estacional significativos. En Atillo, los meses de enero y febrero exhibieron las temperaturas más altas en promedio, con valores máximos en 2016. En contraste, julio registró las temperaturas más bajas en 2017. Estos patrones estacionales en Atillo tienen implicaciones importantes para la erosión en las zonas de páramo altoandino, ya que los meses con temperaturas más altas podrían influir en la fusión de nieves y glaciares, afectando la disponibilidad de agua para los ecosistemas y la agricultura en la región.

En Ozogoché, marzo y abril presentaron las temperaturas más altas en promedio, con valores máximos en 2017. Por otro lado, julio mostró las temperaturas más bajas en 2017. En esta microcuenca, el aumento de las temperaturas en los meses más cálidos podría tener un impacto en la disponibilidad de agua, lo que, a su vez, podría afectar el crecimiento vegetal y aumentar el riesgo de erosión. Por otra parte en Yasepan, abril y junio destacaron como los meses más cálidos en promedio, con valores máximos en 2020 y 2016, respectivamente. Julio, nuevamente, presentó las temperaturas más bajas en 2020. En esta microcuenca, la variabilidad de las temperaturas estacionales puede influir en la fenología de las especies vegetales, lo que, a su vez, puede tener un impacto en la erosión, ya que un crecimiento vegetal adecuado puede ayudar a prevenirla.

De forma general las 3 microcuencas muestran semejanzas en los años 2016, 2017 y 2020. Estas tendencias climáticas estacionales y anuales tienen un impacto directo en la hidrología y el crecimiento vegetal en las zonas de páramo altoandino.

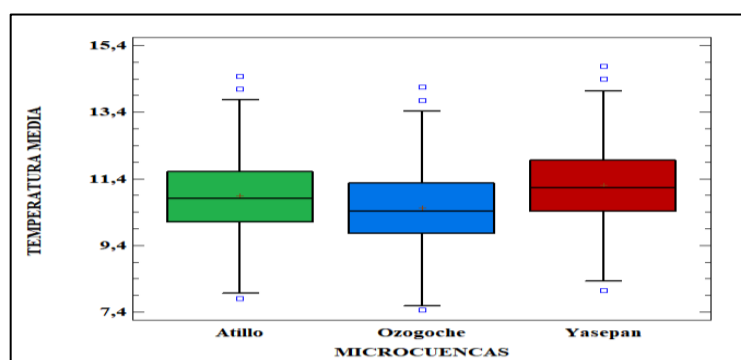


Ilustración 4-20: Diagrama de caja y bigotes de la temperatura media global de las microcuencas

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El diagrama de caja y bigotes que representa la temperatura media en las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan durante el período de 2002 a 2021 revela una serie de observaciones clave. En Atillo, se observa una mediana de alrededor de 10,9°C, con un rango intercuartílico de 1,5°C, lo que indica una consistencia en la distribución de las temperaturas en esta microcuenca.

Los valores atípicos son notables en 2014 y 2017, donde las temperaturas fueron significativamente más altas que en otros años. Ozogoche muestra una mediana de aproximadamente 10,7°C, con un rango intercuartílico de 1,5°C, nuevamente denotando una coherencia en la distribución de temperaturas, y valores atípicos notables en los mismos años (2014 y 2017). Yasepan presenta una mediana de alrededor de 11,0°C, un rango intercuartílico de 1,8°C y valores atípicos evidentes en 2014 y 2017.

En general, se puede inferir que las tres microcuencas comparten similitudes en términos de la distribución de la temperatura media, con variaciones moderadas en el rango intercuartílico y valores atípicos en los mismos años. Estos patrones sugieren cierta uniformidad en la variabilidad térmica en estas microcuencas a lo largo de los años, lo que tiene implicaciones significativas para su hidrología y ecología, especialmente en el contexto del cambio climático y la conservación de los ecosistemas de páramo altoandino.

4.4.3 Análisis del Sistema de Holdridge

4.4.3.1 Resultado de los componentes del sistema Holdridge en la microcuenca de Atillo

Se determinaron los componentes cuya intercepción fue necesaria para determinar las provincial de humedad.

Tabla 40: Componentes del diagrama de Holdridge de la microcuenca de Atillo

Años	Unidades	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Medi a
Biotemperatura	°C	4,50	3,70	3,30	3,80	3,10	2,60	3,50
Precipitación acumulada	mm	1369, 2	1573, 9	1258, 6	1393, 8	1153, 5	1636, 6	1397, 6
Evapotranspiración	mm	265,2	218,0	194,5	223,9	182,7	153,2	206,3
Relación de evapotranspiración	-	0,19	0,14	0,15	0,16	0,16	0,09	0,15

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Se observa una variabilidad notable en las variables estudiadas a lo largo de los años. La Biotemperatura muestra una tendencia a la disminución, pasando de 4,5°C en 2016 a 2,6°C en 2021. Por otro lado, la precipitación acumulada no presenta una tendencia clara, con fluctuaciones anuales considerables, pero sin una dirección dominante.

La Evapotranspiración potencial exhibe un patrón similar al de la Biotemperatura, disminuyendo de 265 mm en 2016 a 153 mm en 2021. La Razón de evapotranspiración varía entre 0,09 y 0,19, sin mostrar una tendencia evidente. La correlación entre estas variables revela que la Biotemperatura está fuertemente negativamente correlacionada con la Evapotranspiración potencial y la Razón de evapotranspiración. Esta relación sugiere que a medida que la Biotemperatura disminuye, la Evapotranspiración potencial y la Razón de evapotranspiración tienden a disminuir. Sin embargo, la correlación con la precipitación acumulada no es evidente. Esta variabilidad en las variables a lo largo de los años indica posibles cambios en las condiciones climáticas de la microcuenca de Atillo y, por ende, en los procesos de evapotranspiración y erosión hídrica potencial.

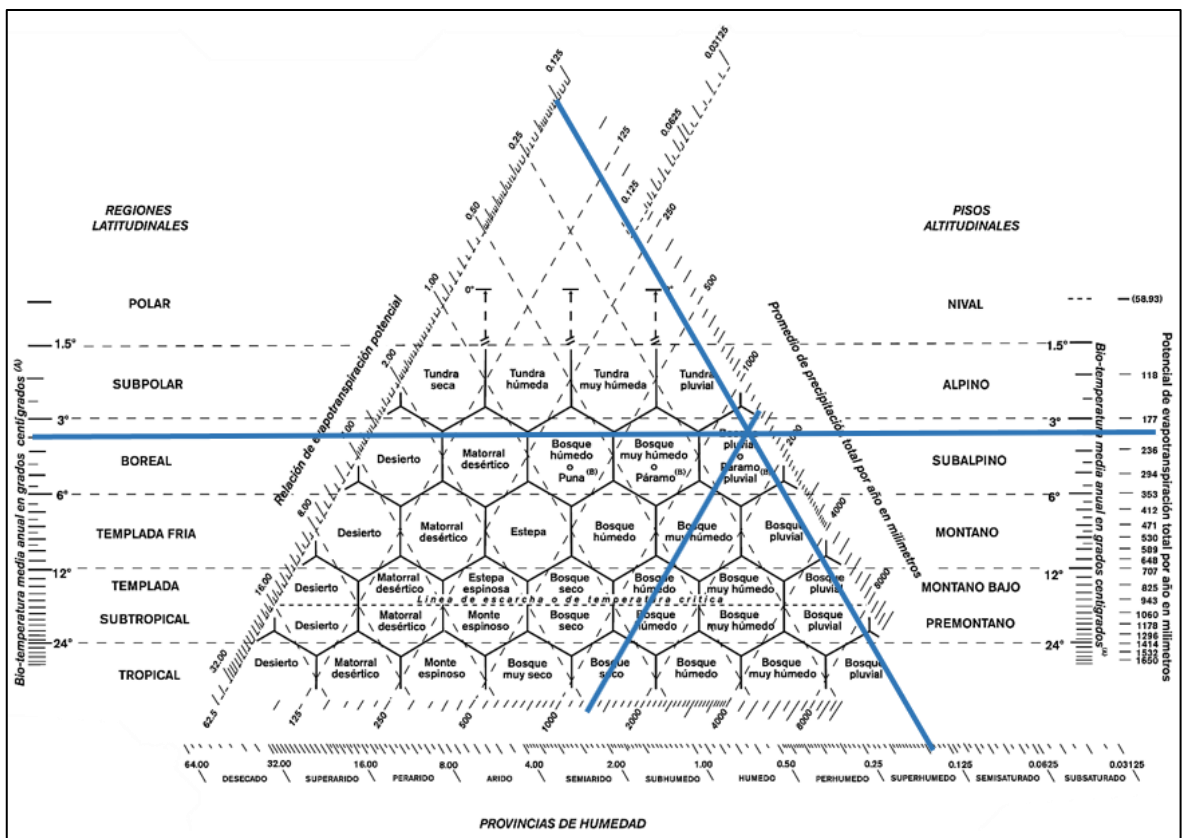


Ilustración 4-21: Diagrama de Holdridge de la microcuenca de Atillo

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Al aplicar los resultados de la media anual de los años a la metodología del Sistema de Holdridge, se obtuvo la interacción en el diagrama de Holdridge. Las líneas trazadas a partir de los valores de Evapotranspiración potencial y la Razón de evapotranspiración intersectan en la provincia de humedad "bosque pluvial a páramo pluvial". Esto sugiere que la microcuenca de Atillo se encuentra en una zona de transición entre un bosque pluvial y un páramo pluvial. La región latitudinal se clasifica como "Boreal," y el piso altitudinal está en el rango de 3500 a 4000 m.s.n.m., con una Biotemperatura en el rango de 3 a 6 °C. Esta clasificación indica que la microcuenca de Atillo posee características de bosque y páramo, lo que es coherente con su ubicación en una región altoandina.

4.4.3.2 Resultado de los componentes del sistema Holdridge en la microcuenca de Ozogoché

Se determinaron los componentes cuya intercepción fue necesaria para determinar las provincial de humedad.

Tabla 4-16: Componentes del diagrama de Holdridge de la microcuenca de Ozogoché

Años	Unidades	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Media
Biotemperatura	°C	3,9	3,2	2,8	3,2	2,6	2,00	2,9
Precipitación acumulada	mm	1419,3	1608,8	1299,8	1442,4	1192,8	1670,4	1438,9
Evapotranspiración	mm	229,8	188,6	165,0	188,6	153,2	117,9	173,8
Relación de evapotranspiración	-	0,16	0,12	0,13	0,13	0,13	0,07	0,12

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En el análisis y discusión de los resultados de la microcuenca de Ozogoché, se observa una variación significativa en las variables clave a lo largo de los años. La Biotemperatura muestra una tendencia a la disminución, pasando de 3,9°C en 2016 a 2,0°C en 2021. La Precipitación acumulada no sigue un patrón claro de aumento o disminución anual, pero en promedio, se mantuvo relativamente constante. Por otro lado, la Evapotranspiración experimenta una reducción constante de 229,8 mm en 2016 a 117,9 mm en 2021.

La Relación de evapotranspiración también muestra una disminución general, oscilando entre 0,07 y 0,16. La correlación entre estas variables sugiere que la disminución de la Biotemperatura se asocia con una reducción en la Evapotranspiración y la Relación de evapotranspiración, lo que

indica una posible disminución en la disponibilidad de agua en la microcuenca de Ozogoche a lo largo del tiempo. Esta variabilidad en las condiciones climáticas puede tener implicaciones para la erosión hídrica potencial y la disponibilidad de recursos hídricos en la región.

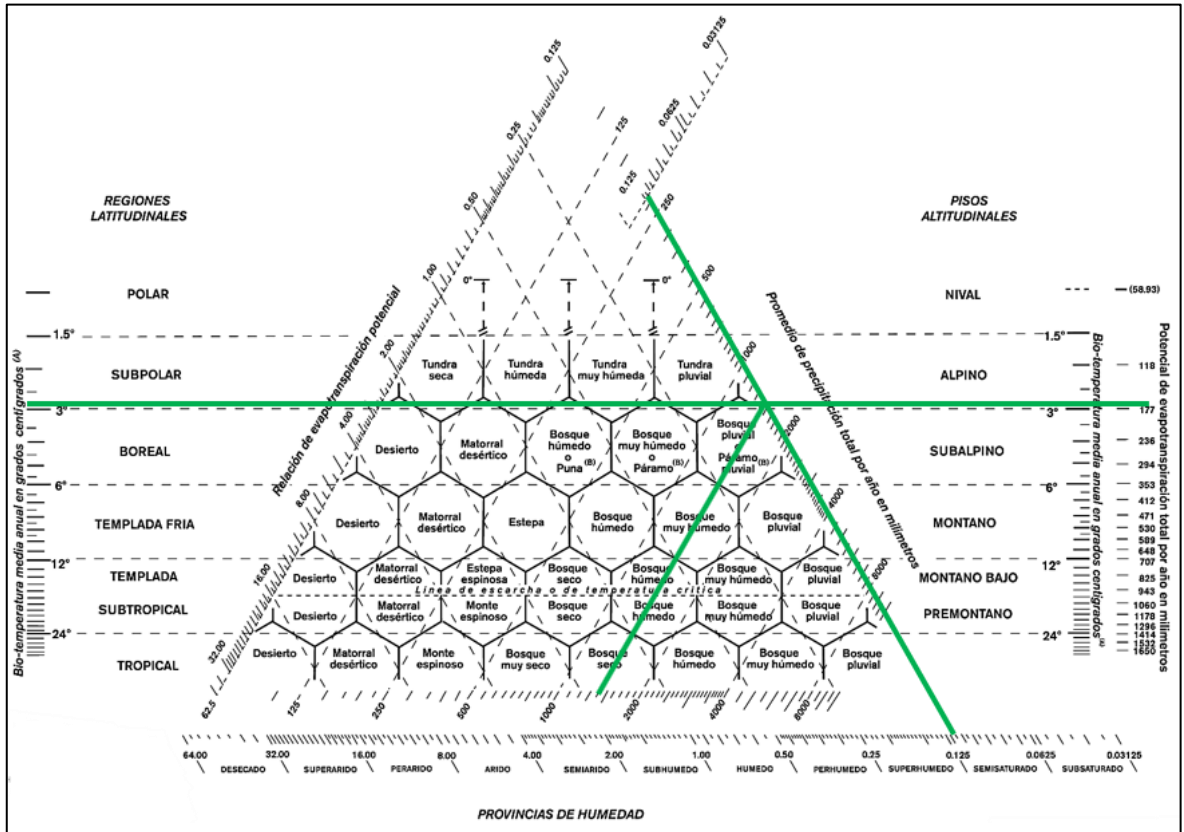


Ilustración 4-22: Diagrama de Holdridge de la microcuenca de Ozogoche

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Al aplicar los resultados promedio de los años en el Sistema de Holdridge, se encontró que la microcuenca de Ozogoche se ubica en la provincia de humedad "bosque pluvial a páramo pluvial" en el diagrama de Holdridge. La región latitudinal se clasifica como "subpolar" al inicio del rango de temperaturas, y el piso altitudinal se sitúa en la categoría "Alpino" al inicio del rango altitudinal, que corresponde a una altitud de 4000 m.s.n.m. La Biotemperatura en esta ubicación varía de 1,5 a 3°C.

La Razón de evapotranspiración sugiere que la zona se encuentra en un rango de semisaturación, lo que indica que las condiciones son propicias para la acumulación de agua. Esta clasificación en el diagrama de Holdridge tiene implicaciones significativas para la biodiversidad y los ecosistemas de la microcuenca de Ozogoche, ya que sugiere la presencia de un ambiente que abarca desde bosques pluviales hasta páramos en altitudes considerables.

4.4.3.3 Resultado de los componentes del sistema Holdridge en la microcuenca de Ozogoche

Se determinaron los componentes cuya intercepción fue necesaria para determinar las provincial de humedad.

Tabla 4-17: Componentes del diagrama de Holdridge de la microcuenca de Yasepan

Años	Unidades	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Media
Biotemperatura	°C	4,9	4,2	3,8	4,2	3,6	3,0	3,9
Precipitación acumulada	mm	1354,5	1604,1	1271,9	1385,2	1171,0	1654,8	1406,9
Evapotranspiración	mm	288,8	247,5	223,9	247,5	212,2	176,8	232,8
Relación de evapotranspiración	-	0,21	0,15	0,18	0,18	0,18	0,11	0,17

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En el análisis y discusión de los resultados de la microcuenca de Yasepan, se observa una variabilidad significativa en las variables estudiadas a lo largo de los años. La Biotemperatura presenta una disminución constante de 4,9°C en 2016 a 3,0°C en 2021. La Precipitación acumulada muestra fluctuaciones anuales considerables, sin una tendencia clara. La Evapotranspiración disminuye de 288,8 mm en 2016 a 176,8 mm en 2021. La Relación de Evapotranspiración muestra una disminución general de 0,21 en 2016 a 0,11 en 2021.

La correlación entre estas variables revela que la Biotemperatura está negativamente correlacionada con la Evapotranspiración y la Relación de Evapotranspiración, sugiriendo que a medida que la Biotemperatura disminuye, tanto la Evapotranspiración como la Relación de Evapotranspiración tienden a disminuir. Sin embargo, la correlación con la Precipitación acumulada no es evidente. Esta variabilidad en las variables a lo largo de los años indica posibles cambios en las condiciones climáticas de la microcuenca de Yasepan y, por ende, en los procesos de evapotranspiración y erosión hídrica potencial.

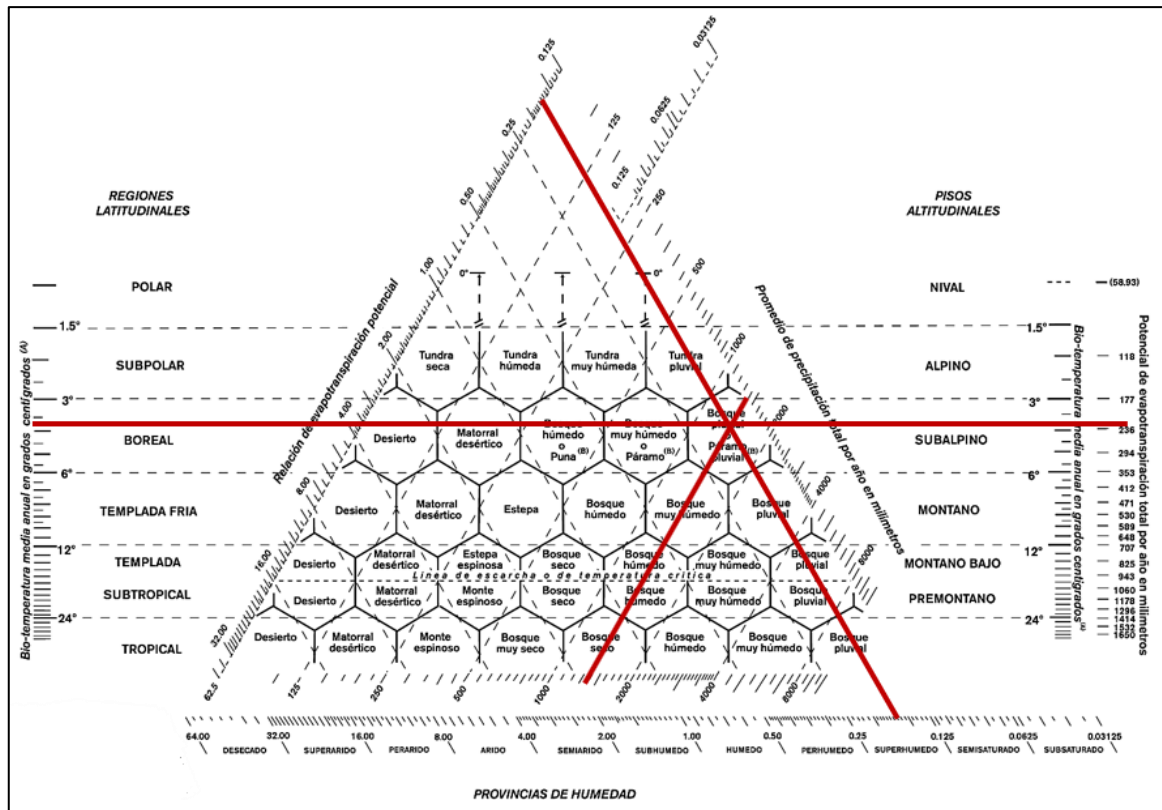


Ilustración 4-23: Diagrama de Holdridge de la microcuenca de Yasepan

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Al aplicar los resultados promedio de los años al Sistema de Holdridge, se obtuvo una interacción notable en el diagrama de Holdridge para la microcuenca de Yasepan. Las líneas trazadas a partir de los valores de Evapotranspiración y la Relación de evapotranspiración se intersectan en la provincia de humedad "bosque pluvial a páramo pluvial". La región latitudinal se clasifica como Boreal, y el piso altitudinal se encuentra en el rango de 3500 a 4000 m.s.n.m., con una Biotemperatura en el rango de 3 a 6 °C. Esto indica que la microcuenca de Yasepan posee características de un bosque y páramo pluvial, en consonancia con su ubicación en una región altoandina. La Relación de evapotranspiración potencial también sugiere que la zona se encuentra en un rango superhúmedo, lo que se alinea con el régimen de precipitaciones de alta montaña de la región.

4.4.3.4 Análisis global de la Evapotranspiración potencial en las unidades hidrográficas

El análisis comparativo entre las tres microcuencas, Atillo, Yasepan y Ozogoche, revela una variación significativa en las variables climáticas a lo largo de los años. En términos de Biotemperatura, todas las microcuencas muestran una tendencia a la disminución, lo que sugiere una influencia generalizada de factores climáticos en la región. Atillo y Yasepan presentan valores

de Biotemperatura inicialmente más altos que Ozogoche, pero comparten la tendencia a la disminución.

Las diferencias entre las microcuencas son más evidentes en la Precipitación acumulada. Atillo muestra fluctuaciones anuales en los valores, mientras que Yasepan y Ozogoche mantienen una tendencia más estable. En términos de Evapotranspiración, todas las microcuencas experimentan disminuciones, aunque Yasepan muestra una disminución menos pronunciada en comparación con Atillo y Ozogoche. La Relación de evapotranspiración también disminuye en todas las microcuencas, con variaciones anuales.

La aplicación del Sistema de Holdridge aporta diferentes hallazgos. Las tres microcuencas caen en la provincia de humedad "bosque pluvial a páramo pluvial", lo que indica que comparten características de bosque y páramo pluvial en sus ecosistemas. Sin embargo, existen diferencias notables en la región latitudinal, los pisos altitudinales y las provincias de humedad. Atillo y Yasepan tienen una región latitudinal clasificada como "Boreal," mientras que Ozogoche es categorizada como "subpolar." En cuanto a los pisos altitudinales, Atillo y Yasepan se encuentran en el rango de 3500 a 4000 m,s,n,m, mientras que Ozogoche abarca altitudes desde 4000 m,s,n,m, mar. Esto indica que Yasepan y Atillo están en una altitud ligeramente inferior en comparación con Ozogoche. Además, la Biotemperatura varía de 3 a 6 °C en Atillo y Yasepan, mientras que en Ozogoche, el rango es de 1,5 a 3 °C. La Relación de evapotranspiración potencial muestra que Atillo y Yasepan se encuentran en un rango de "semisaturación," mientras que Ozogoche cae en un rango de "superhúmedo."

Estas diferencias en las clasificaciones de Holdridge pueden tener implicaciones significativas para la biodiversidad, los ecosistemas y la erosión hídrica potencial en cada microcuenca. Las variaciones en las regiones latitudinales y los pisos altitudinales pueden influir en los tipos de vegetación, la disponibilidad de recursos hídricos y la vulnerabilidad a procesos de erosión hídrica.

La clasificación de "superhúmedo" en Ozogoche podría indicar un mayor riesgo de deslizamientos de tierra debido a las precipitaciones abundantes, mientras que las clasificaciones de "semisaturación" en Atillo y Yasepan sugieren una menor acumulación de agua, lo que podría tener implicaciones para la erosión y la disponibilidad de agua en la región. Estos resultados resaltan la importancia de comprender y monitorear las condiciones climáticas y sus efectos en las microcuencas para el manejo sostenible de los recursos naturales y la conservación del ecosistema.

4.5 Cuantificación de la erosión suelo

4.5.1 Cuantificación e interpretación del Factor R

4.5.1.1 Análisis del factor R en la microcuenca de Atillo

Se determinaron los estadísticos de los raster del factor R en los 20 años de estudio como se muestra en la siguiente gráfica:

Tabla 4-18: Resultados multianuales del factor R en la microcuenca de Atillo

Año	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación Estándar	Coefficiente de variación
2002	260,4	306,7	46,3	285,4	10,4	3,6
2003	361,1	424,9	63,8	395,3	14,3	3,6
2004	269,9	315,0	45,1	293,9	10,1	3,4
2005	209,9	255,1	45,2	233,5	10,2	4,4
2006	312,6	369,6	56,9	343,9	12,7	3,7
2007	94,8	122,9	28,1	110,1	6,4	5,8
2008	1078,8	1254,2	175,4	1176,5	39,5	3,4
2009	281,1	346,7	65,6	316,2	14,7	4,7
2010	331,3	401,2	69,9	367,4	15,9	4,3
2011	337,9	409,8	71,9	375,9	16,1	4,3
2012	422,7	505,5	82,8	468,2	18,5	4,0
2013	366,3	406,5	40,2	384,6	9,0	2,3
2014	326,7	371,0	44,3	346,1	9,8	2,8
2015	382,3	425,6	43,4	403,3	9,9	2,4
2016	455,9	491,2	35,2	475,6	8,8	1,9
2017	496,1	529,2	33,1	510,4	7,3	1,4
2018	405,3	447,1	41,8	426,0	9,6	2,2
2019	421,2	458,6	37,4	440,0	8,7	2,0
2020	359,6	408,2	48,7	381,6	10,9	2,8
2021	500,6	542,5	41,9	519,5	9,3	1,8

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis de los estadísticos del factor R a lo largo de los 20 años revela tendencias y variaciones significativas en la erosividad de la lluvia en la región. El valor mínimo de 94,8 en 2007 señala un año de baja erosividad, lo que podría estar relacionado con una disminución en el potencial de

erosión hídrica y el escurrimiento superficial en ese período. Por otro lado, el valor máximo de 1078,8 en 2008 indica un año de erosividad extremadamente alta, lo que podría aumentar significativamente el riesgo de erosión en la microcuenca.

El análisis de la media del factor R se puede ver que los valores tienden a aumentar gradualmente de alrededor de 285,4 en 2002 a 519,5 en 2021, lo que sugiere un incremento en la erosividad promedio de la lluvia a lo largo de las dos décadas. Esta tendencia se refleja en el coeficiente de variación, que disminuye de 3,6 en 2002 a 1,8 en 2021, lo que indica una mayor estabilidad en los valores del factor R con el tiempo. La desviación estándar, por su parte, muestra un aumento general de la variabilidad interanual, pasando de 10,4 en 2002 a 14,7 en 2009, lo que refleja un período de variabilidad más alta en la erosividad de la lluvia.

En términos de correlaciones, se observa que años con valores altos del factor R tienden a presentar mayores desviaciones estándar, lo que sugiere una mayor variabilidad en la erosividad. Por otro lado, años con valores bajos del factor R tienden a mostrar coeficientes de variación más altos, lo que indica una mayor dispersión de los datos.

4.5.1.2 Análisis del factor R en la microcuenca de Ozogoche

Se determinaron los estadísticos de los raster del factor R en los 20 años de estudio como se muestra en la siguiente gráfica:

Tabla 4-19: Resultados multianuales del factor R en la microcuenca de Ozogoche

Año	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación Estándar	coeficiente de variación
2002	255,7	312,7	57,0	284,3	13,7	4,8
2003	354,5	434,3	79,7	393,9	19,2	4,9
2004	262,3	318,9	56,6	289,1	13,5	4,7
2005	200,9	257,1	56,2	226,0	13,6	6,0
2006	306,6	377,1	70,5	342,8	17,0	5,0
2007	94,0	128,7	34,7	112,0	8,6	7,7
2008	1071,8	1292,9	221,1	1192,4	54,7	4,6
2009	272,2	353,1	81,0	311,0	19,4	6,2
2010	321,5	406,3	84,9	359,9	20,3	5,6
2011	328,3	419,0	90,7	371,4	21,8	5,9
2012	412,5	517,0	104,5	465,7	25,2	5,4
2013	376,6	416,5	39,9	397,7	9,1	2,3
2014	334,5	380,3	45,8	357,5	10,5	2,9
2015	396,3	437,6	41,2	420,1	9,4	2,2
2016	475,1	503,9	28,8	495,5	6,9	1,4
2017	503,1	538,8	35,7	521,6	8,4	1,6
2018	419,9	457,9	38,0	442,3	8,5	1,9
2019	435,9	469,7	33,8	456,4	7,7	1,7
2020	369,7	417,8	48,1	394,5	10,9	2,8
2021	510,1	551,5	41,4	531,3	9,4	1,8

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis de los estadísticos del factor R para la microcuenca de Ozogoche a lo largo de los 20 años muestra tendencias y variaciones notables en la erosividad de la lluvia en la región. El valor mínimo de 94,0 en 2007 refleja un año de baja erosividad, lo que podría estar asociado a una disminución en el potencial de erosión hídrica y escurrimiento superficial en ese período. Por otro lado, el valor máximo de 1071,8 en 2008 señala un año de erosividad extremadamente alta, lo que podría incrementar significativamente el riesgo de erosión en la microcuenca.

En términos de tendencias generales, la media del factor R tiende a aumentar gradualmente de aproximadamente 284,3 en 2002 a 531,3 en 2021, lo que sugiere un incremento en la erosividad promedio de la lluvia a lo largo de dos décadas. Esta tendencia se refleja en el coeficiente de variación, que disminuye de 4,8 en 2002 a 1,8 en 2021, indicando una mayor estabilidad en los valores del factor R con el tiempo.

La desviación estándar, por su parte, muestra un aumento general de la variabilidad interanual, pasando de 13,7 en 2002 a 25,2 en 2012, lo que refleja un período de variabilidad más alta en la erosividad de la lluvia. En términos de correlaciones, se observa que años con valores altos del

factor tienden a presentar mayores desviaciones estándar, lo que sugiere una mayor variabilidad en la erosividad. Por otro lado, años con valores bajos del factor R tienden a mostrar coeficientes de variación más altos, lo que indica una mayor dispersión de los datos.

4.5.1.3 Análisis del factor R en la microcuenca de Yasepan

Se determinaron los estadísticos de los raster del factor R en los 20 años de estudio como se muestra en la siguiente gráfica:

Tabla 4-20: Resultados multianuales del factor R en la microcuenca de Yasepan

Año	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación Estándar	coeficiente de variación
2002	252,4	295,2	42,8	274,1	9,1	3,3
2003	350,3	406,7	56,3	378,7	11,9	3,1
2004	262,5	308,0	45,6	286,1	9,6	3,4
2005	203,2	250,4	47,2	227,8	10,0	4,4
2006	302,3	354,6	52,2	328,9	11,1	3,4
2007	89,9	110,8	20,9	99,4	4,7	4,7
2008	1045,2	1185,2	140,1	1114,3	30,8	2,8
2009	270,3	334,7	64,3	303,5	13,7	4,5
2010	321,5	397,0	75,6	360,8	16,8	4,6
2011	326,3	392,4	66,1	360,2	14,0	3,9
2012	407,6	482,1	74,5	445,7	15,8	3,5
2013	367,3	414,5	47,2	389,0	10,0	2,6
2014	333,5	380,3	46,8	356,9	10,3	2,9
2015	379,4	433,2	53,8	402,8	11,6	2,9
2016	439,6	495,6	56,0	462,4	13,2	2,9
2017	501,2	536,8	35,5	518,2	7,8	1,5
2018	401,9	454,0	52,2	424,9	11,3	2,7
2019	414,6	464,8	50,1	435,9	11,1	2,5
2020	364,2	417,6	53,5	389,8	11,4	2,9
2021	502,9	550,8	47,9	525,5	10,2	1,9

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis de los estadísticos del factor R para la microcuenca de Yasepan durante el período de 20 años revela tendencias y variaciones significativas en la erosividad de la lluvia en la región. El valor mínimo de 89.9 en 2007 indica un año de baja erosividad, lo que podría estar asociado con una disminución en el potencial de erosión hídrica y escurrimiento superficial en ese período. Por otro lado, el valor máximo de 1045.2 en 2008 señala un año de erosidad excepcionalmente alta, lo que podría aumentar considerablemente el riesgo de erosión en la microcuenca.

En términos de tendencias generales, la media del factor R tiende a aumentar gradualmente de aproximadamente 274.1 en 2002 a 525.5 en 2021, lo que sugiere un incremento en la erosividad promedio de la lluvia a lo largo de dos décadas. Esta tendencia se refleja en el coeficiente de variación, que disminuye de 3.3 en 2002 a 1.9 en 2021, indicando una mayor estabilidad en los valores del factor con el tiempo.

La desviación estándar, por su parte, muestra un aumento general en la variabilidad interanual, pasando de 9.1 en 2002 a 16.8 en 2010, lo que refleja un período de variabilidad más alta en la erosividad de la lluvia. En términos de correlaciones, se observa que años con valores altos del factor tienden a presentar mayores desviaciones estándar, lo que sugiere una mayor variabilidad en la erosividad. Por otro lado, años con valores bajos del factor R tienden a mostrar coeficientes de variación más altos, indicando una mayor dispersión de los datos.

4.5.1.4 Análisis global del factor R de las unidades hidrográficas

El análisis comparativo de las tendencias en el factor R de las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan pone de manifiesto variabilidades notables en la erosividad de la lluvia a lo largo de las dos décadas estudiadas. Atillo y Ozogoche muestran una tendencia general de aumento en la media del factor R, con valores máximos notables en 2008, lo que coincide con un rango interanual amplio que señala una alta variabilidad en la erosividad durante ese año. Yasepan exhibe una tendencia similar, con un valor máximo en 2008 y un rango interanual igualmente amplio en ese período.

La variabilidad de la erosividad en las tres microcuencas es evidente, con un aumento de las desviaciones estándar en Atillo y Yasepan en los años centrales del período, lo que indica cambios en la variabilidad interanual. Además, la reducción de los coeficientes de variación en 2021 en las tres microcuencas sugiere una mayor estabilidad. Estas variabilidades tienen implicaciones significativas para la erosión hídrica, la generación de eventos extremos de escorrentía y la planificación de recursos hídricos, con Atillo y Yasepan presentando los valores más altos de variabilidad y los más bajos en 2007 y 2008, respectivamente, mientras que Ozogoche presenta la mayor variabilidad en 2008 y la menor en 2016.

Al correlacionar los estadísticos analizados se revela que los valores máximos y mínimos del factor R están estrechamente relacionados con las medias y las desviaciones estándar. En años con una erosividad máxima, como 2008, se observa un rango amplio y desviaciones estándar significativamente altas. En contraste, en años de erosividad mínima, como 2016, se refleja un

rango más estrecho y desviaciones estándar más bajas. Además, los coeficientes de variación tienden a ser más bajos en los años de mayor erosividad, lo que indica que la variabilidad es menor en esos períodos.

Las diferencias entre las tres microcuencas radican en los valores específicos de cada estadístico y las tendencias a lo largo de los años. Atillo muestra una mayor variabilidad en la erosividad, con valores máximos y mínimos más extremos en comparación con Ozogоче y Yasepan. Ozogоче presenta una tendencia de aumento sostenido en la erosividad, especialmente en los años centrales del período, con valores máximos notables en 2008 y 2012. Yasepan exhibe una tendencia de crecimiento en la erosividad, con valores máximos en 2008 y 2021. Las tres microcuencas comparten la tendencia creciente hacia una erosividad más alta en los últimos años del estudio, lo que sugiere una posible influencia de patrones climáticos o cambios ambientales en la erosividad de la lluvia.

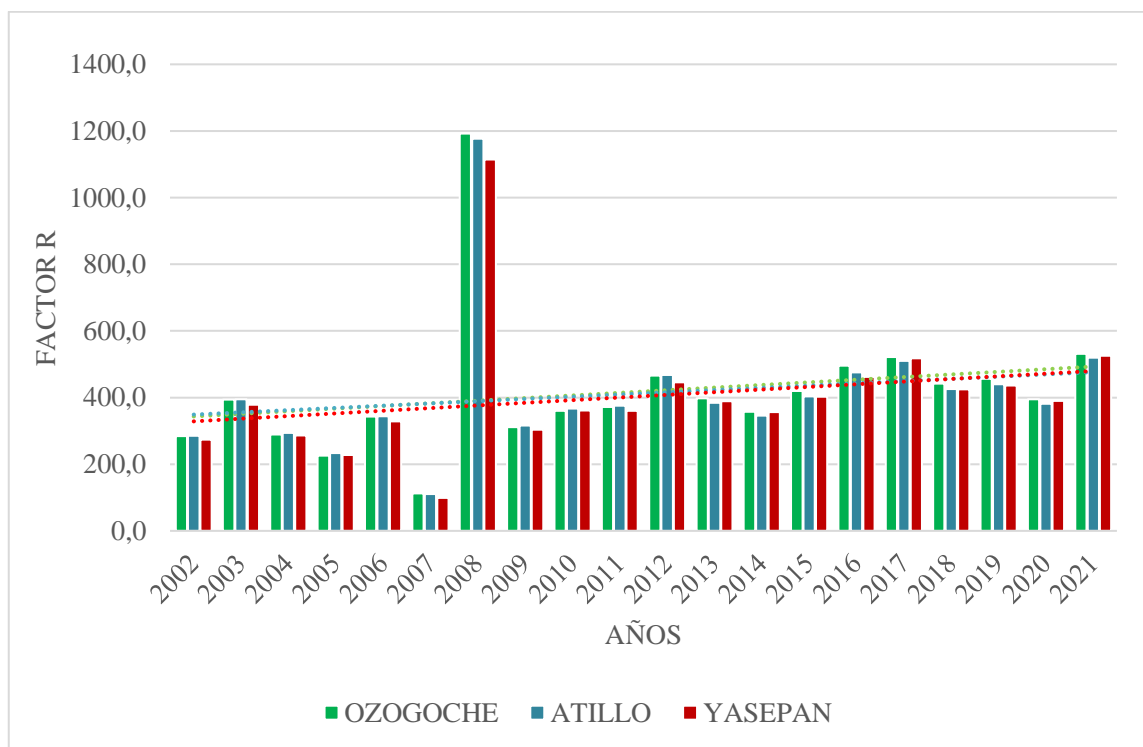


Ilustración 4-24: Histograma de las medias multianuales del factor R en las microcuencas de estudio

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis del histograma de las medias de los 20 años en las tres microcuencas, Atillo, Ozogоче y Yasepan, resalta una tendencia común de aumento en la erosividad de la lluvia a lo largo del período estudiado. La mayoría de los años exhiben valores del factor R cercanos a 400, con variaciones notables, como los años 2007 y 2008, que presentan valores extremadamente bajos y

altos, respectivamente. El año 2008, con el valor máximo del factor R en todas las microcuencas, indica un evento de precipitación excepcionalmente intenso que podría haber causado erosión hídrica significativa y aumentado el riesgo de deslizamientos de tierra.

Por otro lado, el año 2007, con el valor mínimo del factor R en todas las microcuencas, sugiere una disminución en la erosión hídrica, posiblemente debido a condiciones de sequía o una reducción en la intensidad de las lluvias. Estos cambios en los dos años señalan una variabilidad estacional en la erosividad de la lluvia en las microcuencas, y se relacionan con las fluctuaciones notables en los rangos interanuales de los años 2009 al 2012, que influyeron en la variabilidad de las medias.

Las variaciones de los valores del factor R en estos años podrían estar asociadas con temporadas de menor o mayor intensidad de lluvia y posiblemente influenciadas por eventos climáticos extremos. La tendencia común de aumento en la erosividad de la lluvia en todas las microcuencas tiene implicaciones significativas para la erosión hídrica y la generación de eventos de escorrentía, lo que requiere una atención especial en la planificación de recursos hídricos y la mitigación de riesgos asociados con eventos climáticos extremos.

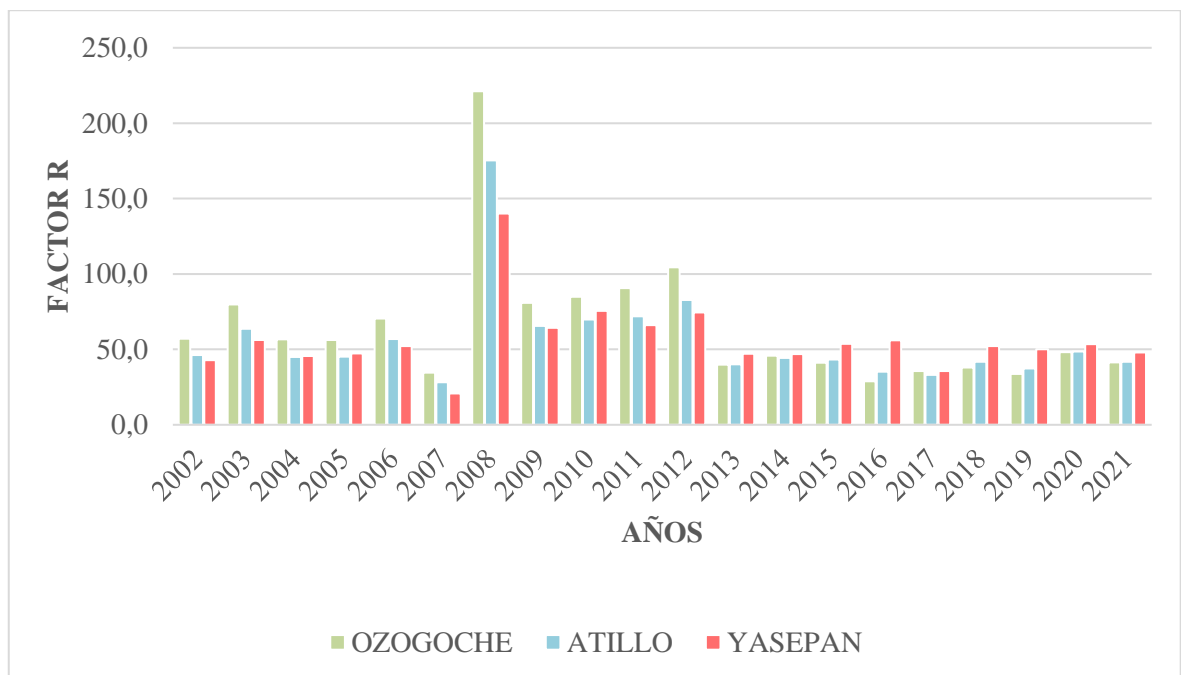


Ilustración 4-25: Histograma de los rangos interanuales del factor R en las microcuencas de estudio

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis de los histogramas de los rangos interanuales de las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan en las últimas dos décadas revela tanto similitudes como diferencias en la variabilidad del factor R. En Atillo, se destaca una alta variabilidad entre los años 2009 y 2012, con fluctuaciones notables del factor R, oscilando entre 79,7 y 28,8. Estos cambios sugieren influencias de eventos climáticos extremos. A partir de 2013, se observa una tendencia hacia la estabilidad en Atillo, posiblemente relacionada con patrones climáticos estacionales. En contraste, Ozogoche presenta variabilidad notable a lo largo del período, con valores que van desde 221,1 en 2008 hasta 28,8 en 2016, evidenciando años con erosividad excepcionalmente alta y otros con erosividad muy baja.

La amplia variabilidad en 2008 señala influencias de eventos climáticos extremos o condiciones excepcionales. En 2016, se observa una menor variabilidad. Yasepan muestra una variabilidad similar a Ozogoche, con valores entre 140,1 en 2008 y 20,9 en 2007. El año 2008 destaca por su alta variabilidad, mientras que 2007 muestra la menor.

Los análisis de los histogramas de los rangos interanuales indican variabilidad estacional en la erosividad de la lluvia, con Atillo mostrando estabilidad desde 2013, mientras que Ozogoche y Yasepan continúan siendo altamente variables a lo largo de los 20 años. Esta variabilidad tiene implicaciones importantes para la erosión hídrica y destaca la necesidad de estrategias de manejo diferenciadas en función de la sensibilidad climática de cada región. Además, los valores máximos de los rangos en 2008 en Ozogoche y Yasepan indican la influencia de eventos climáticos extremos, lo que destaca la importancia de considerar la resiliencia de estas áreas frente a condiciones climáticas adversas.

4.5.2 Cuantificación e interpretación del Factor K

4.5.2.1 Análisis de la taxonomía de las unidades hidrográficas

Después de haber identificado la zona de estudio y aplicado la herramienta tipo exe del Harmonized World Soil Database (HWSD) de la FAO, se pudieron reconocer dos tipos de órdenes de suelos predominantes en la región de interés: los Andosoles y los Leptosoles. Para obtener un análisis detallado de las propiedades de estos suelos, se extrajeron los datos correspondientes de la tabla proporcionada. Estos datos revelaron información relevante sobre los órdenes de suelos, incluyendo propiedades como el contenido de arena, limo y arcilla, así como el contenido de carbono orgánico en diferentes estratos de profundidad.

Tabla 4-21: Resultados de la tabulación de datos de HWSO de características de los andosoles

Estrato de suelo (cm)	Unidad de suelo	Tipo de suelo	Clase de textura (convenciones del USDA)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Contenido de carbono orgánico (%)
(0-20)	ANum	Suelo dominante	Franco	36	45	19	9,0
	ANvi	Suelos asociados e inclusiones	Franco arenoso	55	38	7	6,1
	AN		Franco	40	41	19	7,0
(20-40)	ANum	Suelo dominante	Franco	37	46	17	5,6
	ANvi	Suelos asociados e inclusiones	Franco arenoso	61	32	7	3,4
	AN		Franco	39	41	20	3,4
(40-60)	ANum	Suelo dominante	Franco	39	44	17	4,3
	ANvi	Suelos asociados e inclusiones	Franco arenoso	66	28	6	2,5
	AN		Franco	39	40	21	2,7
(60-80)	ANum	Suelo dominante	Franco	40	43	17	3,0
	ANvi	Suelos asociados e inclusiones	Franco arenoso	66	28	6	2,1
	AN		Franco	45	37	18	1,9
(80-100)	ANum	Suelo dominante	Franco	42	42	16	2,5
	ANvi	Suelos asociados e inclusiones	Franco arenoso	64	30	6	1,6
	AN		Franco	49	35	16	1,6
(100-150)	ANum	Suelo dominante	Franco	45	39	16	1,8
	ANvi	Suelos asociados e inclusiones	Franco arenoso	60	32	8	0,6
	AN		Franco	49	34	17	1,6
(150-200)	ANum	Suelo dominante	Franco	48	39	13	1,4
	ANvi	Suelos asociados e inclusiones	Franco arenoso	57	34	9	0,9
	AN		Franco arenoso	56	33	11	1,4

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Esta tabla presenta datos detallados sobre los Andosoles en diferentes estratos de profundidad, destacando variaciones notables en las propiedades del suelo. En el estrato superficial (0-20 cm), los Andosoles muestran predominancia de textura franco, con un contenido significativo de carbono orgánico. A medida que se profundiza, se observa una tendencia a disminuir en el contenido de arcilla, mientras que la proporción de arena y limo tiende a variar.

La presencia de suelos asociados e inclusiones proporciona información adicional sobre la heterogeneidad en el perfil del suelo. Las implicaciones de estas variaciones pueden estar

relacionadas con la retención de agua, la permeabilidad y la susceptibilidad a la erosión. Estratos con mayor contenido de arcilla podrían retener más agua, pero también ser más susceptibles a la erosión si no se manejan adecuadamente.

Tabla 4-22: Resultados de la tabulación de datos de HWSO de características de los leptosoles

Estrato de suelo (cm)	Tipo de suelo	Unidad de suelo	Clase de textura (convenciones del USDA)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Contenido de carbono orgánico (%)
(0-20)	LPum	Suelo dominante	Franco arenoso	62	19	19	2,2
	ANum	Suelos asociados e inclusiones	Franco	40	38	22	8,1
(20-40)	LPum	Suelo dominante	Franco arenoso arcilloso	59	21	20	1,8
	ANum	Suelos asociados e inclusiones	Franco	44	36	20	5,4
(40-60)	LPum	Suelo dominante	-	N.A	N.A	N.A	N.A
	ANum	Suelos asociados e inclusiones	Franco	44	36	20	4,2
(60-80)	LPum	Suelo dominante	-	N.A	N.A	N.A	N.A
	ANum	Suelos asociados e inclusiones	Franco	42	36	22	3,1
(80-100)	LPum	Suelo dominante	-	N.A	N.A	N.A	N.A
	ANum	Suelos asociados e inclusiones	Franco	43	36	21	2,0
(100-150)	LPum	Suelo dominante	-	N.A	N.A	N.A	N.A
	ANum	Suelos asociados e inclusiones	Franco	46	33	21	2,0
(150-200)	LPum	Suelo dominante	-	N.A	N.A	N.A	N.A
	ANum	Suelos asociados e inclusiones	Franco	42	36	22	2,1

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En cuanto a los Leptosoles, se destaca la presencia de texturas franco-arenosas, con variaciones en el contenido de carbono orgánico. Sin embargo, en los estratos de 40-60 cm, 60-80 cm, 80-100 cm, 100-150 cm y 150-200 cm, no se proporciona información detallada, indicando una falta de datos para esos niveles de profundidad. Esta ausencia de información puede limitar la comprensión de las propiedades del suelo en estratos más profundos y dificultar las predicciones precisas sobre la erodabilidad. En términos de erodabilidad, la presencia de texturas franco-

arenosas sugiere una menor capacidad de retención de agua, lo que podría aumentar la vulnerabilidad a la erosión, especialmente en áreas con pendientes pronunciadas.

4.5.2.2 *Resultado de la selección del estrato de suelo*

Previo a la selección del estrato óptimo, se optó en la comparación de las variables por centrarse en el contenido de carbono orgánico en lugar de las proporciones de limo, arcilla y arena obtenidas por teledetección, a partir de datos de la fuente SoilGrids. La preferencia por el carbono orgánico se fundamenta en su influencia directa en la erodabilidad del suelo y la erosión hídrica. Aunque las proporciones de textura del suelo son indicadores relevantes, tienden a ser más estables con el tiempo. Por otro lado, el carbono orgánico, siendo un componente crítico de la materia orgánica del suelo, influye significativamente en la capacidad de retención de agua y la estabilidad estructural del suelo, lo que lo hace más sensible a los cambios que afectan la erosión hídrica.

Analizar el carbono orgánico se consideró como una alternativa válida, ya que su contenido en el suelo influye significativamente en su erosividad. Por lo tanto, al comparar los diferentes estratos de carbono orgánico en campo con los datos por teledetección, se busca establecer una relación confiable entre estas mediciones para estimar el factor K, teniendo en cuenta la variabilidad en profundidad y las condiciones particulares de cada estrato.

Dado que se trata de estratos diferentes, la validación estricta de uno con el otro puede no ser factible en el sentido tradicional, pero se pretende determinar cuál de los estratos de teledetección es más adecuado para estimar el factor K de manera más precisa en función de su similitud con los estratos en campo, priorizando la coherencia en las mediciones y la representación de las condiciones reales en las microcuencas de estudio.

Tabla 4-23: Comparación entre características del suelo medidas en campo y estimadas por teledetección en diferentes estratos verticales

Características de los puntos de muestreo						Resultados determinados en campo (% en peso)	Resultados estimados a través de teledetección (% en peso)				
Puntos	Coordena X	Coordena Y	Altitud (m.s.n.m.)	Clases de Cobertura Vegetal	Litología	Estratos verticales del suelo (cm)					
						(0-30)	(30-60)	(0-5)	(5-15)	(15-30)	(30-60)
1	769092	9764897	3395	Antrópico	Aglomerado, Lava, Dacita	4,9	5,8	15,8	12,1	10,3	7,7
2	769281	9763442	3449	Pasturas	Aglomerado, Lava, Dacita	6,7	6,1	15,4	12,2	10,8	8,2
3	768858	9762005	3550	Herbazal Inundable	Aglomerado, Lava, Dacita	10,1	6,2	12,0	9,6	6,6	6,5
4	769849	9761516	3618	Pasturas	Depósitos Glaciares	9,7	11,3	12,5	9,7	6,7	6,4
5	770596	9760398	3621	Herbazal de Páramo	Depósitos Glaciares	12,1	7,3	11,7	9,1	6,5	5,7
6	770905	9759448	3495	Pasturas	Depósitos Glaciares	11,9	11,3	12,7	10,3	7,3	6,3
7	771753	9759468	3433	Pasturas	Depósitos Glaciares	21,5	9,2	13,8	10,6	7,0	6,1
8	772514	9759424	3485	Herbazal de Páramo	Aglomerado, Lava, Dacita	8,5	10,9	13,8	10,7	7,3	6,4
9	772034	9758190	3462	Antrópico	Depósitos Glaciares	11,5	13,3	14,5	12,2	8,6	7,2
10	774272	9759207	3496	Herbazal de Páramo	Depósitos Glaciares	9,8	9,5	15,0	13,1	9,9	8,1
11	773443	9757051	3451	Pasturas	Depósitos Glaciares	9,8	11,9	15,1	13,4	9,8	8,0
12	773976	9757502	3446	Herbazal de Páramo	Depósitos Glaciares	1,6	15,7	15,4	13,3	9,9	8,4
13	775009	9757766	3449	Herbazal de Páramo	Depósitos Glaciares	25,6	12,1	14,2	12,5	9,5	8,4

14	776230	9758096	3455	Herbazal de Páramo	-	10,2	8,5	14,4	12,3	9,4	8,1
15	776521	9758567	3497	Herbazal de Páramo	Rocas Volcánicas - Sedimentarias y Lavas	9,1	5,4	14,3	12,6	9,0	7,6
16	776505	9756842	3454	Bosque siempre Verde de Páramo	Rocas Volcánicas - Sedimentarias y Lavas	15,6	19,6	14,5	13,4	10,1	7,6
17	776397	9755579	3470	Herbazal de Páramo	Rocas Volcánicas - Sedimentarias y Lavas	17,7	13,1	16,5	15,1	12,4	9,2
18	776042	9757733	3452	Herbazal de Páramo	-	13,0	12,8	14,6	12,8	9,5	8,1
19	775181	9757562	3444	Herbazal de Páramo	Depósitos Glaciares	16,5	18,3	14,1	12,2	9,2	8,4
20	773109	9758032	3441	Antrópico	Aglomerado, Lava, Dacita	11,0	21,5	14,8	12,6	9,1	7,8
21	771193	9760368	3435	Herbazal Inundable	Depósitos Glaciares	4,4	8,3	12,7	9,7	6,5	5,8
22	769321	9765032	3476	Herbazal Inundable	Aglomerado, Lava, Dacita	5,7	4,3	15,5	11,6	9,9	7,4
23	769053	9764030	3426	Pasturas	Aglomerado, Lava, Dacita	8,8	8,4	15,9	12,7	11,1	8,3
24	771329	9759560	3430	Herbazal Inundable	Depósitos Glaciares	7,1	22,3	13,5	10,4	7,0	6,0
25	772529	9759255	3452	Herbazal de Páramo	Aglomerado, Lava, Dacita	4,7	5,7	13,8	10,7	7,3	6,4

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

La tabla presenta las características de los puntos de muestreo en la microcuenca de Atillo. En total, se muestrearon 25 puntos distribuidos en esta área de la microcuenca. Cada punto de muestreo se caracteriza por sus coordenadas X y Y, la altitud m.s.n.m., la clase de cobertura vegetal predominante y la litología predominante en la ubicación. Los estratos verticales del suelo analizados incluyen (0-30) cm, (30-60) cm, (0-5) cm, (5-15) cm, (15-30) cm y (30-60) cm. La altitud de los puntos varía en un rango de 3395 a 3618 m.s.n.m., y las clases de cobertura vegetal incluyen pasturas, herbazales inundables, herbazales de páramo, bosque siempre verde de páramo y áreas antrópicas.

La litología predominante en los puntos de muestreo abarca aglomerados, lavas, dacita y depósitos glaciares, junto con la presencia de rocas volcánicas y sedimentarias. Estos datos brindan una visión integral de las condiciones en la microcuenca de Atillo y sirven de base para el análisis no estadístico de las características de los puntos de muestreo.

Un aspecto relevante es la presencia de herbazales de páramo, ya que estas áreas pueden ser particularmente importantes en la captura y retención de carbono orgánico en el suelo. Además, se observa que los estratos verticales del suelo varían en contenido de carbono orgánico, lo que sugiere que las condiciones específicas de cada punto de muestreo influyen en este parámetro. Estos datos resaltan la importancia de comprender cómo la cobertura vegetal, la litología y la altitud influyen en el contenido de carbono orgánico del suelo en la microcuenca de Atillo. También indican que la variabilidad de estas características puede afectar la erosión del suelo y, en última instancia, el factor K en el modelo RUSLE.

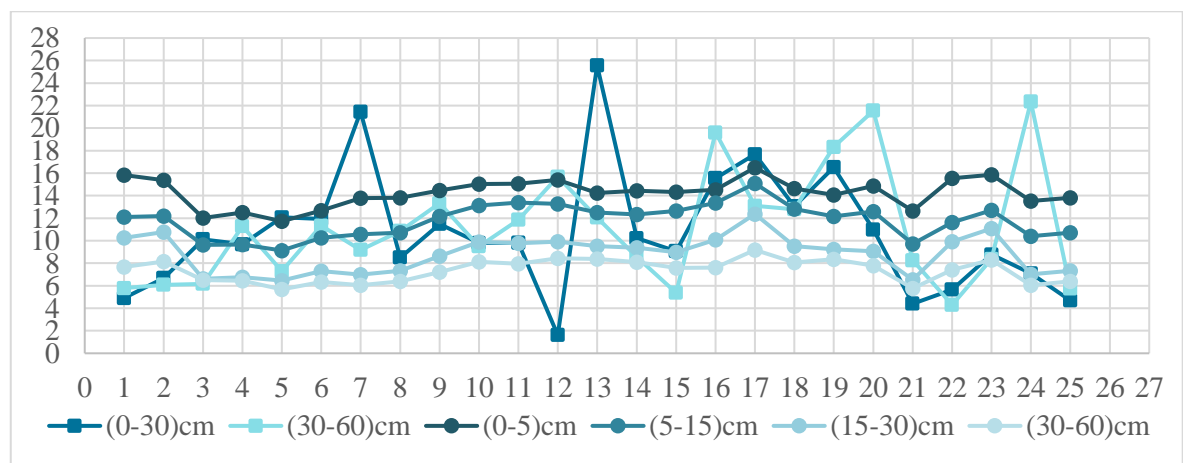


Ilustración 4-26: Grafico de dispersión de los datos de carbono orgánico determinado en campo y estimado por teledetección

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis de dispersión entre los resultados de carbono orgánico determinados en campo y los resultados estimados a través de teledetección revela diferentes patrones que tienen implicaciones significativas. En principio, se observa una similitud moderada entre los datos de campo y teledetección en el estrato de 0-30 cm, con una tendencia general de aumento en el contenido de carbono orgánico a medida que se profundiza en el suelo.

Esta concordancia sugiere que la teledetección es capaz de estimar el contenido de carbono orgánico a una profundidad considerablemente más superficial de lo que es comúnmente reportado en estudios de este tipo. Sin embargo, en el estrato de 30-60 cm, se aprecian diferencias más notables, donde los datos de teledetección tienden a subestimar el contenido de carbono orgánico en comparación con los datos en campo. Esta discrepancia podría atribuirse a las limitaciones de la teledetección en la detección precisa de características a mayor profundidad en el suelo, donde la vegetación y otros factores pueden influir.

La comparación de los estratos superficiales (0-5 cm y 5-15 cm) es particularmente relevante, dado que el estrato de 0-5 cm tiende a mostrar una mayor variabilidad en el contenido de carbono orgánico, lo que podría estar relacionado con la erosión hídrica y la pérdida de suelo. Esta variabilidad sugiere que, a esta profundidad superficial, factores como la erosión y la deposición de material orgánico tienen un impacto significativo en la concentración de carbono orgánico. Como resultado, la elección de centrarse en el estrato de 5-15 cm en lugar del estrato de 0-5 cm se basa en la coherencia observada entre los datos de teledetección y campo, lo que contribuye a la mejora de las estimaciones del factor K en el modelo RUSLE y a una comprensión más precisa de la erosividad de la lluvia en estas regiones de alta montaña.

Finalmente Se llevó a cabo un análisis estadístico de los datos de carbono orgánico obtenidos en campo y estimados a través de teledetección para determinar el estrato de suelo más adecuado para estimar el factor K en el modelo RUSLE. Este análisis riguroso incluyó una evaluación detallada de múltiples estadísticos descriptivos que abarcaron tanto los estratos superficiales 0-5 cm y 5-15 cm como los estratos más profundos 15-30 cm y 30-60 cm.

Tabla 4-24: Análisis estadístico del carbono orgánico determinado en campo y estimado a través de teledetección

Estratos	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación (%)	Error Estándar	Cuartil Inferior	Cuartil Superior	Rango Intercuartílico
Resultados determinados en campo											
(0-30)	1,6	25,6	23,9	10,7	9,8	5,4	51,0	1,1	7,1	12,1	5,0
(30-60)	4,3	22,3	18,0	11,1	10,9	5,1	45,7	1,0	7,3	13,1	5,8
Resultados estimados a través de teledetección											
(0-5)	11,7	16,5	4,8	14,3	14,4	1,2	8,7	0,2	13,8	15,1	1,3
(5-15)	9,1	15,1	6,0	11,8	12,2	1,5	12,6	0,3	10,6	12,7	2,1
(15-30)	6,5	12,4	5,9	8,8	9,2	1,6	18,6	0,3	7,3	9,9	2,6
(30-60)	5,7	9,2	3,5	7,4	7,6	1,0	13,5	0,2	6,4	8,1	1,7

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Al observar los datos estadísticos en cada estrato, se destacan diferencias significativas. El coeficiente de variación (%) muestra la variabilidad relativa en cada estrato, y se puede apreciar que el estrato de 0-30 cm en campo presenta una alta variabilidad con un coeficiente de variación del 51.0%, mientras que el estrato de 30-60 cm en campo exhibe un coeficiente de variación del 45.7%. Por otro lado, en la teledetección, el estrato de 0-5 cm presenta un coeficiente de variación del 8.7%, y el estrato de 5-15 cm tiene un coeficiente de variación del 12.6%. Los cuartiles, el rango intercuartílico y el error estándar también varían entre los estratos.

En términos de tendencias, se observa que los estratos superficiales, como el de 0-5 cm y 0-30 cm en campo, tienden a mostrar medias y medianas con valores más altos, lo que indica una mayor concentración de carbono orgánico en estas capas. Al comparar los 25 datos de monitoreo en campo con los datos extraídos por teledetección, se evidencia que estos estratos superficiales presentan menor variabilidad, representada por cuartiles más estrechos. Por otro lado, los estratos más profundos, como el de 30-60 cm en campo, muestran medias y medianas con valores más bajos, lo que sugiere una disminución en la concentración de carbono orgánico a medida que aumenta la profundidad del suelo. No obstante, en estos estratos profundos, se observa una mayor variabilidad y cuartiles más amplios al analizar los 25 puntos extraídos por teledetección que corresponden a las mismas coordenadas de los puntos muestreados en campo. Esto indica que los estratos superficiales son más homogéneos en contenido de carbono, mientras que los estratos profundos muestran una mayor variabilidad y heterogeneidad en la distribución del carbono orgánico del suelo.

En relación con la elección del estrato óptimo para estimar el factor K, es evidente que el estrato de 0-30 cm en campo es el más adecuado para determinar el impacto de la erosión hídrica en la región. El análisis de los estratos estimados por teledetección reveló que tanto el estrato de 0-5 cm como el de 5-15 cm muestran una mayor coherencia en términos de coeficientes de variación y cuartiles entre ambas fuentes de datos. Esto indica que, aunque el estrato de 0-5 cm es más homogéneo en contenido de carbono, el estrato de 5-15 cm es el óptimo al mantener una variabilidad razonable y reflejar condiciones representativas de la erosión a largo plazo.

La elección del estrato de 5-15 cm se fundamenta en su capacidad para ofrecer una representación más precisa de las condiciones de erosión a largo plazo y la erodabilidad del suelo en la región. A pesar de su mayor variabilidad en comparación con el estrato de 0-5 cm, el estrato de 5-15 cm mantiene una coherencia razonable en términos de coeficiente de variación y cuartiles tanto en campo como en los datos estimados por teledetección. Esto sugiere que el estrato de 5-15 cm no solo representa una tendencia hacia las condiciones reales del suelo en la región, sino que también

mantiene una mayor consistencia en su estimación por teledetección. Por lo tanto, se confirma que el estrato de 5-15 cm es la elección óptima para determinar el factor K y afrontar de manera efectiva la erosión hídrica en la región altoandina.

4.5.2.3 Análisis cuantitativo de las propiedades físicas y químicas del suelo en Atillo

Se determinaron los estadísticos de las características del suelo, para una mayor comprensión de sus propiedades

Tabla 4-25: Características del suelo en el estrato (5-15) cm de la microcuenca de Atillo

	Estrato (5-15) cm	Mínimo	Máximo	Rango	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
ANDOSOL	Arena (%)	40,9	47,0	6,1	42,8	1,0	2,3
	Limo (%)	34,2	39,2	5,0	36,6	1,0	2,7
	Arcilla (%)	17,1	23,4	6,3	20,6	1,3	6,2
	Carbono orgánico (%)	8,6	17,0	8,4	12,6	2,1	16,7
LEPTOSOL	Arena (%)	42,1	44,9	2,8	43,8	0,6	1,4
	Limo (%)	35,0	40,3	5,3	37,2	1,4	3,7
	Arcilla (%)	16,4	21,6	5,1	19,0	1,1	5,6
	Carbono orgánico (%)	11,8	17,2	5,4	15,1	1,4	9,1

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis cuantitativo de las propiedades físicas y químicas del suelo en la microcuenca de Atillo, revela ciertas tendencias importantes. En el caso de los suelos Andosol, se observa que presentan un contenido de arena que varía entre el 40,9% y el 47,0%, con un coeficiente de variación (CV) del 2.3%, lo que indica una relativamente baja variabilidad en este componente. Esto sugiere que los Andosoles en Atillo tienden a ser más uniformes en cuanto a su textura arenosa. Por otro lado, el contenido de carbono orgánico muestra un rango más amplio, variando del 8,6% al 17,0%, con un CV del 16,7%, lo que refleja una mayor variabilidad en este componente. Esto indica que, a pesar de la uniformidad en la textura, los Andosoles de Atillo son más variables en lo que respecta al contenido de carbono orgánico, lo que podría influir en su erodabilidad y en su capacidad para retener agua y nutrientes.

4.5.2.4 Análisis cuantitativo de las propiedades físicas y químicas del suelo en Ozogoche

Se determinaron los estadísticos de las características del suelo, para una mayor comprensión de sus propiedades

Tabla 4-26: Características del suelo en el estrato (5-15) cm de la microcuenca de Ozogoche

	Estrato (5-15) cm	Mínimo	Máximo	Rango	media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
ANDOSOL	Arena (%)	39,9	47,1	7,2	43,8	1,5	3,4
	Limo (%)	34,5	39,8	5,3	37,5	0,9	2,4
	Arcilla (%)	14,6	23,0	8,4	18,7	1,5	8,2
	Carbono orgánico (%)	5,7	16,0	10,2	9,0	1,2	13,8
LEPTOSOL	Arena (%)	39,6	44,8	5,2	42,6	1,2	2,8
	Limo (%)	35,2	39,5	4,3	37,0	0,8	2,3
	Arcilla (%)	18,4	22,9	4,5	20,4	1,2	5,6
	Carbono orgánico (%)	9,2	17,3	8,1	13,0	2,1	16,0

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En la microcuenca de Ozogoche, los Andosoles y Leptosoles también presentan tendencias similares en cuanto a las propiedades del suelo en el estrato. Los Andosoles muestran un CV del 3,4% para el contenido de arena, mientras que el contenido de carbono orgánico presenta un CV del 13,8%, lo que indica una variabilidad considerable en este componente. Por otro lado, los Leptosoles en Ozogoche tienen un CV del 2,8% para la arena y un CV del 16,0% para el carbono orgánico, lo que sigue mostrando una variabilidad significativa en el contenido de carbono orgánico. Esto sugiere que, en Ozogoche, ambas tipologías de suelos tienen una mayor uniformidad en las propiedades de arena y una mayor variabilidad en el contenido de carbono orgánico en el estrato de 5-15 cm.

4.5.2.5 Análisis cuantitativo de las propiedades físicas y químicas del suelo en Yasepan

Se determinaron los estadísticos de las características del suelo, para una mayor comprensión de sus propiedades:

Tabla 4-27: Características del suelo en el estrato (5-15) cm de la microcuenca de Yasepan

	Estrato (5-15) cm	Mínimo	Máximo	Rango	media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
ANDOSOL	Arena (%)	41,4	45,0	3,6	43,1	0,7	1,7
	Limo (%)	34,1	38,5	4,4	36,7	0,9	2,3
	Arcilla (%)	18,2	22,6	4,5	20,2	1,0	5,2
	Carbono orgánico (%)	8,5	16,9	8,4	12,9	2,0	15,7
LEPTOSOL	Arena (%)	42,9	47,0	4,1	45,0	0,8	1,7
	Limo (%)	34,4	38,1	3,8	36,4	0,7	1,9
	Arcilla (%)	16,0	20,6	4,7	18,6	0,9	5,0
	Carbono orgánico (%)	11,1	16,0	5,0	12,8	0,8	6,2

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En la microcuenca de Yasepan, se observan patrones similares en cuanto a las tendencias en las propiedades del suelo en el estrato de 5-15 cm. Los Andosoles en Yasepan presentan un CV del 1,7% para la arena y un CV del 15,7% para el carbono orgánico, lo que indica una menor variabilidad en las propiedades de arena y una mayor variabilidad en el contenido de carbono orgánico. Por otro lado, los Leptosoles en Yasepan tienen un CV del 1,7% para la arena y un CV del 6,2% para el carbono orgánico, lo que muestra una menor variabilidad en las propiedades de arena y una variabilidad moderada en el contenido de carbono orgánico. Esto sugiere que, en Yasepan, los Andosoles y Leptosoles en el estrato de 5-15 cm mantienen tendencias consistentes con las otras dos microcuencas.

4.5.2.6 *Análisis global de las propiedades físicas y químicas del suelo en las unidades hidrográficas*

La uniformidad en las características de textura del suelo en las tres microcuencas. Tanto en los Andosoles como en los Leptosoles, sugiere una consistencia en la capacidad de retención de agua y nutrientes en estas áreas. Esto puede ser relevante para la erosión hídrica, ya que una textura uniforme tiende a proporcionar una retención constante de agua, lo que podría ayudar a reducir el escurrimiento superficial y, por lo tanto, disminuir el riesgo de erosión.

La variabilidad en el contenido de carbono orgánico, como se observa en Atillo con coeficientes de variación del 16,7% en los Andosoles y del 9,1% en los Leptosoles, puede ser atribuible a condiciones locales específicas que afectan la materia orgánica del suelo. Esta variabilidad puede influir en la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, lo que, a su vez, puede aumentar o disminuir su resistencia a la erosión hídrica. En contraste, Ozogoché y Yasepan exhiben una variabilidad ligeramente menor en el contenido de carbono orgánico, lo que sugiere condiciones más consistentes en términos de retención de nutrientes y agua en el suelo. En resumen, considerar tanto la uniformidad de la textura del suelo como la variabilidad en el contenido de carbono orgánico es fundamental al estimar el factor K y desarrollar estrategias efectivas de mitigación de la erosión hídrica en estas microcuencas, ya que estas propiedades físicas y químicas pueden influir directamente en la erodabilidad del suelo.

4.5.2.7 Análisis textural de los suelos de la microcuenca de Atillo

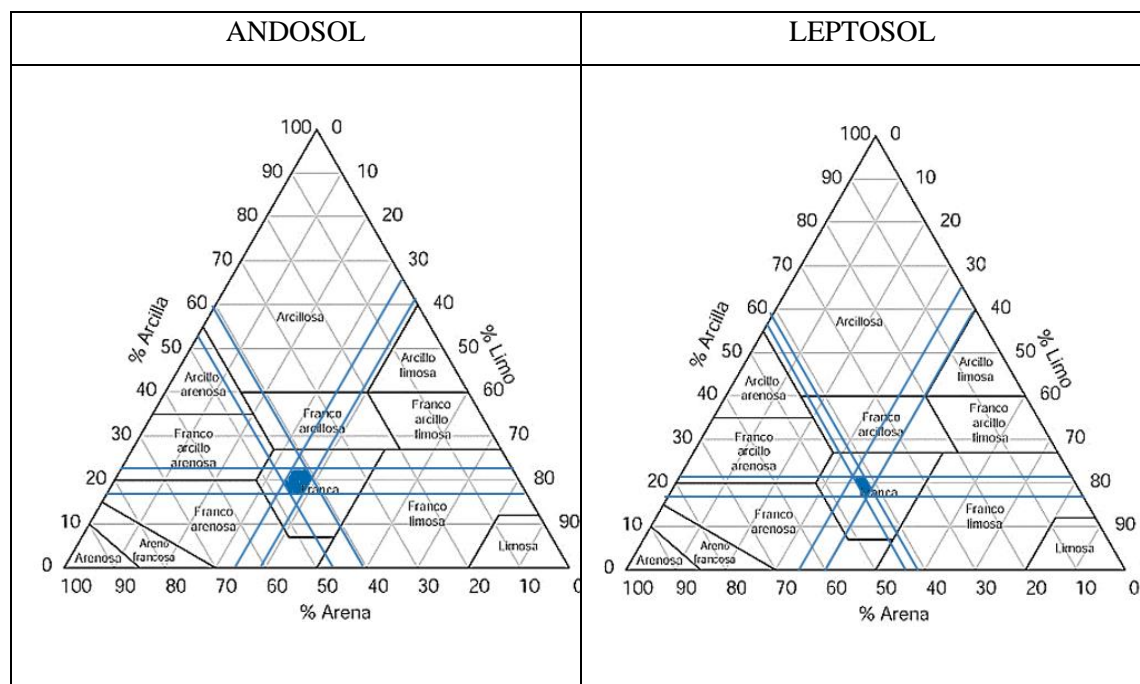


Ilustración 4-27: Triángulo de textura de los suelos de la microcuenca de Atillo

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En Atillo, los resultados de textura indican que los Andosoles muestran rangos más amplios en la arcilla y la arena en comparación con los Leptosoles, que tienen rangos más reducidos. Además, los Leptosoles tienen un rango de arena mucho más estrecho en comparación con el limo y la arcilla. Esta diferencia en los rangos de textura sugiere que los Leptosoles son más uniformes en cuanto a su composición textural, lo que podría traducirse en una mejor resistencia a la erosión hídrica debido a su mayor capacidad para retener agua. Por otro lado, los Andosoles con rangos

más amplios en arena pueden tener una mayor permeabilidad, pero también pueden ser más susceptibles a la erosión.

4.5.2.8 Análisis textural de los suelos de la microcuenca de Ozogoche

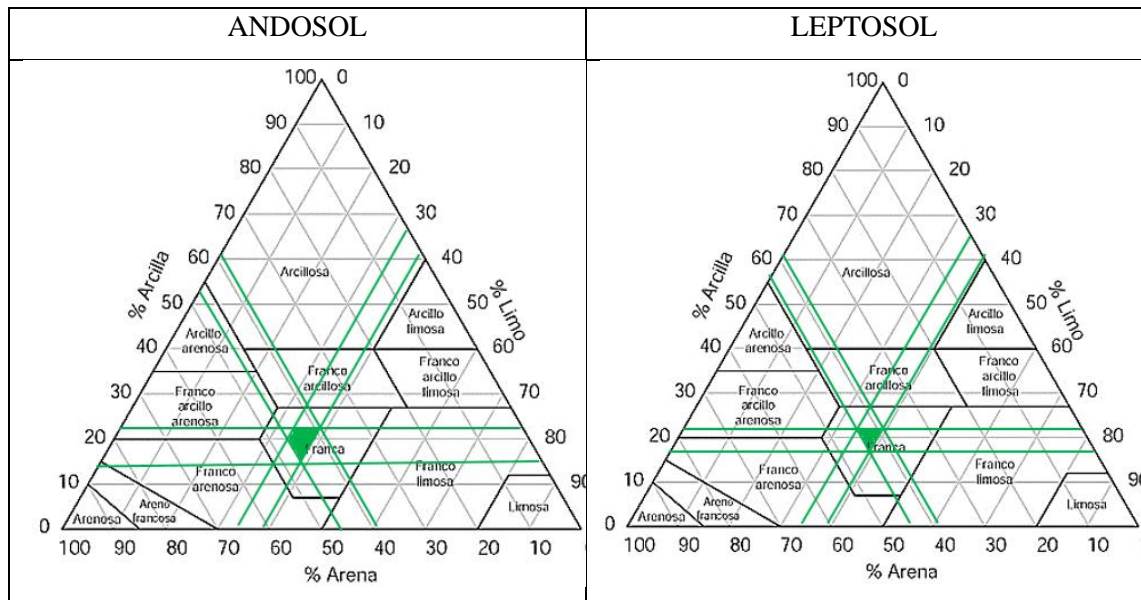


Ilustración 4-28: Triángulo de textura de los suelos de la microcuenca de Ozogoche

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En Ozogoche, nuevamente se observa que los Andosoles tienen rangos más amplios en arcilla y arena en comparación con los Leptosoles, que presentan rangos más reducidos. Además, en esta microcuenca, los Andosoles tienen un rango de arena más amplio en comparación con los Leptosoles, que tienen un rango de arcilla ligeramente más amplio que el de arena. Esto sugiere que los Leptosoles en Ozogoche pueden tener una textura más uniforme, lo que contribuiría a una mayor resistencia a la erosión hídrica. Los Andosoles con un rango de arena más amplio pueden ser más permeables, pero más vulnerables a la erosión.

4.5.2.9 *Análisis textural de los suelos de la microcuenca de Yasepan*

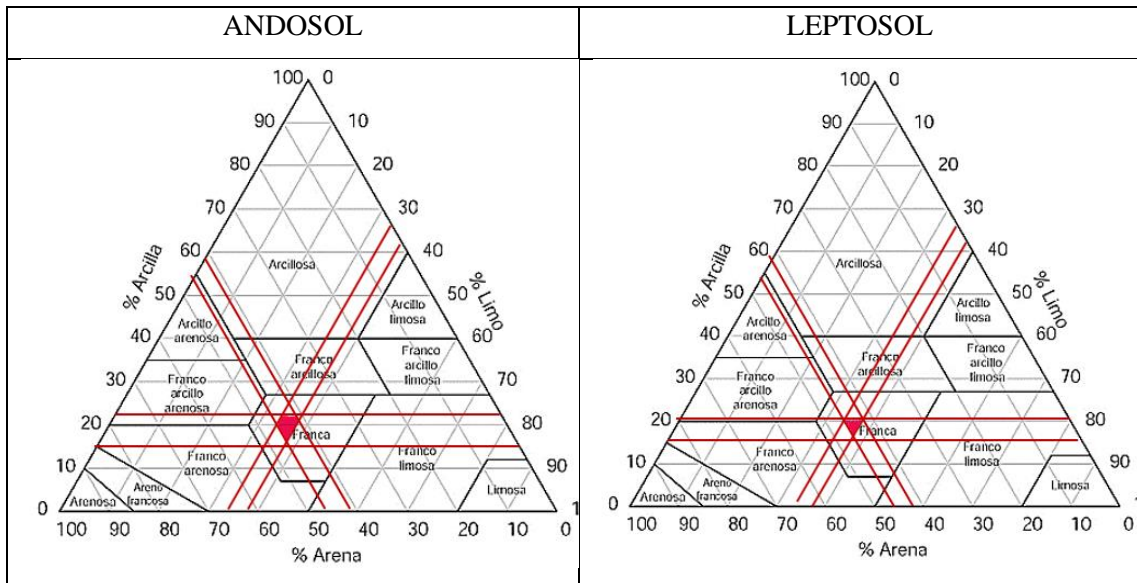


Ilustración 4-29: Triángulo de textura de los suelos de la microcuenca de Yasepan

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En Yasepan, los Andosoles muestran rangos más amplios en la arcilla en comparación con los Leptosoles, que tienen rangos más reducidos. Sin embargo, en términos de limo y arena, los rangos son bastante similares en ambas clases de suelo. En esta microcuenca, los Leptosoles tienen un rango de arcilla más amplio en comparación con el rango de arena y limo, lo que sugiere una textura más uniforme. Esto podría contribuir a una mayor resistencia a la erosión hídrica en los Leptosoles de Yasepan. Los Andosoles, con rangos más amplios, pueden ser más permeables, pero potencialmente más susceptibles a la erosión.

4.5.2.10 *Análisis global del análisis textural de las unidades hidrográficas*

La variabilidad en los rangos de textura puede tener implicaciones significativas en la susceptibilidad a la erosión hídrica. Un rango más amplio, como se observa en los Andosoles, indica una mayor variabilidad en la textura del suelo, lo que puede resultar en áreas con diferente capacidad de retención de agua y susceptibilidad a la erosión. Los suelos con rangos más estrechos, como los Leptosoles, son más uniformes en cuanto a su textura, lo que podría contribuir a una mayor resistencia a la erosión hídrica.

En cuanto a la estructura del suelo, la cantidad de arcilla en el suelo tiende a proporcionar una mayor estabilidad debido a su capacidad de retener agua y formar agregados, lo que disminuye la erosión. Por otro lado, la arena es menos efectiva para retener agua y puede ser más vulnerable a

la erosión. La estructura del suelo también depende de la cantidad de limo, que actúa como un agente aglutinante. Cuanto mayor sea la cantidad de limo, mayor será la estabilidad estructural del suelo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, en función de los resultados presentados y la variabilidad en los rangos de textura, se puede concluir que la microcuenca de Ozogoche, tanto en sus Andosoles como en sus Leptosoles, parece tener una mayor susceptibilidad a la erosión hídrica. Los Andosoles muestran un rango más amplio en arena, lo que sugiere una menor uniformidad en la textura, y los Leptosoles también tienen un rango de arena significativo. Además, en los Andosoles de Ozogoche, el rango de arcilla es más amplio en comparación con las otras microcuencas, lo que podría llevar a una mayor variabilidad en la capacidad de retención de agua. Esta mayor variabilidad textural en ambas clases de suelo podría contribuir a una mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en la microcuenca de Ozogoche en comparación con Atillo y Yasepan

4.5.2.11 Análisis textural global de los suelos de unidades hidriográficas

Con los resultados obtenidos de las características físicas se verificaron los intervalos para determinar en qué clase textural se encuentran los suelos de las microcuencas, a través de la siguiente tabla:

Tabla 4-28: Clases texturales de suelos con base en las características físicas

Textura general	Categoría	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	Andosol			Leptosol		
						Atillo	Ozogoche	Yasepan	Atillo	Ozogoche	Yasepan
Suelos arenosos (textura gruesa)	1	86-100	0-14	0-10	Arenoso						
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	2	70-86	0-30	0-15	Areno francosa						
	3	50-70	0-50	0-20	Franco arenoso						
Suelos francos (textura mediana)	4	23-52	28-50	7-27	Franco	X	X	X	X	X	X
	5	20-50	74-88	0-27	Franco limoso						
	6	0-20	88-100	0-12	Limoso						
Suelos francos (textura moderadamente fina)	7	20-45	15-52	27-40	Franco arcilloso						
	8	45-80	0-28	20-35	Franco arenoso arcilloso						
	9	0-20	40-73	27-40	Franco limoso arcilloso						
Suelos arcillosos (textura fina)	10	45-65	0-20	35-55	Arcilloso arenoso						
	11	0-20	40-60	40-60	Arcilloso limoso						
	12	0-45	0-40	40-100	Arcilloso						

Fuente: (Jamieson 1985)

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Los resultados presentados en la tabla de textura muestran que, en su mayoría, los suelos de las tres microcuencas están dentro de la categoría de Franco en términos de clase textural. Esto significa que los suelos tienen una proporción equilibrada de arena, limo y arcilla, lo que los coloca en la categoría de textura media. Esta tendencia hacia suelos Franco puede deberse a la naturaleza equilibrada y heterogénea de las microcuencas estudiadas.

Sin embargo, es importante destacar que, a pesar de la tendencia general hacia la textura "Franco", existen variaciones en la proporción de arena, limo y arcilla en los Andosoles y Leptosoles de cada microcuenca. En algunos casos, como en los Andosoles de Ozogoche, se observa una proporción relativamente más alta de arena, lo que sugiere una tendencia hacia la clase textural "Franco Arenoso". Del mismo modo, en los Leptosoles de Atillo, se registra una proporción más alta de arcilla, lo que podría indicar una tendencia hacia la clase textural "Franco Arcilloso". En resumen, aunque la tendencia general es hacia suelos "Franco", se observan variaciones en la proporción de los componentes texturales en cada microcuenca y clase de suelo.

4.5.2.12 Interpretación del análisis global del factor K en las unidades hidrográficas

Una vez analizada las propiedades físicas y químicas por separado y determinada la clase textural, se utilizaron las ecuaciones del factor K para determinar las distintas relaciones que componen dichas ecuaciones.

Tabla 4-29: Competentes para la determinación del factor K de las microcuencas hidrográficas

	Andosol	Leptosol	Andosol	Leptosol	Andosol	Leptosol
Relación	Atillo		Ozogoche		Yasepan	
Arena -Limo	0,2003	0,2003	0,2003	0,2003	0,2003	0,2002
Limo-Arcilla	0,8748	0,8837	0,8855	0,8765	0,8767	0,8835
Relación CO	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500
Alta concentración de arena	0,9998	0,9997	0,9997	0,9998	0,9998	0,9997
Kruslle	0,1314	0,1327	0,1330	0,1317	0,1317	0,1326
Factor K ajustado	0,0173	0,0175	0,0175	0,0173	0,0173	0,0175

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

La uniformidad en las características de textura del suelo en las tres microcuencas, tanto en los Andosoles como en los Leptosoles, sugiere una consistencia en la capacidad de retención de agua y nutrientes en estas áreas. Esto puede ser relevante para la erosión hídrica, ya que una textura uniforme tiende a proporcionar una retención constante de agua, lo que podría ayudar a reducir el escurrimiento superficial y, por lo tanto, disminuir el riesgo de erosión.

Los valores de las relaciones y factores K del modelo RUSLE en los Andosoles y Leptosoles de las microcuencas Atillo, Ozogoche y Yasepan presentan tendencias bastante estrechas y similares. En general, las relaciones Arena-Limo y Limo-Arcilla se mantienen muy cercanas en ambas condiciones de suelo, y la relación CO (Carbono Orgánico) es constante en todas las microcuencas. Esta uniformidad sugiere una consistencia en la textura y composición orgánica del suelo a lo largo de las tres microcuencas.

En términos de erodabilidad, los valores de Factor K ajustado son muy estrechos y se mantienen similares en todas las microcuencas. Esto sugiere que, en general, los Andosoles y Leptosoles de las tres microcuencas tienen una resistencia similar a la erosión hídrica. Sin embargo, en un análisis más detallado, se puede notar que, por ejemplo, en Ozogoche, los valores son ligeramente más altos, lo que podría indicar una mayor susceptibilidad a la erosión hídrica en comparación con Atillo y Yasepan, aunque la diferencia es mínima.

4.5.3 Interpretación del factor L.S de las unidades hidrográficas

Se extrajeron estadísticas significativas de los productos finales del Factor L.S en las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan para observar las diferencias entre cada una de las unidades hidrológicas

Tabla 4-30: Estadísticos del factor L.S en las microcuencas de estudio

	Atillo	Ozogoche	Yasepan
Mínimo	0,03	0,03	0,03
Máximo	25,76	23,15	24,44
Rango	25,73	23,12	24,41
Promedio	6,71	5,18	6,68
Desviación estándar	4,31	3,40	3,73
Coefficiente de Variación (%)	64,23	65,58	55,85

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis de estos estadísticos revela que Atillo muestra valores más altos en promedio y mayor variabilidad, lo que implica una mayor susceptibilidad a la erosión en comparación con Ozogoche y Yasepan. La presencia de valores máximos significativamente más altos en Atillo sugiere áreas críticas con un alto riesgo de erosión, posiblemente relacionadas con pendientes pronunciadas y una topografía accidentada. Ozogoche, a pesar de tener un promedio ligeramente inferior en el factor L.S, también presenta riesgos considerables de erosión debido a sus valores máximos. Yasepan, por otro lado, muestra valores promedio y máximos más bajos en el factor L.S, lo que

indica una menor susceptibilidad a la erosión, posiblemente relacionada con su topografía menos abrupta.

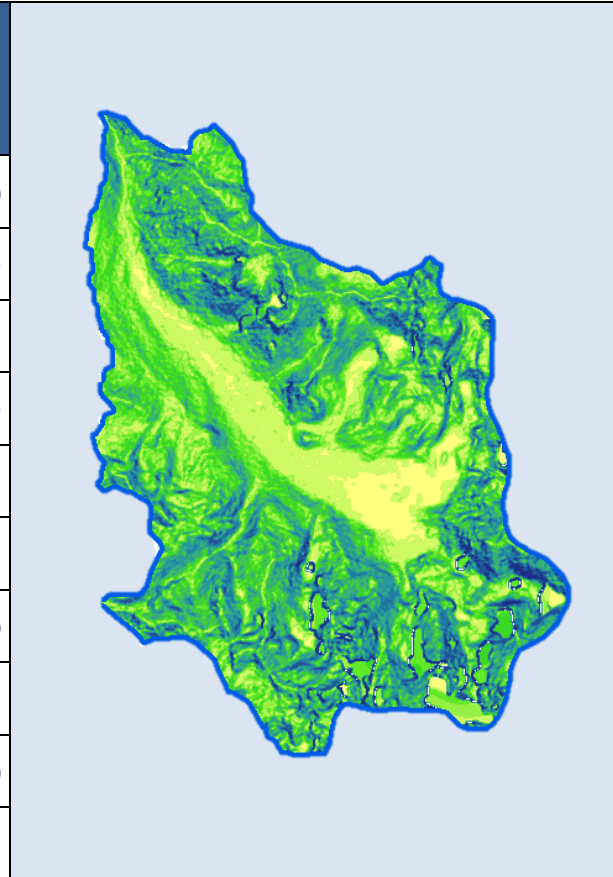
Es importante destacar que, aunque estos resultados proporcionan información valiosa sobre la variabilidad del factor L.S en las microcuencas, no se puede inferir con certeza la gravedad de la erosión sin considerar otros factores y sin tener en cuenta la reclasificación de los rasters de los factores L.S, lo que permitirá una evaluación más precisa de las áreas con mayor riesgo de erosión en cada microcuenca.

4.5.3.1 Análisis del factor L.S de la microcuenca de Atillo

En la siguiente tabla se muestran los estadísticos del raster de la microcuenca reclasificado en 10 clases.

Tabla 4-31: Estadísticos del raster reclasificado del factor L.S en la microcuenca de Atillo

Zonas de intervalos	Área (Ha)	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación (%)
1	36,95	0,03	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00
2	124,54	0,04	1,79	1,74	0,83	0,47	56,59
3	106,46	1,79	3,59	1,80	2,74	0,52	18,85
4	132,38	3,59	5,23	1,64	4,43	0,47	10,59
5	133,99	5,23	6,80	1,57	6,02	0,45	7,51
6	133,08	6,80	8,37	1,57	7,58	0,45	5,98
7	125,53	8,37	9,96	1,59	9,15	0,46	5,00
8	106,36	9,96	11,71	1,75	10,76	0,50	4,61
9	68,22	11,71	13,87	2,17	12,65	0,61	4,80
10	36,59	13,88	16,91	3,03	15,10	0,84	5,57



Realizado por: Imbaquingo, C, 2023

En la microcuenca de Atillo, al analizar los resultados estadísticos derivados de la reclasificación del raster del Factor L.S, se observa que la zona 1, que comprende cuerpos de agua, muestra un valor constante de 0.03 en todos los estadísticos, lo cual es coherente con la falta de erosión en estas áreas debido a su inmunidad al escurrimiento. En las zonas de 2 a 10, que incluyen tierras agrícolas y áreas de vegetación, se aprecia un aumento gradual en los valores del factor L.S a medida que avanzamos de la zona 2 a la zona 10.

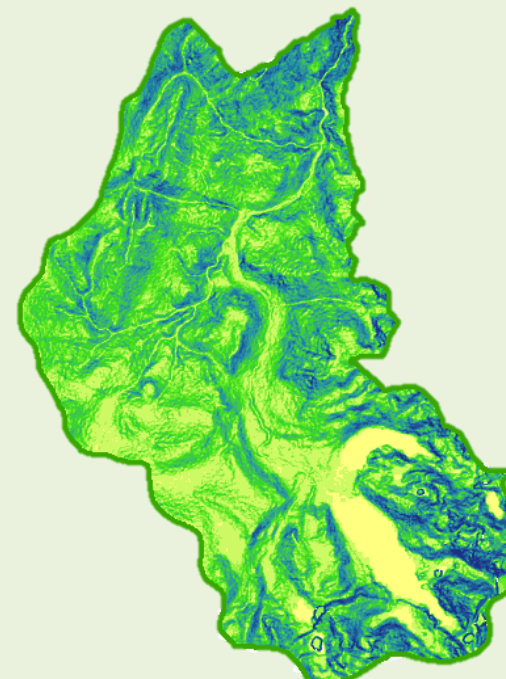
El promedio del factor L.S aumenta desde 0.83 en la zona 2 hasta 15.10 en la zona 10, lo que indica una mayor susceptibilidad a la erosión a medida que la pendiente y longitud de flujo aumentan en la microcuenca. Esta tendencia se refleja en el coeficiente de variación (%), donde las zonas 2 y 3 presentan la mayor variabilidad en el factor L.S, lo que sugiere una mayor sensibilidad a la erosión, ya que muestran una amplia gama de valores de factor L.S. Por otro lado, las zonas 6 a 9 exhiben una menor variabilidad en el factor L.S, lo que podría indicar una menor susceptibilidad a la erosión en estas áreas con pendientes menos pronunciadas. En términos de área, la zona 10 muestra el área más extensa, lo que implica una mayor superficie susceptible a la erosión, lo que es relevante para la planificación de prácticas de conservación del suelo y manejo de la erosión en Atillo.

4.5.3.2 Análisis del factor L.S de la microcuenca de Ozogoché

En la siguiente tabla se muestran los estadísticos del raster de la microcuenca reclasificado en 10 clases:

Tabla 4-32: Estadísticos del raster reclasificado del factor L.S en la microcuenca de Ozogoché

Zonas de intervalos	Área (Ha)	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación (%)
1	777,24	0,03	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00
2	117,16	0,10	1,53	1,43	0,83	0,39	47,04
3	134,52	1,53	2,87	1,34	2,22	0,38	17,34
4	313,02	2,87	4,14	1,27	3,51	0,37	10,47
5	246,33	4,14	5,39	1,25	4,76	0,36	7,55
6	743,27	5,39	6,68	1,29	6,02	0,37	6,21
7	126,84	6,68	8,05	1,37	7,34	0,39	5,36
8	99,86	8,06	9,60	1,55	8,77	0,44	5,04
9	40,57	9,60	11,51	1,91	10,44	0,54	5,19
10	46,12	11,51	14,23	2,72	12,58	0,75	5,95



Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En la microcuenca de Ozogoche, al examinar los resultados estadísticos de la reclassificación del raster del Factor L.S, se encuentra que la zona 1, que abarca cuerpos de agua, mantiene un valor constante de 0.03 en todos los estadísticos, en línea con la falta de erosión en estas áreas. A medida que avanzamos desde la zona 2 hasta la zona 10, que incluyen principalmente tierras agrícolas y vegetación, se observa un incremento gradual en los valores del factor L.S. El promedio del factor L.S se eleva desde 0.83 en la zona 2 hasta 12,58 en la zona 10, indicando una mayor susceptibilidad a la erosión a medida que aumenta la pendiente y longitud de flujo en la microcuenca. Esta tendencia se refleja en el coeficiente de variación (%), donde las zonas 2 y 3 presentan la mayor variabilidad en el factor L.S, lo que sugiere una mayor sensibilidad a la erosión debido a la topografía accidentada. Por otro lado, las zonas 7 y 10 exhiben una menor variabilidad en el factor L.S, lo que podría indicar una menor susceptibilidad a la erosión en áreas con pendientes menos pronunciadas. En términos de área, la zona 6 tiene la mayor extensión, lo que implica una mayor superficie susceptible a la erosión, destacando la importancia de aplicar estrategias de conservación en esta región de Ozogoche.

4.5.3.3 Análisis del factor L.S de la microcuenca de Yasepan

En la siguiente tabla se muestran los estadísticos del raster de la microcuenca reclasificado en 10 clases:

Tabla 56: Estadísticos del raster reclasificado del factor L.S en la microcuenca de Yasepan

Zonas de intervalos	Área (Ha)	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación (%)
1	18,99	0,03	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00
2	1616,13	0,03	1,91	1,88	1,07	0,49	45,96
3	1847,61	1,91	3,52	1,61	2,76	0,46	16,66
4	2102,49	3,52	5,01	1,49	4,29	0,43	9,97
5	2177,10	5,01	6,47	1,45	5,74	0,42	7,32
6	2123,91	6,47	7,93	1,47	7,19	0,42	5,88
7	1979,55	7,93	9,46	1,52	8,67	0,44	5,04
8	1683,63	9,46	11,11	1,65	10,24	0,47	4,61
9	1172,25	11,11	13,11	2,00	11,98	0,57	4,72
10	557,73	13,11	16,05	2,95	14,24	0,80	5,64



Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En la microcuenca de Yasepan, al analizar los resultados estadísticos generados a partir de la reclasificación del raster del Factor L.S, se nota que la zona 1, que corresponde a cuerpos de agua, muestra un valor constante de 0.03 en todos los estadísticos, lo que refleja la ausencia de erosión en estas áreas. A medida que avanzamos desde la zona 2 hasta la zona 10, que abarcan principalmente tierras agrícolas y vegetación, se aprecia un aumento progresivo en los valores del factor L.S. El promedio del factor L.S se incrementa desde 1.07 en la zona 2 hasta 14.24 en la zona 10, indicando una mayor susceptibilidad a la erosión a medida que la pendiente y longitud de flujo aumentan. Esta tendencia se refleja en el coeficiente de variación (%), donde las zonas 2 y 3 presentan la mayor variabilidad en el factor L.S, lo que sugiere una mayor sensibilidad a la erosión debido a la topografía accidentada. Por otro lado, las zonas 7 y 10 exhiben una menor variabilidad en el factor L.S, lo que podría reflejar una menor susceptibilidad a la erosión en áreas con pendientes menos pronunciadas. En términos de área, la zona 2 abarca la mayor extensión, lo que implica una mayor superficie susceptible a la erosión en Yasepan, lo que destaca la necesidad de implementar medidas de conservación del suelo en esta región.

4.5.3.4 Análisis global del factor L.S de las unidades hidrográficas

Al comparar los resultados de los factores L.S en las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan, junto con las diferencias en la elevación mediana de la cuenca y los parámetros de relieve, se revelan importantes implicaciones en sus dinámicas hidrológicas y erosivas.

Atillo, con su elevación mediana más alta de 3643 m.s.n.m. y la pendiente media de cuenca más pronunciada del 17.85%, presenta una topografía montañosa y accidentada. Esto se traduce en una alta susceptibilidad a la erosión, como se refleja en el promedio del factor L.S, que se incrementa desde 0.83 en la zona 2 hasta 15.10 en la zona 10, junto con una amplia variabilidad en las zonas 2 y 3. Por otro lado, Ozogoche, con su elevación mediana de 3826 m.s.n.m. y una pendiente menos pronunciada del 16.68%, muestra características geográficas similares a Atillo, lo que implica una susceptibilidad a la erosión considerable, como se observa en el aumento gradual del factor L.S de la zona 2 a la zona 10, con mayor variabilidad en las zonas 2 y 3. Por último, Yasepan, con la elevación mediana más baja de 3477 m.s.n.m. y una pendiente más suave del 14.80%, exhibe una topografía medianamente accidentada y una menor susceptibilidad a la erosión, reflejada en un promedio del factor L.S que aumenta progresivamente de la zona 2 a la zona 10, con mayor variabilidad en las zonas 2 y 3.

Estas diferencias topográficas y las variaciones en los valores del factor L.S tienen un impacto significativo en la gestión de la erosión y la conservación del suelo en estas microcuencas.

Mientras que Atillo y Ozogoche presentan un mayor riesgo de erosión debido a su relieve accidentado, Yasepan, con su topografía menos abrupta, muestra una susceptibilidad menor. Para las áreas con pendientes más pronunciadas, la implementación de estrategias de conservación del suelo es esencial para mitigar la erosión y el deterioro de la calidad del agua. En contraste, en Yasepan, el enfoque podría estar en la conservación de la vegetación y la gestión sostenible de las tierras agrícolas para mantener su menor susceptibilidad a la erosión. Estas diferencias en las microcuencas ilustran la necesidad de adaptar enfoques de conservación específicos a las condiciones topográficas de cada región para garantizar una gestión efectiva de los recursos naturales.

En la microcuenca de Yasepan, los estadísticos generados a partir de la reclassificación del raster del Factor L.S también presentan algunas tendencias. En la zona 1, que corresponde a cuerpos de agua, se observa un valor constante de 0.03, lo que indica la falta de erosión en estas áreas. Conforme se avanza desde la zona 2 hasta la zona 10, que abarcan principalmente tierras agrícolas y vegetación, se aprecia un aumento progresivo en los valores del factor L.S.

El promedio del factor L.S se incrementa desde 1.07 en la zona 2 hasta 14.24 en la zona 10. Esto sugiere una mayor susceptibilidad a la erosión a medida que aumenta la pendiente y longitud, lo cual es consistente con la topografía de la región. Además, el coeficiente de variación (%) muestra que las zonas 2 y 3 presentan la mayor variabilidad en el factor L.S, lo que indica una mayor sensibilidad a la erosión, ya que engloban una amplia gama de valores del factor L.S. Por otro lado, las zonas 7 y 10 exhiben una menor variabilidad en el factor L.S, lo que podría reflejar una menor susceptibilidad a la erosión en estas áreas.

4.5.4 Interpretación del Factor C de las unidades hidrográficas

Al examinar los resultados del factor C, fundamentado en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, se observan sutiles variaciones a lo largo de los años en un análisis raster, representadas por una gama de colores que abarca desde el azul hasta el verde. Las regiones coloreadas en tonalidades verdes indican valores más elevados del factor C, en contraste con las áreas resaltadas en azul, que revelan zonas con valores más bajos. Estas áreas azules pueden corresponder a cuerpos de agua, tributarios o la principal vía fluvial, o incluso podrían indicar la ausencia de vegetación, sugiriendo una mayor vulnerabilidad a procesos erosivos en dichas ubicaciones.

La corroboración de esta información visual con un análisis estadístico resultó crucial para validar las interpretaciones derivadas de las imágenes. Este enfoque analítico contribuyó a identificar patrones significativos y a proporcionar una base objetiva para entender las variaciones en el factor C a lo largo del tiempo. Además, permitió una evaluación cuantitativa de la relación entre la vegetación, la presencia de agua y la vulnerabilidad a la erosión, proporcionando así una perspectiva más rigurosa y respaldada por datos para la discusión de los resultados.

4.5.4.1 Análisis del factor C de la microcuenca de Atillo

Se determinó el factor C para los años 2016, 2018, 2020 y 2021 para la microcuenca de Atillo, donde se aprecian ligeras diferencias como se muestra en el ANEXO A.

A continuación, se muestran los estadísticos extraídos de cada raster para determinar las diferencias del factor C para cada año:

Tabla 4-33: Estadísticos multianuales del factor C en la microcuenca de Atillo

Años	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
2016	0,023	0,063	0,040	0,040	0,004	10,347
2018	0,023	0,067	0,044	0,043	0,003	7,994
2020	0,019	0,073	0,054	0,041	0,004	9,327
2021	0,036	0,062	0,026	0,045	0,002	4,492

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis de los resultados del raster del Factor C, modelado a partir del NDVI para la microcuenca de Atillo durante los años 2016, 2018, 2020 y 2021, revela patrones semejantes en relación con los estadísticos extraídos. Se observa una tendencia consistente a la disminución del valor promedio del Factor C a lo largo de los años, partiendo de 0,040 en 2016, 0,043 en 2018, 0,041 en 2020 y alcanzando su punto más bajo en 2021 con 0,045. Este descenso en el promedio indica una posible reducción en la erosividad del suelo en la microcuenca de Atillo durante ese período de tiempo.

Adicionalmente, la disminución en la desviación estándar de 0,004 en 2016 a 0,002 en 2021 sugiere una mayor uniformidad en los valores del Factor C, indicando una reducción en la variabilidad entre las distintas áreas de la microcuenca. Este fenómeno podría tener implicaciones positivas en términos de erosión, ya que una menor variabilidad en el Factor C podría traducirse en una erosión más predecible y controlada en la región.

El coeficiente de variación (%) también disminuye de 10,35% en 2016 a 4,49% en 2021, respaldando la tendencia hacia una mayor homogeneidad en los valores del Factor C. Esta disminución en la variabilidad puede interpretarse como una mayor consistencia en la erosividad del suelo en la microcuenca a lo largo de los años analizados.

En términos de erosividad y erodabilidad, la disminución general en los valores del Factor C sugiere una posible reducción en la capacidad del suelo para generar erosión hídrica. Esto podría atribuirse a cambios en las prácticas agrícolas, cobertura vegetal o condiciones climáticas que hayan afectado la erosividad del suelo en la microcuenca de Atillo. Estos resultados son fundamentales para comprender las dinámicas de erosión en la región y pueden orientar estrategias de manejo del suelo para mitigar los riesgos de erosión.

4.5.4.2 Análisis del factor C de la microcuenca de Ozogoche

Se determinó el factor C para los años 2018, 2019, 2020 y 2021 para la microcuenca de Ozogoche, donde se aprecian ligeras diferencias como se muestra en el ANEXO B.

A continuación, se muestran los estadísticos extraídos de cada raster para determinar las diferencias del factor C para cada año:

Tabla 4-34: Estadísticos multianuales del factor C en la microcuenca de Ozogoche

Años	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
2018	0,012	0,069	0,057	0,040	0,005	11,168
2019	0,000	0,073	0,072	0,038	0,004	11,774
2020	0,001	0,096	0,095	0,038	0,004	11,338
2021	0,025	0,063	0,038	0,043	0,004	9,802

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis de los resultados del raster del Factor C, derivado del NDVI para la microcuenca de Ozogoche en los años 2018, 2019, 2020 y 2021, revela patrones distintivos en relación con los estadísticos obtenidos. Se destaca un aumento en el valor máximo del Factor C, alcanzando 0.096 en 2020, en comparación con 0.069 en 2018. Este incremento podría indicar un aumento en la erosividad potencial del suelo en áreas específicas de la microcuenca durante ese período. A pesar de la variabilidad en los valores máximos, el promedio del Factor C muestra una estabilidad relativa, manteniéndose alrededor de 0.038 a lo largo de los años analizados. Esta consistencia en el promedio sugiere que, a pesar de las fluctuaciones en los valores extremos, la erosividad general del suelo en la microcuenca de Ozogoche se ha mantenido en niveles similares.

La desviación estándar, por otro lado, permanece en el rango de 0.004 a 0.005, indicando cierta variabilidad en los valores del Factor C entre las celdas del raster. El coeficiente de variación (%) oscila entre 9.80% y 11,77%, reflejando una moderada variabilidad relativa al promedio. Esta variabilidad podría deberse a la heterogeneidad en las condiciones del suelo y la cobertura vegetal en la microcuena.

Se observa una mayor variabilidad en los valores del Factor C durante los años 2018 y 2020, evidenciado por los coeficientes de variación del 11,17% y 11,34%, respectivamente. Esta variabilidad puede atribuirse a la diversidad de coberturas vegetales presentes en la microcuena, que incluyen pasturas, herbazales de páramo y áreas de influencia antrópica. Estas variaciones pueden tener implicaciones significativas en términos de la capacidad del suelo para resistir la erosión hídrica, ya que diferentes tipos de vegetación pueden afectar la erosividad del suelo de manera distinta. Cabe destacar que el año 2019 muestra un rango más reducido y un coeficiente de variación más alto (11.77%), lo que sugiere una mayor heterogeneidad en los valores del Factor C para ese período. Esto podría relacionarse con cambios en la cobertura vegetal o condiciones climáticas específicas durante ese año.

4.5.4.3 Análisis del factor C de la microcuena de Yasepan

Se determinó el factor C para los años 2018, 2019 y 2020 para la microcuena de Yasepan, donde se aprecian ligeras diferencias como se muestra en el ANEXO C.

A continuación, se muestran los estadísticos extraídos de cada raster para determinar las diferencias del factor C para cada año:

Tabla 4-35: Estadísticos multianuales del factor C en la microcuena de Yasepan

Años	Mínimo	Máximo	Rango	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
2018	0,023	0,061	0,038	0,039	0,003	6,949
2019	0,013	0,063	0,050	0,039	0,004	10,279
2020	0,000	0,058	0,058	0,040	0,003	8,085

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

La evaluación de los resultados del raster del Factor C, derivado del NDVI para la microcuena de Yasepan fue más limitada dado que solo fue posible obtener datos para los 2018, 2019 y 2020. Donde se evidencia una variabilidad en los valores del Factor C, destacando el máximo registrado en 2018 (0,061) y el mínimo en 2020 (0,0001). A pesar de estas oscilaciones, el promedio general

se mantiene relativamente constante alrededor de 0.039, indicando una erosividad media del suelo en la microcuenca a lo largo de los años analizados.

La variación en el rango de los valores del Factor C es más notable en 2019, con una diferencia de 0.050 entre el valor mínimo y máximo. Esta variabilidad puede relacionarse con cambios en la cobertura vegetal o condiciones climáticas específicas durante ese año. La desviación estándar, que oscila entre 0,003 y 0,004, sugiere cierta consistencia en los valores del Factor C entre las celdas del raster, mientras que el coeficiente de variación (%) varía entre 6,949% y 10,279%, reflejando una moderada variabilidad relativa al promedio.

Aunque se observa una ligera disminución en el promedio del Factor C en 2020, esta variación no es significativa. La relación entre los estadísticos y la tendencia general a la disminución del Factor C en años posteriores podría indicar una reducción en la erosividad potencial del suelo en la microcuenca de Yasepan. No obstante, es crucial considerar otros factores, como la cobertura vegetal específica en áreas críticas, para comprender completamente las implicaciones de estos resultados.

4.5.4.4 Análisis global del factor C de las unidades hidrográficas

El análisis integral de los resultados del Factor C, basado en el NDVI, en las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan arroja una serie de tendencias y variaciones significativas. Al evaluar el raster cortado por máscara para eliminar la nubosidad, se observa que la microcuenca de Atillo abarca el 65,01% del área total, Ozogoche el 64,87%, y Yasepan solo el 27,33%. Esta variabilidad en la cobertura espacial demuestra que Yasepan experimenta una mayor variabilidad climática, particularmente en la evapotranspiración, como se corroboró mediante el sistema Holdridge, que indicó una mayor razón de evapotranspiración en Yasepan en comparación con Atillo y Ozogoche.

El análisis global del Factor C, derivado del NDVI, revela tendencias significativas en las tres microcuencas evaluadas. En la microcuenca de Atillo, se observa una consistente disminución en el valor promedio del Factor C a lo largo de los años, indicando posiblemente una reducción en la erosividad del suelo. Esta tendencia se respalda con la disminución en la variabilidad, evidenciada por la reducción en la desviación estándar y el coeficiente de variación.

En Ozogoche, a pesar de fluctuaciones en los valores máximos, el promedio se mantiene relativamente estable, sugiriendo una erosividad general constante. Sin embargo, se destaca un

aumento en el valor máximo en 2020, indicando una mayor erosividad potencial en áreas específicas. En Yasepan, la variabilidad en los valores del Factor C es más pronunciada, con máximos registrados en 2018 y mínimos en 2020. Aunque el promedio se mantiene constante, la mayor variabilidad podría implicar áreas con diferente erosividad. En términos de valores más bajos del Factor C, Atillo presenta una disminución más marcada, lo que podría indicar una mejor capacidad del suelo para resistir la erosión hídrica.

Esto podría ser atribuido a cambios en prácticas agrícolas o cobertura vegetal. Para la erodabilidad y erosividad, las tendencias sugieren que Atillo podría experimentar una menor susceptibilidad a la erosión, mientras que Ozogoche y Yasepan podrían requerir medidas específicas de manejo del suelo para mitigar riesgos erosivos, especialmente en áreas identificadas con valores más altos de Factor C.

4.6 Interpretación de la erosión potencial en las unidades hidrográficas

El análisis y discusión de los resultados para la erosión potencial que se expresa en unidades de $T \times Ha^{-1} \times Año^{-1}$ de las microcuencas de Ozogoche, Atillo y Yasepan durante el periodo de 2002 a 2021 revelan tendencias significativas en la dinámica de la erosión en estas áreas específicas, como se puede comprobar en ANEXO D, ANEXO E Y ANEXO F. La erosión potencial, derivada de la multiplicación de los factores R, K y L.S, que representan la erosividad de la lluvia, la erodabilidad del suelo y la topografía, respectivamente, desempeñan roles cruciales en la dinámica de la erosión hídrica.

Tabla 4-36: Resultados de la media multianual de la erosión potencial en las microcuencas de estudio

Años	Ozogoche	Atillo	Yasepan
2002	25,70	33,36	31,80
2003	35,62	46,21	43,93
2004	26,17	34,35	33,19
2005	20,48	27,31	26,42
2006	30,98	40,20	38,15
2007	10,10	12,89	11,53
2008	107,66	137,46	129,29
2009	28,13	36,99	35,20
2010	32,58	42,98	41,85
2011	33,59	43,96	41,78
2012	42,09	54,74	51,70
2013	36,03	44,71	45,22
2014	32,41	40,21	41,50

2015	38,04	46,88	46,84
2016	44,83	55,32	53,76
2017	47,26	59,38	60,23
2018	40,05	49,53	49,40
2019	41,32	51,18	50,68
2020	35,76	44,34	45,33
2021	48,16	60,43	61,08
Acumulado	756,95	962,43	938,88

Realizado por: Imbaquingo, C, 2023

La tabla que presenta los valores de erosión potencial para las microcuencas de Ozogoche, Atillo y Yasepan a lo largo de los 20 años ofrece una visión detallada de las tendencias y fluctuaciones en la erosión hídrica en cada ubicación. Ozogoche exhibe una variabilidad marcada a lo largo de los años, con picos notables en 2008 y 2017, correspondientes a valores de 107,66 y 47,26, respectivamente. Estos incrementos coinciden con eventos climáticos extremos y alta erosividad de la lluvia, como se observó en el análisis individual del factor R. Atillo, por otro lado, presenta una tendencia general de aumento progresivo a lo largo de los años, destacándose en 2008 con un valor máximo de 137,46. Esta variación podría relacionarse con la topografía accidentada y la mayor erosividad de la lluvia, factores discutidos en el análisis del factor L.S. Yasepan, al igual que Atillo, experimenta un aumento gradual en la erosión potencial, alcanzando su punto máximo en 2021 con un valor de 61.08. Este patrón podría estar vinculado a las tendencias de variabilidad en la erosividad de la lluvia, como se describió en el análisis del factor R.

La variabilidad en la erosión potencial acumulada a lo largo de las dos décadas revela patrones intrigantes entre las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan. Aunque Atillo y Yasepan presentan valores de erosión potencial acumulada cercanos, con una ligera ventaja para Atillo, la microcuenca de Ozogoche destaca al mostrar una erosión acumulada significativamente menor. Esta discrepancia puede atribuirse a la interacción compleja entre los factores climáticos, edafológicos y topográficos. Mientras que Atillo y Yasepan comparten similitudes en la erosividad de la lluvia, Ozogoche logra una mitigación eficaz de la erosión potencial debido a su topografía menos susceptible. La pendiente menos pronunciada y la configuración geográfica de Ozogoche parecen contrarrestar la erosividad de la lluvia, evidenciando la importancia crucial de considerar la interrelación de múltiples factores para una evaluación precisa de la erosión hídrica a lo largo del tiempo.

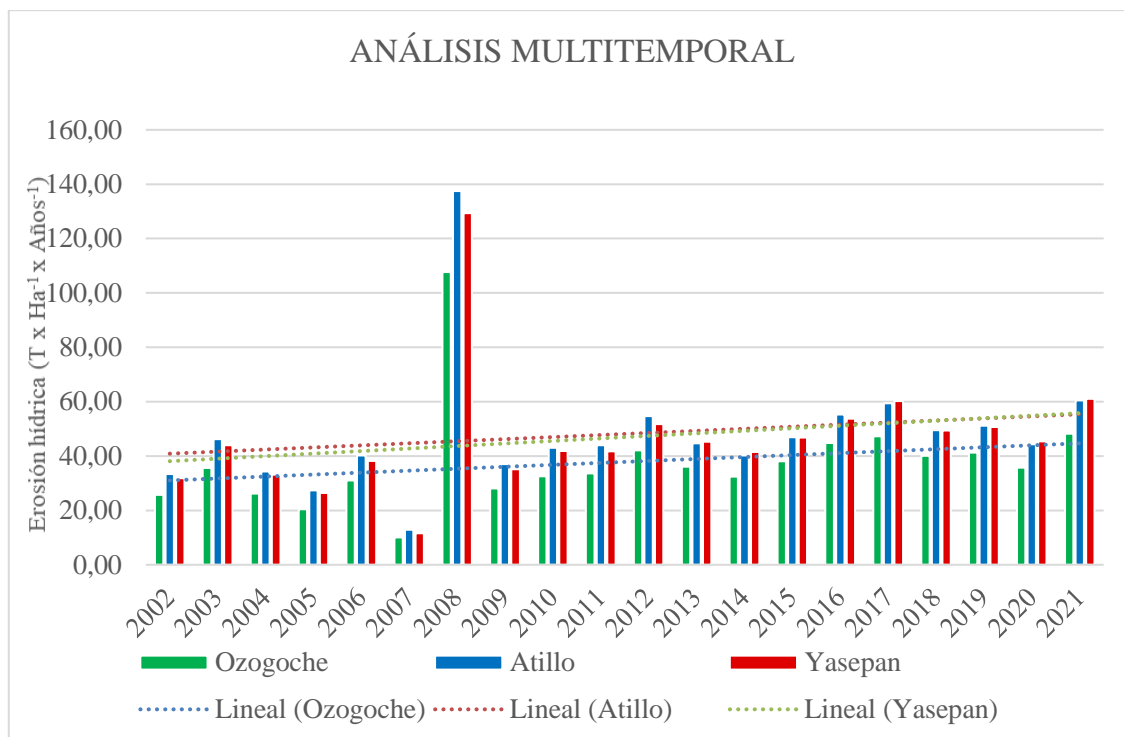


Ilustración 4-30: Histograma de la erosión potencial media multianual en las microcuencas de estudio

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El análisis del histograma de erosión potencial también revela una tendencia general a lo largo de los 20 años, indicando un aumento en las tasas de erosión en todas las microcuencas. Aunque la mayoría de los años presentan valores moderados, la presencia de eventos extremos en 2008 y 2021 destaca la influencia significativa de estos períodos en la erosión acumulada.

El aumento progresivo a lo largo del tiempo sugiere una posible intensificación de los factores que contribuyen a la erosión hídrica en las microcuencas estudiadas. La consistencia en la tendencia de aumento en la erosión potencial para Atillo y Yasepan, respaldada por los factores K y L.S, indica una mayor susceptibilidad a la erosión en estas áreas a medida que avanzan los años. En contraste, aunque Ozogoche muestra variabilidad, su erosión potencial acumulada relativamente menor sugiere una capacidad de compensación, posiblemente atribuida a su topografía menos susceptible.

Este patrón global de aumento en las tasas de erosión a lo largo del tiempo destaca la importancia de considerar medidas de mitigación y gestión sostenible para contrarrestar los impactos negativos en los ecosistemas y la disponibilidad de recursos hídricos en estas regiones.

4.6.1 Comparación de la erosión potencial con los resultados de las geomorfometrías

En la comparación de los resultados de las geomorfometrías con los datos de erosión potencial en las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan, se observan patrones y tendencias significativas que ofrecen insights valiosos sobre la dinámica erosiva en estas áreas a lo largo de las dos décadas analizadas.

Ozogoche se destaca por su extensa área, largo perímetro y longitud axial, indicando una mayor extensión territorial y una configuración alargada en su sistema de drenaje. Esta configuración geomorfológica se refleja en una tendencia a tener una menor erosión potencial acumulada a lo largo del periodo evaluado. Aunque Ozogoche exhibe variabilidad anual, su topografía menos susceptible, respaldada por parámetros como el coeficiente de compacidad de Gravelius (K_c) y el coeficiente de masividad (K_m), parece contrarrestar la erosividad de la lluvia, resultando en tasas de erosión acumulada más bajas en comparación con las otras microcuencas.

En contraste, Atillo presenta una cuenca más compacta y potencialmente una velocidad de escurrimiento más rápida debido a su área más pequeña y menor perímetro. Sin embargo, los resultados de erosión potencial acumulada para Atillo tienden a ser mayores, sugiriendo que, a pesar de su forma más compacta, la microcuenca experimenta tasas de erosión más altas. Este fenómeno puede explicarse por la presencia de una topografía accidentada, como se evidencia en la pendiente media de la cuenca (P_{mc}), que indica un relieve pronunciado.

Yasepan, ubicada en un punto intermedio en términos de área, perímetro y longitud axial de la cuenca, muestra valores de erosión potencial acumulada cercanos a los de Atillo. A pesar de compartir características similares con Atillo en cuanto a la forma alargada, Yasepan presenta una pendiente media de la cuenca (P_{mc}) más baja y altitudes más bajas. Estos factores sugieren una menor susceptibilidad a la erosión en comparación con Atillo, aunque aún experimenta tasas significativas de erosión potencial.

La altimetría también juega un papel crucial en la dinámica de la erosión. Atillo, con altitudes más bajas y una diferencia altitudinal (D_{ac}) de 609 m, exhibe tasas de erosión potencial acumulada más altas. Ozogoche, a pesar de tener la diferencia altitudinal más alta (935 m), muestra tasas relativamente bajas, posiblemente debido a su topografía menos accidentada. Yasepan, con altitudes intermedias y una diferencia altitudinal de 453 m, presenta valores cercanos a Atillo, respaldando la influencia de la altimetría en los procesos erosivos.

En términos de relieve, la pendiente media de la cuenca (Pmc) y la caracterización del tipo de relieve respaldan la relación entre la topografía y la erosión potencial. Atillo y Ozogoche, con relieves accidentados, presentan tasas de erosión acumulada más altas, mientras que Yasepan, con un relieve medianamente accidentado, muestra tasas comparativamente menores.

En resumen, la comparación de los resultados de geomorfometrías con la erosión potencial indica que, a pesar de la forma más compacta de Atillo, su topografía accidentada contribuye a tasas de erosión potencial acumulada más elevadas. Ozogoche, con su configuración geomorfológica alargada y topografía menos susceptible, exhibe tasas más bajas. Yasepan, intermedia en varios aspectos, presenta valores cercanos a Atillo, destacando la complejidad de las interacciones entre la forma de la cuenca, la topografía y la dinámica erosiva. En definitiva, Ozogoche muestra la menor erosión potencial acumulada, respaldada por su extensa área, configuración alargada y topografía menos pronunciada.

4.7 Interpretación de la erosión hídrica real del suelo de las unidades hidrográficas

La limitación en la determinación de la erosión real debido a las restricciones en el factor C, provocadas por la teledetección y la variabilidad climática, plantea desafíos significativos en la obtención de resultados precisos y representativos. La incapacidad para obtener datos completos de la cuenca debido a la presencia de nubosidad en las imágenes satelitales, así como la restricción temporal a partir de 2016, junto con la necesidad de recortar los datos con máscaras, introduce incertidumbres en la interpretación de los resultados.

A pesar de estas limitaciones, se presentan datos sobre la erosión hídrica real para las microcuencas de Ozogoche, Atillo y Yasepan, destacando el rango, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para cada año evaluado (2016, 2018, 2019, 2020 y 2021). Estos resultados, aunque incompletos debido a la presencia de espacios vacíos en los píxeles eliminados durante el proceso de emascaramiento, proporcionan una visión general de la variabilidad en las tasas de erosión real a lo largo de estos años.

Tabla 4-37: Estadísticos de la erosión hídrica real multianual en las microcuencas de estudio

		Ozogoche	Atillo	Yasepan
2016	Mínimo	-	0,01	-
	Máximo	-	9,93	-
	Rango	-	9,93	-
	Promedio	-	1,99	-
	Desviación estándar	-	1,43	-
	Coefficiente de variación (%)	-	71,96	-
2018	Mínimo	0,01	0,01	0,01
	Máximo	7,48	8,79	7,19
	Rango	7,47	8,79	7,18
	Promedio	1,61	1,89	2,05
	Desviación estándar	1,09	1,35	1,02
	Coefficiente de variación (%)	67,89	71,44	49,80
2019	Mínimo	0,00	-	0,01
	Máximo	7,36	-	7,84
	Rango	7,36	-	7,83
	Promedio	1,57	-	2,13
	Desviación estándar	1,07	-	1,07
	Coefficiente de variación (%)	67,88	-	50,46
2020	Mínimo	0,00	0,01	0,00
	Máximo	6,18	9,89	6,56
	Rango	6,18	9,88	6,56
	Promedio	1,36	1,61	1,93
	Desviación estándar	0,92	1,16	0,94
	Coefficiente de variación (%)	67,79	71,75	48,77
2021	Mínimo	0,01	0,01	-
	Máximo	9,75	10,30	-
	Rango	9,74	10,28	-
	Promedio	2,07	2,43	-
	Desviación estándar	1,40	1,70	-
	Coefficiente de variación	67,59	70,08	-

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

En la tabla de estadísticos de erosión hídrica real multianual para las microcuencas de Ozogoche, Atillo y Yasepan, se observaron variaciones notables a lo largo de los años, proporcionando información detallada sobre la dinámica de la erosión en estas áreas.

En términos generales, se evidenciaron fluctuaciones en el rango de tasas de erosión, siendo los años 2016 y 2021 críticos con los valores más altos para Ozogoche. Estos picos indican una considerable variabilidad en la magnitud de la erosión durante esos períodos. Además, el

promedio de erosión mostró una tendencia al aumento en los años más recientes, destacándose 2021 como el año con los valores más altos para las tres microcuencas.

La desviación estándar, que mide la dispersión de los datos con respecto al promedio, presentó picos notables en 2016 y 2021 para Ozogoche, 2018 para Atillo, y 2019 para Yasepan. Estos resultados indican una mayor variabilidad en las tasas de erosión en esos años específicos, sugiriendo condiciones ambientales o eventos extremos que afectaron la consistencia de los datos.

El coeficiente de variación, expresado en porcentaje, reveló la proporción de la desviación estándar con respecto al promedio. En general, se observaron coeficientes de variación elevados, especialmente en 2016 y 2021 para Ozogoche, indicando una considerable variabilidad relativa en esas temporadas. Esto sugiere que estos años fueron particularmente susceptibles a cambios abruptos en las tasas de erosión.

Al focalizarse en los años 2018 y 2020, los únicos en los que se tienen valores para las tres microcuencas, se pudo constatar que Atillo presentó el promedio más bajo de erosión en ambos años, con valores de 1.89 y 1.61, respectivamente. Por otro lado, Yasepan exhibió los promedios más altos, con valores de 2.05 en 2018 y 1.93 en 2020. Ozogoche se ubicó en una posición intermedia, con valores de 1.61 y 1.36 para los años respectivos.

En consecuencia, la erosión hídrica real en Atillo presentó las tasas más bajas, mientras que en Yasepan experimentó las más altas en los años analizados. En Ozogoche se situó en un punto intermedio. Estos resultados sugieren una variabilidad significativa en la erosión hídrica real entre las microcuencas, resaltando la importancia de comprender la variabilidad temporal en la dinámica erosiva de estas regiones.

4.7.1 Comparación de la erosión hídrica real con el comportamiento bioclimático

El análisis comparativo entre los resultados de erosión hídrica real y el comportamiento bioclimático en las microcuencas de Ozogoche, Atillo y Yasepan proporciona una perspectiva integral para evaluar las tendencias y determinar la influencia de factores ambientales en la erosión hídrica.

En términos de erosión hídrica real, se observó una variabilidad significativa a lo largo de los años, destacando los años 2016 y 2021 como críticos con tasas más altas, especialmente en la microcuenca de Ozogoche. La tendencia al aumento en las tasas de erosión en los años más

recientes fue evidente, con 2021 presentando los valores más altos para las tres microcuencas. Contrastando con estos hallazgos, el análisis bioclimático reveló diferencias notables entre las microcuencas. Atillo y Yasepan mostraron una tendencia a la disminución en Biotemperatura, mientras que Ozogoche presentó inicialmente valores más bajos y fluctuaciones. En cuanto a la Precipitación acumulada, Atillo exhibió fluctuaciones anuales, mientras que Yasepan y Ozogoche mantuvieron una tendencia más estable. La Evapotranspiración disminuyó en todas las microcuencas, siendo menos pronunciada en Yasepan.

La aplicación del Sistema de Holdridge destacó diferencias en las clasificaciones de humedad y altitud. Atillo y Yasepan se categorizaron como "semisaturación," mientras que Ozogoche fue clasificada como "superhúmedo." Estas diferencias tienen implicaciones para la disponibilidad de agua y la vulnerabilidad a la erosión.

En términos de comparación, los resultados de erosión hídrica real respaldan la clasificación de Ozogoche como "superhúmedo," ya que este presentó tasas más altas de erosión. Sin embargo, Atillo y Yasepan, clasificadas como "semisaturación," exhibieron tasas de erosión más bajas. Esta discrepancia sugiere que la mayor disponibilidad de agua en Ozogoche podría contribuir a tasas de erosión más elevadas.

Al centrarse en los años 2018 y 2020, donde se tienen datos para las tres microcuencas, se confirma que Atillo exhibió las tasas más bajas de erosión, respaldando la clasificación bioclimática. Yasepan, con tasas de erosión más altas, presenta una tendencia coherente con su clasificación como "semisaturación." Ozogoche, aunque clasificada como "superhúmedo," muestra tasas intermedias de erosión.

La comparación entre la erosión hídrica real y el comportamiento bioclimático respalda la idea de que las condiciones climáticas, especialmente la disponibilidad de agua, influyen en las tasas de erosión. Atillo, con características "semisaturadas," presenta tasas más bajas, mientras que Yasepan y Ozogoche, con condiciones más húmedas, muestran tasas más altas de erosión, especialmente evidentes en los años 2018 y 2020

4.8 Comparación de los resultados de las tasas de erosión potencial con las tasas erosión hídrica real

Al examinar los datos de la tabla que presenta la media de los raster de erosión potencial y erosión hídrica para las microcuencas de Ozogoché, Atillo y Yasepan, se observan variaciones temporales que reflejan las fluctuaciones en la erosión potencial en comparación con la erosión hídrica real.

Tabla 4-38: Comparación de la media multianual de la erosión potencial con la erosión hídrica real

	Osogoché		Atillo		Yasepan	
2016	-	-	1,99	48,99	-	-
2017	-	-	-	-	-	-
2018	1,61	40,11	1,89	43,93	2,05	52,95
2019	1,57	41,36	-	-	2,13	54,26
2020	1,36	35,89	1,61	39,42	1,93	48,68
2021	2,07	48,27	2,43	53,53	-	-

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

La comparación revela que las tasas de erosión hídrica real son significativamente inferiores a las tasas de erosión potencial en los dos años analizados. Esto respalda la idea de que la vegetación de páramo en las microcuencas ha logrado reducir efectivamente la erosión, contrarrestando las condiciones propicias para la erosión potencial basadas en la geomorfometría. La limitación de datos para 2018 y 2020 en las tres microcuencas destaca la necesidad de un monitoreo continuo y la consideración de las limitaciones temporales para obtener una comprensión completa de la dinámica erosiva en estas áreas.

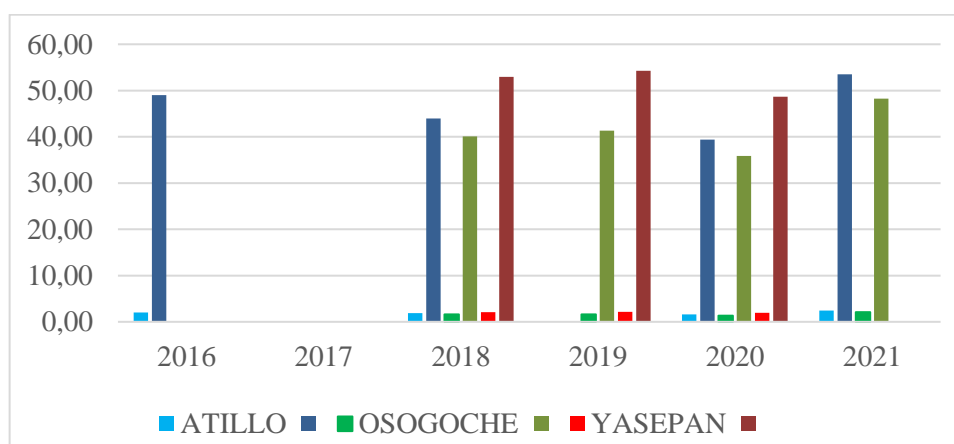


Ilustración 4-31: Histograma de la erosión hídrica real media multianual en las microcuencas de estudio

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

El histograma ofrece una representación visual de las discrepancias entre las tasas de erosión potencial y erosión hídrica real en las microcuencas de Ozogoche, Atillo y Yasepan. Al correlacionar los niveles del histograma con los estándares de erosión tolerable, delineados en la Tabla 2, se destaca una interesante dinámica.

En el caso de Ozogoche, sus tasas tanto de erosión potencial como hídrica real, registradas en los años 2018 y 2020, se sitúan en el nivel "Muy Bajo" de erosión tolerable. Este resultado sugiere que la presencia de una extensa cobertura de vegetación de páramo en Ozogoche ha demostrado ser altamente eficaz en la mitigación de procesos erosivos. En contraste, Atillo y Yasepan, especialmente en el año 2018, revelan tasas que se encuentran en niveles superiores, indicando una mayor susceptibilidad a la erosión.

Analizando por separado la erosión potencial y la erosión hídrica real, se observa que Atillo y Yasepan tienden a exhibir tasas más elevadas en ambos casos, sugiriendo una mayor predisposición a la erosión. Esta inclinación es especialmente pronunciada en el año 2018. La vegetación de páramo, presente de manera prominente en estas microcuencas, juega un papel clave en este escenario. Su efecto en la reducción de la erosión potencial es evidente, pero la discrepancia entre las tasas potenciales y reales resalta su contribución adicional en la mitigación de la erosión efectiva.

Las diferencias entre las tasas de erosión potencial y real reflejan la capacidad de la vegetación de páramo para contrarrestar las condiciones propicias para la erosión basadas en la geomorfología. La vegetación de páramo actúa como una barrera natural, reduciendo significativamente las tasas de erosión y resaltando la importancia de la conservación de este ecosistema en la preservación de la integridad de las microcuencas. La limitación temporal de los datos, especialmente en los años 2018 y 2020, subraya la necesidad de un seguimiento continuo para obtener una comprensión más completa de la dinámica erosiva en estas áreas.

Tabla 4-39: Porcentaje de disminución de pérdida de suelo de la erosión real con respecto a la erosión potencial

	Ozogoche	Atillo	Yasepan
2016	-	95,94 %	-
2017	-	-	-
2018	95,99 %	95,70 %	96,12
2019	96,21 %	-	96,08
2020	96,22 %	95,91 %	96,04
2021	95,71 %	95,47 %	-

Realizado por: Imbaquingo, C., 2023

Es relevante subrayar que el análisis del porcentaje de disminución de la pérdida de erosión potencial en comparación con la erosión hídrica real refleja la eficacia de la vegetación, evaluada a través del factor C, en mitigar la pérdida de suelo en las microcuencas de Ozogoche, Atillo y Yasepan.

Los datos de la tabla indican que la presencia de vegetación contribuye a una disminución sustancial, aproximadamente del 95 al 96%, en la pérdida del suelo. Este hallazgo sugiere que la vegetación actúa como un factor protector clave, influyendo significativamente en las tasas de erosión. En zonas altoandinas con características específicas, como pasturas, herbazales de páramo y bosques siempre verdes de páramo, se observa la capacidad de estos ecosistemas para reducir la erosión hídrica. Este papel destacado de la vegetación enfatiza la importancia de considerar estrategias de conservación y manejo sostenible para preservar estos elementos naturales, fundamentales para la estabilidad del suelo en contextos de alta montaña.

La presencia de vegetación de páramo, como se evidencia en la clasificación de cobertura del suelo, ha influido en la disminución de la erosión potencial en comparación con la erosión hídrica real. Aunque se observan tasas de erosión potencial relativamente altas, la vegetación de páramo ha actuado como un factor mitigante, especialmente en Atillo, donde a pesar de su forma compacta y pronunciada topografía, la erosión potencial no se traduce completamente en erosión hídrica real, indicando una cierta capacidad de retención del suelo.

CAPÍTULO V

5. MARCO PROPOSITIVO

Propuesta de plan integral de conservación y restauración de ecosistemas de páramo para mitigar la erosión del suelo y promover la sostenibilidad ambiental en microcuencas altoandinas de Atillo, Ozogoché y Yasepan.

5.1 Presentación del estudio y socialización de la comunidad

5.1.1 *Obtención de permisos y autorizaciones para acceso a la comunidad*

- **Coordinación con autoridades:** El personal técnico del proyecto se pondrá en contacto con las autoridades gubernamentales locales y regionales pertinentes para obtener todos los permisos y autorizaciones requeridos. Esto incluye permisos de acceso a áreas protegidas, permisos de investigación, y cualquier otro documento legal necesario.
- **Registro documental:** Se llevará un registro minucioso de todos los permisos y autorizaciones obtenidos. Este registro incluirá detalles como fechas de emisión, vigencia y cualquier condición específica impuesta por las autoridades.

5.1.2 *Contacto inicial con la comunidad para la explicación de la importancia del estudio*

- **Reuniones iniciales:** El equipo de trabajo organizará reuniones iniciales con líderes comunitarios y representantes locales. Estas reuniones servirán como un primer acercamiento para establecer relaciones de confianza y explicar brevemente el propósito del estudio.
- **Identificación de actores clave:** Durante estas reuniones iniciales, se identificarán actores clave en la comunidad, como líderes comunitarios, educadores y personas influyentes, que puedan desempeñar un papel importante en la comunicación y colaboración futuras.

5.1.3 *Presentación de los resultados determinados y los beneficios para la comunidad*

- **Talleres informativos:** Se llevarán a cabo talleres informativos con la comunidad en los que se presentarán los objetivos específicos del estudio del modelo RUSLE. Se explicará cómo los resultados del estudio pueden beneficiar a la comunidad en términos de conservación del suelo, calidad del agua y bienestar general.

- **Material didáctico:** Se proporcionará material didáctico en forma de presentaciones visuales, folletos y gráficos que simplifiquen la comprensión de los conceptos técnicos involucrados en el modelo RUSLE.

5.1.4 Exposición de la pertinente validación del modelo RUSLE en campo y su significancia

- **Charlas técnicas:** Se llevarán a cabo charlas técnicas que expliquen de manera detallada cómo se realizará la validación del modelo RUSLE en campo. Se destacará la importancia de esta validación para garantizar resultados confiables y precisos.
- **Ejemplos prácticos:** Se proporcionarán ejemplos prácticos y casos de estudio relacionados con la validación del modelo RUSLE en otras regiones, destacando cómo esta validación ha conducido a la implementación exitosa de medidas de conservación.

5.1.5 Socialización sobre la relevancia del monitoreo de campo a corto y largo plazo

- **Talleres de monitoreo:** Se realizarán talleres de monitoreo para explicar a la comunidad la importancia de evaluar constantemente los cambios en el terreno y en los sistemas hídricos a lo largo del tiempo.
- **Demostración de equipamiento:** Se mostrarán los equipos de monitoreo que se utilizarán, como estaciones meteorológicas, medidores de caudal, y sistemas de teledetección, para que la comunidad comprenda cómo se obtendrán los datos.

5.1.6 Establecimiento de un diálogo continuo y participación de la comunidad en el monitoreo

- **Creación de comités:** Se fomentará la creación de comités o grupos de trabajo que incluyan a miembros de la comunidad. Estos comités serán espacios de participación activa y colaboración en la toma de decisiones.
- **Canales de comunicación:** Se establecerán canales de comunicación regulares, como reuniones periódicas y grupos de chat, para mantener un diálogo constante con la comunidad. La comunicación será bidireccional para recibir retroalimentación y resolver inquietudes.

5.1.7 Concientización del impacto de la erosión hídrica en las microcuencas

- **Charlas educativas continuas:** Se organizarán charlas educativas regulares que profundicen en los efectos perjudiciales de la erosión hídrica en las microcuencas. Se

explicará cómo la erosión afecta la calidad del agua, la pérdida de suelo fértil y la biodiversidad local.

- **Uso de datos y ejemplos locales:** Se utilizarán datos y ejemplos locales para ilustrar cómo la erosión hídrica ha impactado directamente en la comunidad y su entorno, lo que aumentará la conciencia sobre la relevancia del estudio.

5.1.8 Identificación de zonas erosionadas con impacto en los sistemas hídricos de la cuenca

- **Levantamiento topográfico:** Se realizará un levantamiento topográfico de las áreas de estudio con mayor susceptibilidad a ser erosionadas con base en los datos obtenidos del análisis geoespacial determinado para identificar las zonas más vulnerables a la erosión hídrica.
- **Mapeo de riesgos:** Utilizando tecnologías SIG y sistemas de información geoespacial, se crearán mapas de riesgos que indiquen las áreas críticas en términos de erosión estimadas en este estudio y posibles efectos en los sistemas hídricos de la cuenca.

5.1.9 Evaluación de posibles riesgos hidromorfológicos y geomorfológicos en la comunidad

- **Estudio geomorfológico:** Con base en los resultados geomorfológicos, se evaluará los riesgos relacionados con la morfología del terreno en la comunidad. Esto incluirá el análisis de la pendiente, la erosión del suelo y la identificación de áreas propensas a deslizamientos.
- **Análisis hidromorfológico:** Con base en los resultados hidromorfológico se determinarán los procesos hidrológicos que interactúan con la morfología del terreno. Esto ayudará a identificar posibles inundaciones, cambios en los cursos de agua, erosión fluvial y otros riesgos relacionados con el cauce principal o los tributarios.

5.1.10 Análisis del impacto de la erosión en los ecosistemas locales y sus consecuencias para la comunidad

- **Estudio de impacto ambiental:** Se llevará a cabo un estudio exhaustivo de impacto ambiental para evaluar cómo la erosión hídrica ha afectado a los ecosistemas locales en las microcuencas y el porcentaje de degradación del suelo en estos ecosistemas, incluyendo la pérdida de biodiversidad, y posibles impactos en la calidad del agua.
- **Evaluación de consecuencias socioeconómicas:** Se analizarán las consecuencias socioeconómicas de la erosión en la comunidad, incluyendo la pérdida de medios de vida, la disminución de la productividad agrícola y otros impactos en el bienestar de la población.

5.2 Validación y Calibración del Modelo RUSLE

5.2.1 Preparación del equipo técnico para la validación del modelo

- **Selección del equipo técnico:** Se trabajará de conjuntamente con expertos en geología, hidrología, y erosión hídrica. Estos profesionales desempeñarán un papel crucial en la validación y calibración del modelo RUSLE, comparando los datos del modelo estimados por teledetección y los resultados en campo, ya que su experiencia permitirá abordar los desafíos específicos de la cuenca.
- **Competencias:** El personal técnico seleccionado tendrá competencia en una variedad de áreas relevantes para la validación del modelo. Esto incluirá el uso de equipos de campo, software de geoprocésamiento y técnicas de medición de erosión. La capacitación garantizará que todos los involucrados tengan las habilidades necesarias para llevar a cabo las actividades de validación de manera efectiva.

5.2.2 Evaluación de las condiciones de campo para la validación empírica

- **Selección de sitios de validación:** La elección de los sitios de validación es un paso crítico. Se llevará a cabo un análisis geoespacial exhaustivo de la cuenca para identificar lugares que sean representativos de las diferentes condiciones de erosión y factores ambientales presentes. Con base a la erosión potencial y la erosión hídrica determinadas en este estudio. Seguidamente se irá al campo con las coordenadas de la zona identificada, a comprobar los lugares que previamente fueron estimados por un análisis geoespacial. Esto garantizará que los resultados de la validación sean aplicables a toda la cuenca.
- **Caracterización del terreno:** En esta fase, se realizará una caracterización detallada del terreno en los sitios de validación. Esto incluirá el mapeo topográfico preciso, la determinación de la composición del suelo, la evaluación de la vegetación y la identificación de la red de drenaje. Estos datos son esenciales para comprender las condiciones locales que influyen en la erosión hídrica.

5.2.3 Recopilación de datos de campo para la validación del modelo

- **Mediciones de erosión:** Se llevarán a cabo mediciones directas de la erosión en los sitios de validación. Esto implicará la instalación de trampas de sedimentos para recopilar datos sobre la cantidad de suelo erosionado. Además, se medirá la escorrentía superficial y se registrarán otros parámetros relevantes.

- **Datos climáticos:** La recopilación de datos climáticos será fundamental. Se instalarán estaciones meteorológicas portátiles en lugares estratégicos de la cuenca para registrar información precisa sobre la precipitación, la temperatura y otros factores climáticos que influyen en la erosión hídrica.

5.2.4 Comparación de datos de campo con resultados del Modelo RUSLE

- **Procesamiento de datos:** Todos los datos de campo recopilados se procesarán meticulosamente. Se calculará la erosión real observada en los sitios de validación y se comparará con los resultados proporcionados por el Modelo RUSLE. Esta comparación revelará cualquier discrepancia entre los datos medidos y los pronosticados por el modelo.
- **Análisis de desviaciones:** Si se encuentran diferencias significativas entre los datos de campo y los resultados del modelo, se llevará a cabo un análisis detallado para identificar las causas de estas desviaciones. Esto puede incluir la revisión de parámetros del modelo, como la cobertura vegetal, la pendiente del terreno o la erosión real.

5.2.5 Análisis estadístico de la precisión y exactitud del modelo RUSLE

- **Estadísticas de error:** Para evaluar la precisión y exactitud del Modelo RUSLE, se calcularán diversas estadísticas de error, como el error absoluto medio y la raíz cuadrada del error cuadrático medio. Estas métricas proporcionarán una medida cuantitativa de cuán cerca están los resultados del modelo de los datos de campo reales.

5.2.6 Ajuste de parámetros del modelo RUSLE según resultados de la validación

- **Análisis de parámetros:** Con los datos de validación en mano, se procederá a un minucioso análisis de los parámetros utilizados en el Modelo RUSLE. Estos parámetros pueden incluir la erosividad de la lluvia (R), la erodibilidad del suelo (K), la longitud y la pendiente (LS), y la cobertura vegetal (C). El ajuste de estos parámetros es crucial para mejorar la precisión del modelo en la predicción de la erosión hídrica en la cuenca.
- **Iteración y optimización:** A través de iteraciones cuidadosamente planificadas, se realizarán ajustes en los valores de los parámetros para minimizar las discrepancias entre los resultados del modelo y los datos de validación. Este proceso de optimización se basará en técnicas estadísticas y de modelado para encontrar la combinación óptima de parámetros que se ajuste mejor a las condiciones locales.

5.2.7 Calibración de factores R, K y C del modelo RUSLE

- **Calibración detallada:** Los factores R, K y C, que representan la erosividad de la lluvia, la erodibilidad del suelo y la cobertura vegetal, respectivamente, se someterán a una calibración detallada. Esto implica ajustar estos factores a los datos de validación específicos de la cuenca, lo que permitirá un modelado más preciso de la erosión hídrica.
- **Métodos de calibración:** Se emplearán técnicas de calibración que pueden incluir análisis de regresión, métodos de optimización y algoritmos avanzados para encontrar los valores óptimos de los factores R, K y C que se ajusten mejor a las características de la cuenca.

5.2.8 Monitoreo de cambios temporales de erosión a corto plazo

- **Establecimiento de puntos de monitoreo:** Se implementarán puntos de monitoreo estratégicos en toda la cuenca para medir continuamente la erosión a corto plazo. Esto incluirá la instalación de estaciones de monitoreo y la recopilación regular de datos sobre la erosión actual.
- **Análisis de tendencias:** Los datos recopilados se utilizarán para analizar las tendencias temporales en la erosión hídrica. Esto permitirá identificar áreas críticas que experimentan cambios significativos en un corto período y adaptar las estrategias de conservación en consecuencia.

5.2.9 Evaluación de tendencias de erosión a largo plazo

- **Análisis de datos históricos:** Además de monitorear la erosión a corto plazo, se realizará un análisis exhaustivo de datos históricos, obtenidos en el análisis bioclimático de este estudio. Esto permitirá evaluar las tendencias a largo plazo en la erosión hídrica en la cuenca.
- **Modelado prospectivo:** Se utilizarán técnicas de modelado prospectivo con base en los datos obtenidos en este estudio de la erosión para proyectar las tendencias de erosión a largo plazo bajo diferentes escenarios de conservación y desarrollo. Esto ayudará a planificar medidas a largo plazo para mitigar la erosión y sus efectos.

5.2.10 Evaluación de la utilidad del modelo RUSLE para pronosticar la erosión

- **Validación continua:** La utilidad del Modelo RUSLE en la predicción de la erosión se evaluará de manera continua a medida que se recopilen más datos de campo. Se compararán

los resultados pronosticados por el modelo con las mediciones reales de erosión, y se ajustarán los parámetros si es necesario.

- **Comunicación de resultados:** Los resultados de esta evaluación se comunicarán a todas las partes interesadas, incluido el equipo técnico, la comunidad y las autoridades responsables de la gestión de la cuenca. Esto garantizará que el modelo se utilice de manera efectiva en la toma de decisiones relacionadas con la conservación y la gestión de la erosión hídrica en la cuenca.

5.3 Diseño personalizado de terrazas de escorrentía

5.3.1 *Socialización de los beneficios y resultados a la comunidad*

- **Sesiones informativas:** Se organizarán reuniones informativas con representantes de la comunidad para explicar los beneficios de las terrazas de escorrentía. Se destacará cómo estas estructuras pueden reducir la erosión, preservar los recursos hídricos y mejorar la calidad del suelo.
- **Participación activa:** Se fomentará la participación activa de la comunidad en la identificación de las áreas más críticas que requieren medidas de control de la erosión. Los miembros de la comunidad serán invitados a compartir su conocimiento local sobre la topografía y los patrones de escorrentía.
- **Educación ambiental:** Se llevarán a cabo talleres de educación ambiental para sensibilizar a la comunidad sobre la importancia de la conservación y el manejo sostenible de los recursos naturales.

5.3.2 *Selección estratégica de sitios y estudios topográficos*

- **Análisis de topografía:** Se analizarán los datos topográficos estimados en las geomorfometrias de cada microcuenca hidrográfica y con base en estos resultados se identificarán las zonas más representativas para el levantamiento en campo. Estos datos se utilizarán para identificar áreas propicias para la implementación de terrazas de escorrentía, teniendo en cuenta la pendiente, la altimetría y la dirección del flujo de agua.
- **Identificación de zonas críticas:** Se priorizarán las áreas con alta erosión y riesgo hidromorfológico medidos a través de los estadísticos descriptivos del anterior capítulo. Estas áreas críticas serán identificadas en colaboración con la comunidad y los resultados de los estudios topográficos.

- **Mapeo de cauces:** Se mapearán los cauces naturales y las rutas de escorrentía, lo que permitirá diseñar terrazas de manera estratégica para interceptar y desviar la escorrentía superficial.

5.3.3 Diseño preciso de terrazas de escorrentía adaptadas a la geomorfología e hidromorfología

- **Diseño personalizado:** Se desarrollarán diseños específicos para cada ubicación de terraza de escorrentía, teniendo en cuenta la geomorfología local, la hidromorfología y los datos topográficos recopilados. Estos diseños se centrarán en la construcción de terrazas de bajo costo y bajo impacto ambiental.
- **Diversidad de estructuras:** Se considerarán diversas estructuras de terrazas de escorrentía, como terrazas de microcuencas, zanjas de infiltración y trincheras de sedimentación, según lo apropiado para cada sitio.
- **Aprovechamiento de materiales locales:** Se promoverá el uso de materiales locales y recursos disponibles en la comunidad para la construcción de las terrazas, reduciendo así los costos y minimizando la necesidad de transporte.

5.3.4 Evaluación de impacto ambiental y planificación en zonas críticas

- **Evaluación ambiental preliminar:** Antes de la construcción, se realizarán evaluaciones ambientales preliminares en las áreas seleccionadas para identificar posibles impactos negativos y desarrollar estrategias de mitigación.
- **Planificación minuciosa:** La planificación se centrará en evitar áreas sensibles, como humedales y hábitats críticos. Se implementarán medidas de manejo ambiental adecuadas para minimizar la alteración del ecosistema.
- **Monitoreo ambiental continuo:** Se establecerán protocolos de monitoreo ambiental continuo para evaluar el impacto de las terrazas de escorrentía en los ecosistemas locales y realizar ajustes si es necesario.

5.3.5 Optimización de diseños para reducir impactos ambientales

- **Diseños ecológicos:** Se optimizarán los diseños de las terrazas para minimizar cualquier impacto ambiental negativo. Esto puede incluir la incorporación de técnicas de revegetación y el uso de materiales permeables para reducir la escorrentía superficial.

- **Estudios de efectos:** Se realizarán estudios para evaluar cómo las terrazas afectan el escurrimiento, la infiltración y la calidad del agua, y se realizarán ajustes en consecuencia.
- **Revegetación y restauración:** Se implementarán programas de revegetación y restauración en las áreas cercanas a las terrazas para promover la biodiversidad y estabilizar el suelo.

5.3.6 Capacitación local en la construcción de terrazas de escorrentía

- **Formación técnica:** Se brindará capacitación técnica a miembros de la comunidad en la construcción y mantenimiento de terrazas de escorrentía. Esto incluirá técnicas de construcción, seguridad y manejo de herramientas.
- **Transferencia de conocimientos:** Se promoverá la transferencia de conocimientos y habilidades entre técnicos y la comunidad local. Los técnicos servirán como instructores para asegurar que la construcción de terrazas sea llevada a cabo de manera efectiva.
- **Certificación local:** Se emitirá una certificación local a aquellos miembros de la comunidad que completen con éxito la capacitación, lo que les permitirá participar activamente en la construcción y el mantenimiento.

5.3.7 Integración de materiales de construcción locales en los diseños

- **Uso de materiales disponibles:** Se fomentará el uso de materiales de construcción locales, como piedra, madera o tierra compactada, para las terrazas de escorrentía. Esto reducirá los costos y promoverá la sostenibilidad.
- **Análisis de disponibilidad:** Se llevará a cabo un análisis de la disponibilidad de materiales locales y se planificará su extracción y uso de manera sostenible, evitando la sobreexplotación de recursos naturales.
- **Selección de materiales apropiados:** Los materiales locales se seleccionarán cuidadosamente de acuerdo con las necesidades de cada sitio de terraza, considerando la durabilidad y la resistencia a la erosión.

5.3.8 Implementación de tecnologías de monitoreo para evaluar la efectividad

- **Sensores y medidores:** Se instalarán sensores y medidores para monitorear continuamente el flujo de agua, la calidad del suelo y otros parámetros relevantes en y alrededor de las terrazas de escorrentía.

- **Transmisión de datos:** Se implementará un sistema de transmisión de datos en tiempo real para recopilar información relevante y proporcionar retroalimentación en tiempo real sobre la efectividad de las terrazas.
- **Análisis de datos:** Los datos recopilados se analizarán periódicamente para evaluar la eficacia de las terrazas y realizar ajustes si es necesario.

5.3.9 Evaluación continua y ajustes en el diseño según resultados en campo

- **Monitoreo periódico:** Se realizarán evaluaciones periódicas de la efectividad de las terrazas de escorrentía mediante inspecciones en campo y análisis de datos.
- **Ajustes en el diseño:** Si los resultados del monitoreo indican la necesidad de ajustes en el diseño, se realizarán modificaciones para optimizar la eficacia de las terrazas.
- **Registro de cambios:** Se llevará un registro detallado de cualquier cambio realizado en el diseño y de los resultados obtenidos después de las modificaciones.

5.3.10 Monitoreo y mantenimiento de las terrazas de escorrentía

- **Programa de mantenimiento:** Se establecerá un programa de mantenimiento regular para asegurar que las terrazas de escorrentía funcionen de manera efectiva a lo largo del tiempo.
- **Inspecciones periódicas:** Se llevarán a cabo inspecciones periódicas para identificar desgaste, daños o acumulación de sedimentos que puedan afectar la funcionalidad de las terrazas.
- **Reparaciones y mantenimiento preventivo:** En caso de detectar problemas, se realizarán reparaciones oportunas y se aplicarán prácticas de mantenimiento preventivo para extender la vida útil de las terrazas.

5.4 Prácticas agrícolas sostenibles y ganadería responsable

5.4.1 Socialización integral de prácticas sostenibles a la comunidad

- **Talleres informativos:** Se llevarán a cabo talleres informativos en la comunidad para explicar detalladamente las prácticas agrícolas y ganaderas sostenibles. Se destacará la importancia de estas prácticas en la preservación de los recursos naturales locales.
- **Material educativo:** Se proporcionará material educativo impreso y visual que ilustre las prácticas sostenibles, sus beneficios y cómo aplicarlas en sus actividades diarias.

- **Difusión continua:** Se establecerá un programa de difusión continua a través de reuniones periódicas, redes sociales locales y estaciones de radio comunitarias para mantener a la comunidad informada y comprometida.

5.4.2 Planificación de rotación de cultivos y pastoreo para el desarrollo sostenible

- **Análisis de suelo:** Se realizarán análisis de suelo para determinar la idoneidad de los cultivos en cada parcela y definir estrategias de rotación que mejoren la fertilidad y reduzcan la erosión.
- **Asesoramiento técnico:** Se brindará asesoramiento técnico a los agricultores y ganaderos para desarrollar planes de rotación de cultivos y pastoreo adaptados a las condiciones locales.
- **Promoción de cultivos complementarios:** Se fomentará el cultivo de plantas complementarias que puedan mejorar la calidad del suelo y reducir la necesidad de fertilizantes químicos.

5.4.3 Aplicación de técnicas de conservación del suelo

- **Prácticas de labranza mínima:** Se promoverán técnicas de labranza mínima o siembra directa para reducir la erosión del suelo y la pérdida de nutrientes.
- **Cobertura vegetal:** Se impulsará el mantenimiento de una cobertura vegetal permanente en áreas agrícolas para proteger el suelo de la erosión hídrica y eólica.
- **Uso de Barreras:** Se aprovecharán las barreras de las terrazas para desacelerar el flujo de agua y retener sedimentos en zonas de cultivo.

5.4.4 Zonificación de pastoreo en zonas que no generen alteración hacia las especies endémicas

- **Mapeo de zonas sensibles:** Se realizará un mapeo detallado de las áreas con especies endémicas y vulnerables. Se delimitarán zonas de pastoreo y se restringirá el acceso a las áreas críticas.
- **Rotación controlada:** Se establecerán prácticas de rotación de pastoreo controlado para evitar la sobreexplotación de pastizales y minimizar la alteración de hábitats naturales.
- **Monitoreo de especies:** Se implementará un programa de monitoreo de especies endémicas para evaluar la efectividad de las medidas de zonificación y realizar ajustes si es necesario.

5.4.5 *Diversificación de cultivos resistentes al clima en función de la altura*

- **Selección de cultivos:** Se seleccionarán variedades de cultivos resistentes al clima local y a la altitud específica de cada parcela.
- **Planificación estratégica:** Se desarrollará una estrategia de diversificación de cultivos que permita una producción continua y estable a lo largo del año, reduciendo la dependencia de un solo cultivo.
- **Capacitación en técnicas de cultivo:** Se capacitará a los agricultores en técnicas de cultivo adecuadas para cada variedad, incluyendo prácticas de manejo postcosecha.

5.4.6 *Uso eficiente de recursos hídricos en la agricultura y la ganadería*

- **Sistemas de Riego Eficiente:** Se promoverá la adopción de sistemas de riego eficiente, como el riego por goteo o la recogida de agua de lluvia, para maximizar el uso del recurso hídrico disponible.
- **Manejo sostenible de cuencas:** Se implementarán medidas de manejo de cuencas para conservar fuentes de agua y proteger los ecosistemas acuáticos locales.

5.4.7 *Implementación de agricultura de conservación que minimiza la perturbación del suelo*

- **Cobertura permanente:** Se promoverá el uso de cobertura vegetal permanente en áreas agrícolas para reducir la erosión y mejorar la calidad del suelo.
- **Siembra directa:** Se fomentará la siembra directa como una técnica que evita la labranza excesiva del suelo, conservando su estructura y contenido de humedad.
- **Rotación de cultivos:** Se incentivará la rotación de cultivos como parte de la agricultura de conservación para prevenir agotamiento del suelo y aumentar su fertilidad.

5.4.8 *Monitoreo de prácticas agrícolas y ganaderas estableciendo sistemas de seguimiento y evaluación*

- **Sistema de registro:** Se establecerá un sistema de registro de prácticas agrícolas y ganaderas, que permita un seguimiento preciso de las actividades realizadas.
- **Evaluación continua:** Se llevará a cabo una evaluación continua de los datos recopilados para identificar tendencias y áreas que requieran mejoras.

- **Ajustes oportunos:** Con base en los resultados del monitoreo, se realizarán ajustes en las prácticas y estrategias para optimizar los resultados y minimizar impactos negativos.

5.4.9 Evaluación de impacto socioeconómico que implica un enfoque sostenible y responsable

- **Análisis socioeconómico:** Se realizará un análisis exhaustivo de los impactos económicos y sociales de las prácticas sostenibles, considerando beneficios a corto y largo plazo.
- **Participación comunitaria:** Se involucrará a la comunidad en la evaluación de impacto para recopilar opiniones y observaciones locales.
- **Medición de indicadores:** Se definirán indicadores específicos para medir el progreso socioeconómico y se realizarán comparaciones con datos anteriores a la implementación de las prácticas sostenibles.

5.4.10 Educación continua a la comunidad sobre la aplicación de prácticas sostenibles

- **Capacitación periódica:** Se organizarán talleres y sesiones de capacitación periódica para mantener a la comunidad actualizada sobre las prácticas sostenibles.
- **Uso de ejemplos locales:** Se utilizarán ejemplos locales y casos de éxito en la implementación de prácticas sostenibles para ilustrar sus beneficios.
- **Fomento de redes de apoyo:** Se promoverá la formación de grupos de apoyo locales donde los miembros puedan compartir experiencias y conocimientos sobre prácticas sostenibles.

5.5 Restauración ecológica y conservación

5.5.1 Evaluación de sitios prioritarios para la restauración considerando la fragmentación ecosistémica y la erosión hídrica

- **Análisis de fragmentación ecosistémica:** Se llevará a cabo un estudio detallado de la fragmentación de los ecosistemas en la zona de estudio, identificando las áreas más afectadas por actividades humanas y procesos naturales, como la erosión hídrica.
- **Mapeo de erosión hídrica:** Utilizando información previa de la erosión hídrica obtenida mediante el modelo RUSLE, se identificarán las zonas con mayor vulnerabilidad y pérdida de suelo, lo que permitirá priorizar áreas para la restauración.

- **Selección de sitios estratégicos:** Basados en los resultados del análisis, se seleccionarán sitios prioritarios para la restauración que tengan un alto grado de fragmentación y erosión, maximizando el impacto de las acciones de conservación.

5.5.2 Selección de métodos y estrategias de restauración adecuados para los sitios identificados

- **Estudio de métodos de restauración:** Se llevará a cabo una revisión exhaustiva de métodos y estrategias de restauración adecuados para la alta montaña y el páramo, considerando las condiciones climáticas extremas y la baja densidad poblacional.
- **Adaptación de prácticas:** Se adaptarán las prácticas de restauración a las características específicas de cada sitio seleccionado, teniendo en cuenta la topografía, hidromorfología y erosión hídrica identificada en cada caso.
- **Selección de especies nativas:** Se priorizará la utilización de especies vegetales nativas de la región que sean resistentes a las condiciones de alta montaña y que contribuyan a la restauración de los ecosistemas.

5.5.3 Implementación de prácticas de restauración ecológica en áreas fragilizadas

- **Preparación del terreno:** Se realizará una preparación adecuada del terreno para la siembra de especies nativas, incluyendo la remoción de especies invasoras y la restauración de la estructura del suelo.
- **Siembra y plantación:** Se llevará a cabo la siembra y plantación de especies nativas en los sitios seleccionados, asegurando la correcta distribución y densidad de las plantas.
- **Control de erosión:** Se implementarán prácticas específicas para controlar la erosión hídrica en áreas fragilizadas, como la construcción de barreras de retención y sistemas de canalización de aguas superficiales.

5.5.4 Monitoreo continuo de resultados de restauración y evaluación del impacto ambiental en ecosistemas fragmentados

- **Establecimiento de puntos de monitoreo:** Se establecerán puntos de monitoreo en las áreas restauradas para evaluar parámetros como la cobertura vegetal, la calidad del suelo y el flujo de agua.

- **Frecuencia de monitoreo:** Se llevarán a cabo monitoreos periódicos a lo largo del tiempo para evaluar el progreso de la restauración y detectar posibles problemas o necesidades de ajuste.
- **Evaluación del impacto ambiental:** Se evaluará el impacto ambiental de las acciones de restauración en términos de conservación de la biodiversidad, mejora de la calidad del agua y mitigación de la erosión hídrica.

5.5.5 Fomento de la biodiversidad y restauración de hábitats nativos en áreas fragmentadas

- **Reintroducción de especies vegetales:** Donde sea necesario y apropiado, se llevará a cabo la reintroducción de especies vegetales nativas que hayan desaparecido o disminuido en la zona debido a la fragmentación. Se priorizarán aquellas especies clave para la biodiversidad local.
- **Creación de microhábitats:** Se diseñarán microhábitats que favorezcan la recuperación de la biodiversidad, como la instalación de refugios y áreas de nidificación para fauna silvestre.
- **Restauración de ecosistemas acuáticos:** En caso de existir cuerpos de agua afectados por la erosión, se implementarán medidas para la restauración de estos ecosistemas, como la reforestación de ribereñas y la creación de zonas de humedales.

5.5.6 Participación comunitaria en programas de restauración y conservación en áreas de alto impacto de erosión

- **Sensibilización y educación:** Se llevarán a cabo programas de sensibilización y educación ambiental dirigidos a la comunidad local, destacando la importancia de la restauración y conservación de los ecosistemas de páramo y altoandinos.
- **Participación activa:** Se fomentará la participación activa de la comunidad en las acciones de restauración, involucrando a los habitantes en la siembra y cuidado de especies nativas, así como en la vigilancia y mantenimiento de las áreas restauradas.
- **Promoción de prácticas sostenibles:** Se promoverán prácticas agrícolas y ganaderas sostenibles entre la comunidad, con énfasis en la reducción de impactos ambientales y la conservación de suelos y agua.

5.5.7 Utilización de técnicas de plantación y reforestación con especies nativas en zonas fragilizadas

- **Selección de especies apropiadas:** Se elegirán cuidadosamente las especies nativas más adecuadas para cada sitio, considerando la altitud, las condiciones climáticas extremas y la capacidad de estas especies para estabilizar el suelo.
- **Prácticas de plantación:** Se implementarán técnicas de plantación que maximicen la supervivencia y crecimiento de las plantas, como la preparación de hoyos de plantación adecuados y el riego inicial.
- **Mantenimiento:** Se establecerá un plan de mantenimiento que incluya riego, poda y control de plagas, especialmente durante los primeros años después de la plantación.

5.5.8 Restauración de corredores ecológicos para la conexión de hábitats y la mitigación de la erosión

- **Identificación de corredores:** Se identificarán corredores ecológicos clave que conecten hábitats fragmentados, facilitando el movimiento de especies y la restauración de la conectividad del paisaje.
- **Restauración de vegetación ribereña:** Se llevará a cabo la restauración de vegetación en áreas ribereñas y riberas de cuerpos de agua, reduciendo la erosión y mejorando la calidad del agua.
- **Control de Especies Invasoras:** Se implementarán estrategias de control de especies invasoras que puedan obstaculizar la restauración de corredores ecológicos.

5.5.9 Diseño de prácticas de restauración adaptadas a la topografía, la hidromorfología del terreno y la erosión hídrica identificada

- **Estudio Detallado:** Se realizará un estudio detallado de la topografía y la hidromorfología de cada sitio de restauración, identificando posibles desafíos y oportunidades para la implementación de prácticas adaptadas.
- **Planificación Precisa:** Se diseñarán prácticas de restauración específicas que tengan en cuenta la pendiente del terreno, la dirección del flujo de agua y las áreas críticas de erosión.
- **Reforzamiento de Zonas Vulnerables:** Donde sea necesario, se reforzarán áreas vulnerables con medidas como la construcción de terrazas de retención y la revegetación.

5.5.10 Monitoreo y evaluación periódica del progreso de la restauración y sus beneficios ecológicos

- **Plan de Monitoreo Continuo:** Se establecerá un plan de monitoreo a largo plazo que incluya mediciones regulares de la cobertura vegetal, la calidad del agua, la biodiversidad y la erosión hídrica en las áreas restauradas.
- **Evaluación de Resultados:** Se realizará una evaluación periódica para medir el éxito de las acciones de restauración y hacer ajustes según sea necesario para garantizar la efectividad continua.
- **Comunicación de Resultados:** Se compartirán los resultados del monitoreo con la comunidad y otras partes interesadas para garantizar la transparencia y la retroalimentación en el proceso de restauración.

5.6 Conclusiones y contribuciones a la conservación ambiental y políticas sostenibles

5.6.1 Resumen de resultados y conclusiones generales

- **Resumen de Resultados Científicos:** Se resumirán los principales resultados científicos y técnicos obtenidos a lo largo del estudio. Esto incluirá datos sobre la erosión hídrica, la fragmentación ecosistémica, la biodiversidad, la calidad del agua y otros indicadores clave.
- **Conclusiones y Hallazgos Relevantes:** Se presentarán las conclusiones generales derivadas de la investigación. Esto incluirá la identificación de las principales fuentes de erosión, las áreas prioritarias para la restauración, el impacto de las prácticas de conservación y los beneficios ambientales y socioeconómicos observados.
- **Relevancia para la Conservación:** Se destacará la importancia de estos resultados en el contexto de la conservación del ecosistema de páramo y se resaltarán los desafíos y oportunidades que se desprenden de ellos.

5.6.2 Evaluación de la influencia en políticas públicas para la conservación

- **Análisis de Impacto:** Se evaluará cómo los resultados y hallazgos del estudio pueden influir en la formulación de políticas públicas relacionadas con la conservación ambiental y la gestión de los ecosistemas altoandinos.
- **Recomendaciones para la Acción Gubernamental:** Se proporcionarán recomendaciones concretas sobre posibles medidas políticas que podrían promover la conservación de las

microcuencas altoandinas, como incentivos fiscales, regulaciones ambientales y programas de restauración financiados por el gobierno.

- **Colaboración Interinstitucional:** Se identificarán oportunidades para colaborar con otras organizaciones gubernamentales y no gubernamentales en la implementación de políticas y estrategias de conservación.

5.6.3 Mejoramiento continuo del modelo RUSLE y prácticas de conservación

- **Innovación en el Modelo RUSLE:** Se propondrán mejoras y actualizaciones al modelo RUSLE, incorporando nuevos datos y técnicas de monitoreo que aumenten su precisión y aplicabilidad en áreas de páramo.
- **Investigación en Prácticas de Conservación:** Se enfocará la investigación en la mejora de prácticas de conservación adaptadas a las condiciones de paramo, explorando nuevas técnicas y enfoques que sean económicamente viables y sostenibles en estas regiones remotas.
- **Transferencia de Conocimiento:** Se promoverá la transferencia de conocimientos y tecnologías a nivel local, capacitando a la comunidad en la implementación de prácticas de conservación efectivas.

5.6.4 Divulgación científica y educación ambiental para la comunidad

- **Comunicación de Resultados:** Se elaborará un plan de comunicación que incluya la difusión de los resultados y conclusiones del estudio a la comunidad local a través de medios accesibles y comprensibles.
- **Programas de Educación Ambiental:** Se diseñarán programas de educación ambiental dirigidos a la comunidad, destacando la importancia de conservar los ecosistemas altoandinos y brindando información sobre las prácticas sostenibles que pueden implementarse.
- **Promoción de la Participación Comunitaria:** Se alentará la participación activa de la comunidad en la conservación de su entorno, involucrándola en proyectos de restauración y monitoreo de recursos naturales.

5.6.5 Ventajas socioeconómicas derivadas de las prácticas de conservación

- **Generación de empleo local:** Se analizará cómo las prácticas de conservación pueden generar oportunidades de empleo para la comunidad local, ya sea a través de la restauración de ecosistemas o el desarrollo de actividades ecoamigables.
- **Mejora de la calidad de vida:** Se destacarán los beneficios socioeconómicos directos, como el acceso a agua de calidad, la protección contra desastres naturales y la seguridad alimentaria.
- **Fomento del turismo sostenible:** Se explorará el potencial del turismo sostenible en la región como fuente de ingresos, promoviendo la conservación y la valorización de los recursos naturales.

5.6.6 Ventajas ambientales resultantes de las prácticas de conservación:

- **Restauración de ecosistemas:** Se resaltarán cómo las prácticas de conservación contribuyen a la restauración de ecosistemas fragmentados, promoviendo la conectividad y la recuperación de la biodiversidad.
- **Reducción de la erosión:** Se subrayará la importancia de las prácticas de conservación en la reducción de la erosión hídrica y la mejora de la calidad del agua en la cuenca.
- **Mitigación del cambio climático:** Se explorarán los beneficios de la conservación en la mitigación del cambio climático, como la captura de carbono en los ecosistemas de páramo.

5.6.7 Consideraciones para la sostenibilidad y continuidad de las prácticas de conservación

- **Fortalecimiento de capacidades locales:** Se promoverá la capacitación de la comunidad en la implementación y mantenimiento de prácticas de conservación, asegurando su sostenibilidad a largo plazo.
- **Generación de recursos locales:** Se buscarán fuentes de financiamiento y recursos locales para respaldar las prácticas de conservación, como la venta de productos sostenibles.
- **Alianzas estratégicas:** Se explorará la posibilidad de establecer alianzas con organizaciones, instituciones y empresas que puedan apoyar la continuidad de las prácticas de conservación.

5.6.8 Contribución a la biodiversidad y resiliencia del ecosistema local

- **Promoción de la biodiversidad:** Se destacará cómo las prácticas de conservación promueven la biodiversidad local, protegiendo especies endémicas y hábitats únicos.

- **Aumento de la resiliencia:** Se resaltarán cómo la restauración de ecosistemas y la conservación contribuyen a aumentar la resiliencia del ecosistema frente a eventos climáticos extremos y perturbaciones.

5.6.9 Potencial de replicación de estrategias de conservación en otras regiones

- **Documentación de experiencias:** Se documentarán las experiencias y lecciones aprendidas en la conservación de las microcuencas altoandinas, de manera que puedan servir como referencia para otras regiones con características similares.
- **Intercambio de conocimientos:** Se fomentará el intercambio de conocimientos y buenas prácticas con otras comunidades y regiones interesadas en la conservación de ecosistemas de páramo.

5.6.10 Liderazgo en la conservación de microcuencas altoandinas y su impacto regional

- **Posicionamiento como referente:** Se buscará posicionar a la comunidad y al equipo técnico como referentes en la conservación de microcuencas altoandinas, compartiendo sus experiencias y conocimientos.
- **Influencia en la región:** Se explorará cómo las acciones de conservación en las microcuencas pueden tener un impacto positivo en la conservación de ecosistemas similares en la región altoandina.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La evaluación detallada de las propiedades geomorfológicas e hidromorfológicas de las microcuencas de Atillo, Ozogoche y Yasepan revela tendencias distintivas que inciden directamente en su dinámica hidrológica y erosiva. Ozogoche destaca por su extensa área y topografía menos susceptible, sugiriendo una mayor capacidad de acumulación de agua y una menor susceptibilidad a la erosión. Atillo, con su forma compacta y topografía pronunciada, muestra una dinámica hidrológica más controlada, pero es más propensa a procesos erosivos. Yasepan, en una posición intermedia, exhibe una mayor velocidad del flujo de agua y, por ende, una susceptibilidad significativa a la erosión. La variabilidad en los parámetros geomorfológicos, como la forma, el área, la altimetría y la red de drenaje, influye en la dirección, velocidad y capacidad de acumulación de los flujos hídricos, así como en la sedimentación y permeabilidad del suelo. Atillo presenta un riesgo potencial más alto debido a su relieve montañoso, mientras que Ozogoche, a pesar de su extensión, muestra una capacidad de drenaje equilibrada. Yasepan, con su pendiente pronunciada, evidencia mayor susceptibilidad a procesos erosivos.
- Los resultados del modelo R.U.S.L.E. para el periodo de 2002 a 2021 revelan patrones significativos en las tasas de erosión potencial y erosión hídrica real en las microcuencas de Ozogoche, Atillo y Yasepan. En términos de erosión potencial, Atillo muestra las tasas más altas, categorizándose como de nivel alto, seguido por Yasepan y Ozogoche, con tasas más bajas. La presencia de valores atípicos en 2007 y 2008 destaca la variabilidad histórica, con una tendencia general creciente en las tasas de erosión potencial a lo largo de los años. En cuanto a la erosión hídrica real, se evidencia una clasificación bioclimática que coloca a Atillo y Yasepan en zonas de humedad superhúmedas, mientras que Ozogoche se encuentra en una zona semisaturada. Las tasas de erosión hídrica real son significativamente inferiores a las tasas de erosión potencial, con Ozogoche mostrando las tasas más bajas, seguido por Atillo y Yasepan, clasificándose como de nivel bajo a medio. Esto sugiere que la vegetación de páramo actúa como un factor clave en la mitigación de la erosión, evidenciado por una disminución sustancial en la pérdida del suelo, aproximadamente del 95%, debido a la presencia de vegetación. La integración de estos resultados con las hidromorfometrías y geomorfometrías destaca patrones distintivos en cada microcuenca, subrayando la influencia

de la geografía en la dinámica hidrológica. Se sugiere que Atillo, con su cuenca compacta y altitudes menos pronunciadas, mientras que Yasepan, con su topografía intermedia, puede. Ozogoché, a pesar de tasas potenciales más bajas, destaca por su extensa área, y una mayor complejidad en la acumulación de agua y el flujo hídrico en esta microcuenca.

- Para la gestión sostenible del recurso suelo en las microcuencas altoandinas de páramo, se consideraron las propiedades geomorfológicas e hidromorfológicas distintivas, características bioclimáticas y tasas de erosión multianuales, las cuales revelan que Atillo, con su forma compacta y topografía pronunciada, exhibe mayor susceptibilidad a procesos erosivos. Por otro lado, Ozogoché, a pesar de tener tasas potenciales más bajas, destaca por su extensa área y menor susceptibilidad a la erosión, mientras que Yasepan, en una posición intermedia, presenta una mayor velocidad del flujo de agua y, por ende, una susceptibilidad significativa a la erosión. En respuesta a las condiciones específicas de las tres microcuencas, se propone una serie de acciones para mitigar el impacto de la erosión en estas zonas altoandinas de páramo, con la finalidad de contribuir a la conservación ambiental y políticas sostenibles. Estas medidas se centran en la presentación y socialización del estudio, la validación y calibración del modelo RUSLE, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles y ganadería responsable, y la restauración ecológica y conservación de áreas prioritarias como la vegetación de páramo o bosque nativo. Cada fase de esta propuesta se enfoca en la socialización, adaptación a condiciones específicas, monitoreo continuo y participación comunitaria. La ejecución de estas acciones garantiza una gestión sostenible y efectiva del recurso suelo en estas zonas, siendo el propósito del plan contribuir a la conservación ambiental y políticas sostenibles.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda utilizar un modelo de elevación digital con una resolución espacial inferior a 30 m, considerando que limitaciones en la resolución podrían impactar la precisión de los resultados.
- La corrección y depuración de los Modelos de Elevación Digital (MDE) son esenciales, ya que podrían contener espacios vacíos en los píxeles.
- Obtener MDE de diferentes plataformas para verificar y trabajar con el óptimo.
- Conocer las condiciones meteorológicas locales, ya que la nubosidad puede afectar la calidad de las imágenes utilizadas en teledetección.
- Si no hay imágenes disponibles para analizar una variable, es crucial que al menos el 50% de la imagen contenga información válida.

- Eliminar la nubosidad a través del enmascaramiento de nubes para mejorar la calidad de los resultados.
- Al usar imágenes Sentinel o Landsat, es importante aplicar la corrección 2A y 2 para verificar y corregir datos.
- Identificar el tipo de cuenca en estudio, ya que cuencas, subcuencas y microcuencas presentan diferencias en la dinámica de la red hídrica.
- Determinar el polígono de las zonas de estudio, considerando que los shapefiles proporcionados por instituciones pueden tener inconsistencias.
- Para trabajos con valores multitemporales, se requiere habilidad en programación, preferiblemente en Python o Model Builder de ArcGIS, para optimizar procesos.
- Al determinar parámetros geomorfológicos e hidromorfológicos, realizar pruebas piloto de varios autores, ya que las metodologías empíricas no están estandarizadas.
- Conocer los modelos empíricos existentes para modelar variables específicas mediante bibliografía.
- Evaluar si la distribución de datos multitemporales sigue una distribución normal para aplicar análisis de varianza y comprobar diferencias significativas.
- En el caso de datos no paramétricos, realizar análisis estadísticos descriptivos para comprender la variabilidad y tendencias de la variable.
- Realizar análisis bioclimático para entender la influencia de las condiciones meteorológicas en la dinámica de la vegetación y procesos erosivos.
- Relacionar las condiciones geomorfológicas de la zona de estudio con la dinámica de los procesos erosivos.
- Desarrollar un plan de gestión para mitigar problemas de erosión.
- La caracterización hidromorfológica y los resultados del modelo RUSLE deben guiar la selección de sitios prioritarios para la restauración en cada microcuenca.
- Para Atillo, planificar terrazas de escorrentía adaptadas a la topografía pronunciada y realizar una zonificación de pastoreo cuidadosa.
- En Ozogoche, evaluar detalladamente la acumulación de agua y el flujo hídrico, implementar prácticas agrícolas sostenibles y diseñar terrazas considerando la complejidad en la acumulación de agua.
- Para Yasepan, adaptar la implementación de terrazas de escorrentía a la pendiente pronunciada, promover prácticas agrícolas sostenibles, zonificación de pastoreo y diversificación de cultivos resistentes al clima.

BIBLIOGRAFÍA

ABER, J.S.; et al. Vegetation and Erosion. *Small-Format Aerial Photography*, 2010, DOI 10.1016/B978-0-444-53260-2.10016-X.

AGUIRRE, N. Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas. [en línea]. 2007: [consulta: 14 mayo 2023]. Disponible en: https://www.academia.edu/31926541/Universidad_Nacional_de_Loja.

AL RAMMAHI, A.H.J. ESTIMATION OF SOIL ERODIBILITY FACTOR IN RUSLE EQUATION FOR EUPHRATES RIVER WATERSHED USING GIS. *International Journal of GEOMATE*, 2018, vol. 14, no. 46, ISSN 21862982. DOI 10.21660/2018.46.87788.

ALCÁNTARA, F. *Modelo de geoformaciones cóncavas para recargas de agua subterránea en cabeceras de cuenca del río Jequetepeque, Cajamarca*. 2015, Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina.

ALCÁNTARA, I. & GOUDIE, A. Geomorphological hazards and disaster prevention. 2010, *CAMBRIDGE*, DOI 10.1017/CBO9780511807527.

ALFARO, K.; et al. Estudios Hidrológicos del SENAMHI Resúmenes Ejecutivos-2020. *DIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS* [en línea], [consulta: 10 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/344242328>.

ALMAGRO, A.; et al. Improving cover and management factor (C-factor) estimation using remote sensing approaches for tropical regions. *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 7, 2019, no. 4, ISSN 2095-6339. DOI 10.1016/J.ISWCR.2019.08.005.

ALVARADO, M.; et al. La erosión hídrica del suelo en un contexto ambiental, en el Estado de Tlaxcala, México. *CIENCIA ergo-sum*, ISSN 1405-0269, Vol. 14, N°. 3, 2007, págs. 317-326 [en línea], vol. 14, no. 3, [consulta: 6 octubre 2023]. ISSN 1405-0269. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5116564&info=resumen&idioma=ENG>.

ANDERSON, G.E. Origin of line of color change in Red Bed deposition. *GSA Bulletin*, vol. 52, 1941, no. 2, ISSN 0016-7606. DOI 10.1130/GSAB-52-211.

ANGEARU, C.V.; et al. Multi-Temporal Analysis and Trends of the Drought Based on MODIS Data in Agricultural Areas, Romania. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 3940 [en línea], vol. 12, no. 23, [consulta: 22 julio 2023]. ISSN 2072-4292. DOI 10.3390/RS12233940. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/23/3940/htm>.

ARES, M. ¿Qué es la erosión hídrica y cómo la estudiamos en el IHLA? *UNICEN*, 2017 [en línea]. [consulta: 24 julio 2023]. Disponible en: <https://www.unicen.edu.ar/content/%C2%BFqu%C3%A9-es-la-erosi%C3%B3n-h%C3%ADdrica-y-c%C3%B3mo-la-estudiamos-en-el-ihlla>.

ARNÁEZ, J. LOS ESTUDIOS SOBRE LA EROSIÓN DEL SUELO: APORTACIONES DEL PROFESOR JOSÉ MARÍA GARCÍA-RUIZ. 2014, pp. 231-245. ISBN 978-84-96487-83.

ASOKAN, A.; et al. Image Processing Techniques for Analysis of Satellite Images for Historical Maps Classification—An Overview. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 4207 [en línea], vol. 10, no. 12, [consulta: 22 julio 2023]. ISSN 2076-3417. DOI 10.3390/APP10124207. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/12/4207/htm>.

BÁEZ, S.; et al. Propuesta Metodológica para la Representación Cartográfica de los Ecosistemas del Ecuador Continental. 2010.

BAQUE, G.A. Caracterización físico - mecánicas del suelo para cimentación en edificaciones de categoría baja, sector By Pass – John F. Kennedy, ciudad Jipijapa. 2018 [en línea], [consulta: 5 octubre 2023]. Disponible en: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1055>.

BARRANCO, L. & ÁLVAREZ, J. [sin fecha]. Cálculo del tiempo de concentración en hidrología con GRASS. *SIGTE*,

BATALLA, R.J. & POCH, R.M. 1978. APUNTES SOBRE PROCESOS EROSIVOS.

BIENES, R. Parámetros climáticos condicionantes de la erosión (intensidad, torrencialidad, aridez, déficit hídrico, tamaño gota). 2006. *La Erosión Hídrica: Importancia y clases*,

BISWAS, M.; et al. Morphotectonic analysis of petroliferous Barmer rift basin (Rajasthan, India). *Journal of Earth System Science*, vol. 131, 2022, no. 3, ISSN 0973774X. DOI 10.1007/S12040-022-01871-8.

BORDINO, J. Cuencas hidrográficas: qué son, tipos e importancia. 2021 [en línea]. [consulta: 9 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.ecologiaverde.com/cuencas-hidrograficas-que-son-tipos-e-importancia-3334.html>.

BURBANO, H. El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Artículo de reflexión: Agronomía* [en línea], 2018, vol. 34, no. 1, [consulta: 18 mayo 2023]. DOI 10.22267/rcia.183501.85. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.

BUSTAMANTE, D.P. ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL DE SUBCUENCAS HIDROGRÁFICAS PARA EL AÑO 2050 DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO-ECUADOR. *La Granja*, 2017, vol. 26, no. 2, ISSN 1390-3799. DOI 10.17163/lgr.n26.2017.02.

BUYTAERT, W.; et al. Clay mineralogy of the soils in the south Ecuadorian páramo region. *Geoderma* [en línea], 2005, vol. 127, no. 1-2, [consulta: 23 julio 2023]. ISSN 00167061. DOI 10.1016/J.GEODERMA.2004.11.021. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/254959684_Clay_mineralogy_of_the_soils_in_the_south_Ecuadorian_paramo_region.

CABRERA, R.I. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 1999, vol. 5, no. 1,

CAMARILLO, J.; et al. The global climate monitor system: from climate data-handling to knowledge dissemination. *International Journal of Digital Earth*, 2019, vol. 12, no. 4, ISSN 17538955. DOI 10.1080/17538947.2018.1429502.

CAMPOS, D. *Procesos del ciclo hidrológico*. 1998 [en línea]. San Luis Potosí, México: s.n. [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: [https://books.google.es/books?hl=es&lr&id=tkUYqd0Aac8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=%E2%80%9CProcesos+del+ciclo+hidrol%C3%B3gico%E2%80%9D+de+Campos+Aranda,+D.+F.+\(1992\)&ots=HU9Mc9Fcwt&sig=FCOV201zyWmozn82AipzOkUu610&pli=1#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr&id=tkUYqd0Aac8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=%E2%80%9CProcesos+del+ciclo+hidrol%C3%B3gico%E2%80%9D+de+Campos+Aranda,+D.+F.+(1992)&ots=HU9Mc9Fcwt&sig=FCOV201zyWmozn82AipzOkUu610&pli=1#v=onepage&q&f=false).

CANTO SILVA, C.S. & ALVA HUAMÁN, D.A. Caracterización Geomorfológica E Identificación De Zonas Con Riesgo Por Movimientos De Masa En El Distrito De Llacanora, Cajamarca, 2020. *Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development” “Leveraging emerging technologies to construct the future”*. S.l.:

Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, ISBN 9789585207189.
DOI 10.18687/LACCEI2021.1.1.114.

CARDONA, F.; et al. Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia). *Tecno Lógicas*, 2014, vol. 17, no. 32, ISSN 0123-7799.

CARDOSO, E.J.B.N.; et al. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agricola* [en línea], 2013, vol. 70, no. 4, [consulta: 8 agosto 2023]. ISSN 1678-992X. DOI 10.1590/S0103-90162013000400009. Disponible en:
<https://www.scielo.br/j/sa/a/WDK9YhnxmxXGbKK3rzWJ6Qm/?format=html&lang=en>.

CARRIÓN-MERO, P.et al. Water Sowing and harvesting application for water management on the slopes of a volcano. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 5, ISSN 2405-8440. DOI 10.1016/J.HELIYON.2023.E16029.

CASTRO, B. *Obtención de una cuenca hidrográfica mediante el uso de un software comercial "Arcgis y el uso de un software libre «SAGA». Caso de estudio municipio de Porcesito, Antioquia* [en línea]. 2017: Universidad Militar Nueva Granada. [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en:
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16602/CastroBenavidesBrianSteve2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

CASTRO, I. Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* [en línea], 2013, vol. 34, no. 2, [consulta: 4 mayo 2023]. ISSN 1680-0338. Disponible en:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382013000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

CEPAL. POLITICAS PUBLICAS PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE: LA GESTION INTEGRADA DE CUENCAS. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*, 1994.

CEPAL. *Guía análisis y zonificación de cuencas hidrográficas para el ordenamiento territorial*. 1a edi. 2013. ISBN 9789568468422.

CHEN, Z.; et al. A Literature Review on Soil Erosion Quantification and Measurements. *RUVIVAL* [en línea], 2019, vol. 5, [consulta: 3 mayo 2023]. DOI 10.15480/882.2339. Disponible

en:

https://tore.tuhh.de/bitstream/11420/2949/1/RUVIVAL_Publication_Series_Volume_5.pdf#page=18.

CHICCHÓN, M.A.; et al. Fusión de datos para segmentación semántica en aplicaciones urbanas de teledetección aérea usando algoritmos de aprendizaje profundo. 2019 [en línea], [consulta: 22 julio 2023]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14459>.

CHITALOGRO, V. & LLAMATUMBI, E. *Aplicación del modelo Usle para estimar cuantitativamente la erosión hídrica en la microcuenca del río Chibunga* [en línea]. Proyecto de Investigación. Riobamba: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO, 2021. [consulta: 3 mayo 2023]. Disponible en: http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/7411/6/Tesis_Chitalogro_V_Llamatumbi_E_.pdf.

CISNEROS, J.; et al. *Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo* [en línea]. 1a ed. Córdoba, Argentina: Río Cuarto: UniRio Editora. 2012 [consulta: 17 mayo 2023]. ISBN 978-987-688-024-4. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Jos-Cisneros/publication/261950035_Erosion_Hidrica_Principios_y_Tecnicas_de_Manejo/links/0deec5360142db3b03000000/Erosion-Hidrica-Principios-y-Tecnicas-de-Manejo.pdf.

COLMAN, C.B.; et al. IMPACTS OF CLIMATE AND LAND USE CHANGE ON SOIL EROSION IN THE UPPER PARAGUAY BASIN. 2018 [en línea], [consulta: 4 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/328757474>.

CÓRDOVA, M. PARAMETROS GEOMORFOLOGICOS DE CUENCAS HIDROGRAFICAS. *Prontubeam*, 2016 [en línea]. [consulta: 11 mayo 2023]. Disponible en: https://prontubeam.com/articulos/articulos_2016/04_2016_param_geom_cuencas/04_2016_param_geom_cuencas_articulo.pdf.

COTLER, H.; et al. Evaluación de prácticas de conservación de suelos forestales en México: Caso de las zanjas trinchera. *Investigaciones Geograficas*, vol. 2015, no. 88, ISSN 01884611. DOI 10.14350/RIG.47378.

COTLER, H.; et al. Delimitación de las Cuencas Hidrográficas de México a escala 1:250000. 2007

CRUZ, B.; et al. Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia* [en línea], 2015, vol. 23, [consulta: 13 mayo 2023]. ISSN 1665-4412. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67441039004>.

DEL VALLE, H. *Radars de Apertura Sintética y su sinergia con datos ópticos* [en línea]. S.l.: 2017. [consulta: 17 mayo 2023]. Disponible en: http://www.educatelweb.org/sites/default/files/manuales/MGEO_CURSO9_2017_TP_HFdV.pdf

DOCAMPO, L.; et al. MORFOMETRIA DE LAS CUENCAS DE LA RED HIDROGRÁFICA DE BIZKAIA (PAIS VASCO, ESPANA). *Asociación Española de Limnología* [en línea], 1989, vol. 5, [consulta: 13 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.limnetica.com/documentos/limnetica/limnetica-5-1-p-51.pdf>.

ELOSEGUI, A. & SABATER, S. *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* [en línea]. Fundación BBVA. S.l.: 2009. [consulta: 13 mayo 2023]. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=OfOUggC20_UC&oi=fnd&pg=PA11&dq=Es+una+medida+de+la+cantidad+de+canales+y+r%C3%ADos+en+una+cuenca+hidrogr%C3%A1fica+y+se+expresa+como+la+longitud+total+de+canales+por+unidad+de+%C3%A1rea+de+la+cuenca.+Es+una+medida+importante+de+la+estructura+de+la+red+de+drenaje,+ya+que+puede+afectar+la+velocidad+d&ots=9jM8MVm8wD&sig=NXX1V5acxsBfjASD97c8vCTv6sE#v=onepage&q&f=false.

ESA, S.A. Agencia Espacial Europea. *Earth System Science Data*, 2022 [en línea]. [consulta: 21 julio 2023]. Disponible en: <https://www.esa.int/>.

ESCOBAR, D. *Estimación de la erosión hídrica en zona semiárida del norte chileno mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) el caso de Punitaqui (IV Región de Coquimbo)*. 2019, Santiago, Chile: Universidad de Chile.

FAN, L.; et al. Brief review of image denoising techniques. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art* [en línea], 2019, vol. 2, no. 1, [consulta: 22 julio 2023]. ISSN 25244442. DOI 10.1186/S42492-019-0016-7/FIGURES/4. Disponible en: <https://vciba.springeropen.com/articles/10.1186/s42492-019-0016-7>.

FAO E IIASA. Harmonized World Soil Database version 2.0. 2023, *FAO-ONU*.

FAO & IIASA. Harmonized World Soil Database version 2.0. *Rome and Laxenburg* [en línea], 2023 [consulta: 18 mayo 2023]. DOI 10.4060/cc3823en. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/cc3823en>.

FAO & MADS. *Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales. Construcción participativa del diagnóstico de suelos Diseño de planes de intervención Prácticas de manejo sostenible de los suelos* [en línea]. Bogotá: 2018 [consulta: 18 mayo 2023]. ISBN 9789251304259. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i8864es/I8864ES.pdf>.

FLÓREZ, Y.; et al. Multitemporal analysis of the vegetation cover in the area of influence of the mines located in the high part of Maltería in Manizales, Colombia •. *DYNA* [en línea], 2017, vol. 84, [consulta: 17 mayo 2023]. ISSN 2346-2183. DOI 10.15446/dyna.v84n201.55759. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>.

FUENTES, J. Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional Pico de Tancítaro. 2004.

FURRIER, M. Caracterización Geomorfológica como Propuesta para la Planificación Ambiental y Territorial. Un Ejemplo de Aplicación en Brasil con Perspectiva de Aplicación en Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2018, vol. 2, no. 61, ISSN 2215-2563. DOI 10.15359/rgac.61-2.8.

GAD DE CHIMBORAZO. PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO. [en línea]. 2020: [consulta: 8 diciembre 2023]. Disponible en: <http://chimborazo.gob.ec/principal/wp-content/uploads/2022/06/PDOT.pdf>.

GAITÁN, J.; et al. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. 2017.

GALLARDO, M.; et al. Collaborative Community-based Governance in a Transboundary Wetland System in the Ecuadorian Andes. *Mountain Research and Development*, 2013, vol. 33, no. 3, ISSN 0276-4741. DOI 10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00120.1.

GARCÍA, J. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS PAISAJES DE LA GUARDIA Y PEGALAJAR: UNA PROPUESTA CARTOGRÁFICA PARA SU INVESTIGACIÓN 2017, no. 35, ISSN 1132-6956.

GARCÍA, V.J.; et al. Páramo ecosystems in Ecuador's southern region: Conservation state and restoration. *Agronomy*, 2020, vol. 10, no. 12, ISSN 20734395. DOI 10.3390/agronomy10121922.

GAVIRA, J. *Crónica Geográfica*. 1943. S.l.: s.n.

GCM, G.C.M. Global Climate Monitor, GCM. *A Tool to Handle Global Climate Data*. 2021.

GEOSPATIAL, S.A.S. Organización de ingeniería y geomática. *Alos - Prism 2015* [en línea]. [consulta: 21 julio 2023]. Disponible en: <https://www.geospatial.com.co/imagenes-de-satelite/alos-prism.html>.

GERALDI, A.M.; et al. Delimitación y estudio de cuencas hidrográficas con modelos hidrológicos. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, 2010.

GIL, V. *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce grande aplicada al peligro de crecidas 2009* [en línea]. Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur. [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/2069/TESIS_GIL.pdf;jsessionid=E4B4D97BB502C9A3938AC7C9068571AB?sequence=1.

GISBERT, J.; et al. [sin fecha]. El factor K de la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE).

GONZAGA, C. *Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador*. 2014, La Plata: Universidad Nacional de La Plata.

GONZÁLEZ, R.; et al. EFECTO DE LA EROSIÓN DEL SUELO SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ DE TEMPORAL. *Terra Latinoamericana* [en línea], 2007, vol. 25, no. 4, [consulta: 4 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57315558008.pdf#:~:text=Las causas de la erosión del suelo se,complementar los ingresos%28Hudson%2C 1983%3B Contreras et al.%2C 2003%29>.

GOSSWEILER, B. Segmentación y clasificación de imágenes satelitales para determinar la cobertura del suelo. *LaTécnica* 2012, [en línea], [consulta: 22 julio 2023]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/download/articulo/6087585.pdf>.

GUERRA, F. & GONZÁLEZ, J. Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado. *EOENSEÑANZA* [en línea], 2002, vol. 7, [consulta: 14 mayo 2023]. ISSN 1316-6077. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36070208>.

GUTIÉRREZ, V. & PINZÓN, P. *Evaluación de la erosión hídrica y escorrentía en tres sistemas productivos para un manejo sostenible del suelo en la vereda Santa Marta, Cabrera, Cundinamarca* [en línea]. Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios. 2017, [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/4884/1/T.AIG_GutierrezPajaritoViviana_2017.pdf.

HANN, B.J.; et al. Aquatics invertebrates and climatic change: A comment on Walker et al. (1991). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, vol. 49, no. 6,

HARTMAN, B.; et al. The effects of check dams and other erosion control structures on the restoration of Andean bofedal ecosystems. *Restoration Ecology*, 2016, vol. 24, no. 6, ISSN 10612971. DOI 10.1111/rec.12402.

HENGL, T.; et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 2017, vol. 12, no. 2, ISSN 19326203. DOI 10.1371/journal.pone.0169748.

HOLDRIDGE, L. *Ecología basada en zonas de vida* [en línea]. San José, Costa Rica: 2000. [consulta: 10 mayo 2023]. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=m3Vm2TCjM_MC&oi=fnd&pg=PR9&dq=El+sistema+de+Holdridge+es+un+m%C3%A9todo+para+clasificar+los+climas+y+los+ecosistemas+basado+en+la+relaci%C3%B3n+entre+la+temperatura,+la+precipitaci%C3%B3n+y+la+evapotranspiraci%C3%B3n.+Fue+desarrollado+por+el+ec%C3%B3logo+estadounidense+Leslie+Holdridge+en+1947.&ots=oOgB1xWEyN&sig=h9MA05pxkMjP-bJ3v9og0canCa4#v=onepage&q&f=false.

IBÁÑEZ, S.; et al. Morfología de las cuencas hidrográficas. *Universidad Politécnica de Valencia*, 2010.

IDEAM. *Sistemas Agroforestales y Restauración Ecológica como medidas de adaptación al cambio climático en alta montaña* [en línea]. Bogotá: Caso piloto, Proyecto Nacional de Adaptación al Cambio Climático –INAP– componente B, IDEAM y Conservación Internacional,.

[consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022086/GUIASISTEMASFINAL.pdf>.

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA, 2019. ¿Qué es una cuenca? [en línea]. [consulta: 9 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>.

INTRIAGO, P.; et al. Estudio hidromorfológico de la cuenca efímera Maconta con relación al riesgo de inundaciones repentinas. *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*. 2018 [en línea], [consulta: 13 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/dilemas/v8nspe2/2007-7890-dilemas-8-spe2-00014.pdf>.

IPIALES, C. *Modelamiento del balance hídrico de la microcuenca del río Ambi* [en línea]. Ibarra, Ecuador: Universidad Técnica del Norte. 2022, [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/12365/2/03%20RNR%20410%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>.

JAMIESON, R. Características y propiedades texturales del suelo. *FAO* 1985, [en línea]. [consulta: 17 agosto 2023]. Disponible en: https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm.

JIMÉNEZ, S. Clasificación de ríos según su edad. *Hidráulica Fácil* 2016 [en línea]. [consulta: 14 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.hidraulicafacil.com/2016/11/clasificacion-de-rios-segun-su-edad.html>.

JOHNSON, C.L.; et al. The effects of sea level and palaeotopography on lithofacies distribution and geometries in heterozoan carbonates, south-eastern Spain. *Sedimentology*, 2005, vol. 52, no. 3, ISSN 00370746. DOI 10.1111/J.1365-3091.2005.00708.X.

JORDÁN, A. & BELLINFANTE, N. Cartografía de la erosividad de la lluvia estimada a partir de datos pluviométricos mensuales en el Campo de Gibraltar (Cádiz). *Edafología*, 2000, vol. 7-3,

JUMBO, D. *Estimación cualitativa y cuantitativa de la erosión hídrica vinculada al cambio de uso del suelo en la subcuenca Catamayo, Ecuador*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina. 2018

KENNY, L.B.; et al. Managing manure, erosion, and water quality in and around horse pastures. *Horse Pasture Management*, 2018. DOI 10.1016/B978-0-12-812919-7.00014-7.

LEÓN, J. *Cambio de Régimen Hidrodinámico e Intensidad de Sedimentos en Ríos de Planicie por Estructuras Transversales y Laterales: Caso de Estudio Tabasco, México* [en línea]. Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora. 2017 [consulta: 17 mayo 2023]. Disponible en: <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/bitstream/20.500.12984/710/1/leonjimenezjesusenriqued.pdf#page=30>.

LI, S.; et al. Facile fabrication of TaON/Bi₂MoO₆ core-shell S-scheme heterojunction nanofibers for boosting visible-light catalytic levofloxacin degradation and Cr(VI) reduction. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 428, ISSN 13858947. DOI 10.1016/j.cej.2021.131158.

LORO, M. Cálculo de cuenca vertiente con ArcGI. 2012 [en línea], [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: <http://www.ign.es/ign/layoutIn/modeloDigitalTerreno.do>.

MACIEJ SERDA, BECKER, F.G.; et al. Synteza i aktywność biologiczna nowych analogów tiosemikarbazonowych chelatorów żelaza. *Uniwersytet śląski* [en línea], 2003, vol. 7, no. 1, [consulta: 5 octubre 2023]. ISSN 1868-7075. DOI 10.2/JQUERY.MIN.JS. Disponible en: <https://desytamara.blogspot.com/2017/11/sistem-pelayanan-perpustakaan-dan-jenis.html>.

MAGAP. PROTOCOLO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA DEL ECUADOR CONTINENTAL 2013-2014, ESCALA 1:100.000 ELABORADO POR MAE-MAGAP PROTOCOLO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA DEL ECUADOR. 2013[en línea], [consulta: 9 septiembre 2022]. Disponible en: www.magap.gob.ec.

MANCHABAJÓY, J. & POLANCO, M. Análisis multitemporal de la cobertura vegetal en el páramo de paja blanca, Departamento de Nariño, period 1991-2017. *Revista de investigación Agraria y Ambiental RIAA* 2018 [en línea], [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: https://ridum.umanizales.edu.co/bitstream/handle/20.500.12746/6029/Manchabajoy_Manchabajo_y_Juliana_Jean_2021.pdf?sequence=3&isAllowed=y.

MANCILLA, G., 2008. Uso y conservación de suelos.

MÁRQUEZ, K. Caracterización de la textura de suelo en la subcuenca del río Zaratí para la evaluación del sistema de agua subterránea. 2021, *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, DOI 10.33412/apanac.2021.3203.

MARTÍNEZ & GRAÑA, A.; et al. Mapping the risk of water soil erosion in Iarrodriago (Salamanca, Spain) using the Rusle model and a-dinsar technique. *Agronomy* [en línea], 2021, vol. 11, no. 11, [consulta: 22 julio 2023]. ISSN 20734395. DOI 10.3390/AGRONOMY11112120/S1. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/11/2120/htm>.

MATOVELLE, C.; et al. Analysis of altitude influence on maximum precipitation events in a Pacific basin: trends and variability. [en línea], 2021, vol. 22, no. 6, [consulta: 13 mayo 2023]. DOI 10.4067/S0718-07642021000600003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000600003>.

MEZA, D. & MARTINEZ, L. ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE LAS CUENCAS DE LA RED MEX-LTER: ESTUDIO DE DIEZ CUENCAS A NIVEL NACIONAL EN MÉXICO. 2010.

MIRANDA, V. & VILORIA, A. *Determinación de la susceptibilidad de los suelos a la erosión potencial en la zona centro-sur de la microcuenca arroyo grande, San Carlos-Córdoba, mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG)* 2020 [en línea]. Montería, Córdoba: Universidad de Córdoba. [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/2979/mirandaruizvanessaesther-viloriapachecoangie.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

MONTATIXE, C. & ECHE, M. Degradación del suelo y desarrollo económico en la agricultura familiar de la parroquia Emilio María Terán, Píllaro. *Siembra*, 2021, vol. 8, no. 1, ISSN 2477-8850. DOI 10.29166/siembra.v8i1.1735.

MOREIRA, A.; et al. Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 2020, vol. 29, no. 1, ISSN 22565442. DOI 10.15446/RCDG.V29N1.76232.

NAJOU, Z.; et al. Oil slicks in the Gulf of Guinea - 10 years of Envisat Advanced Synthetic Aperture Radar observations. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, no. 10, ISSN 18663516. DOI 10.5194/essd-14-4569-2022.

NUVRI, N. Faktor-Faktor Yang Berhubungan Dengan Kepatuhan Berobat Penderita Hipertensi Di Posbindu PTM Desa Sidorejo Kecamatan Geneng Kabupaten Ngawi. *Society*, 2019, vol. 2, no. 1, ISSN 1098-6596.

OCHOA, T. *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos* [en línea]. ECOE EDICIONES. S.l.: 2011 [consulta: 13 mayo 2023]. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Qt03DgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Los+%C3%B3rdenes+son+una+jerarqu%C3%ADa+de+r%C3%ADos+que+se+agrupan+seg%C3%BA+n+su+tama%C3%B1o+y+posici%C3%B3n+en+la+red+hidrogr%C3%A1fica.+La+longitud+de+los+%C3%B3rdenes+se+refiere+a+la+longitud+de+los+r%C3%ADos+que+pertenecen+a+un+mismo+orden.+Los+%C3%B3rdenes+se+definen+como+una+jerarqu%C3%ADa+de&ots=ROhZowG_o6&sig=tWIPUT6AsGIUMOmVNAtmwNIEFw#v=onepage&q&f=false.

OGILVIE, A.; et al. Combining Multi-Sensor Satellite Imagery to Improve Long-Term Monitoring of Temporary Surface Water Bodies in the Senegal River Floodplain. *Remote Sensing* 2020, Vol. 12, Page 3157 [en línea], 2020, vol. 12, no. 19, [consulta: 22 julio 2023]. ISSN 2072-4292. DOI 10.3390/RS12193157. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/19/3157/htm>.

OÑATE & VALDIVIESO, F.; et al. Regional relationships for bankfull hydraulic geometry and discharge in the southern Andes of Ecuador: An application in the estimation of geomorphological runoff thresholds. *Geomorphology*, 2021, vol. 392, ISSN 0169-555X. DOI 10.1016/J.GEOMORPH.2021.107914.

ORTIZ, J. & GODOY, V. *Velocidad de infiltración del agua empleando tres infiltrómetros en la finca experimental La María - cantón Mocache* [en línea]. Quevedo, Ecuador: Universidad Técnica Estatal de Quevedo. [consulta: 18 mayo 2023]. ISBN 978-9978-371-47-3. Disponible en: <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/6751/1/1.pdf>.

PALACIOS, R.; et al. Evaluación del riesgo a la erosión de suelo en la microcuenca del río Francés. [en línea], 2016, vol. 3, [consulta: 3 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.mendeley.com/reference-manager/reader/6ae2c8e9-3884-31e4-a1f0-46b87d7d7dfb/2add815d-e79b-6f81-7a53-64f1e08379df>.

PDYOT PARROQUIA CEBADAS. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia Cebadas 2020-2030. [en línea]. 2019: [consulta: 16 julio 2023]. Disponible en: <https://multimedia.planificacion.gob.ec/PDOT/descargas.html>.

PEÑA, L. *Evaluación ambiental preliminar proyecto de instalación del servicio de protección contra la instalación del servicio de protección contra la erosión margen derecha del río Tumbes, Distrito Pampas de Hospital, Tumbes.* 2023, Piura, Perú: Universidad Nacional de Piura.

PLATA, R., 2008. *Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos.* 2008: Universidad Autónoma del Estado de México.

POGGIO, L.; et al. SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, 2021, vol. 7, no. 1, ISSN 2199398X. DOI 10.5194/soil-7-217-2021.

POZO, H.; et al. Ecuador | History, Flag, Capital, Map, Currency, Population, Language, & Facts | Britannica. *The Editors of Encyclopaedia Britannica* 2023 [en línea]. [consulta: 10 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.britannica.com/place/Ecuador>.

QUISPE, M. *Producción de sedimentos en la cuenca Quilca-Chili-Victor con el método Gavrilovic-Zemljic utilizando sistema de información geográfica (SIG).* 2022, Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina.

RACCA, J.M.G. Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología* [en línea], 2007, vol. 77, [consulta: 18 mayo 2023]. ISSN 1666-115X. Disponible en: <http://www.fceia.unr.edu.ar/fisiografia/publicaciones.htm>. Recibido:01/06/2007; aceptado:24/08/2007.

RAMOS, J.C.B.; et al. Aspectos geomorfológicos e hidrográficos da Serra da Jiboia, Bahia. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2020, vol. 13, no. 5, ISSN 19842295. DOI 10.26848/RBGF.V13.5.P2241-2254.

RAYA, A.E.; et al. [sin fecha]. Determinación del cauce principal de un río mediante herramientas SIG y análisis multicriterio: metodología. ,

REYES, A.; et al. *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*, 2014 [en línea]. 21 ed. Cali, Colombia: s.n. [consulta: 18 mayo 2023]. ISBN 9789587654011. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=6jinEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT39&dq=Clasificaci%C3%B3n+de+Cuencas+Hidrogr%C3%A1ficas+por+el+Sistema+de+Drenaje&ots=a5rrMa2-eB&sig=QHkM-ywNhQSUTIfE4Xw79nAgs3Y#v=onepage&q&f=false>.

ROCHA, P. Los ríos: sistemas fluviales - Cienciaybiología. *ciencia y biología.com*, 2016 [en línea]. [consulta: 13 mayo 2023]. Disponible en: <https://cienciaybiologia.com/rios-sistemas-fluviales/?cn-reloaded=1>.

RODRÍGUEZ, C.; et al. Pisos altitudinales del Ecuador [en línea]. [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.calameo.com/read/004408122ab397b34731b>.

RODRIGUEZ, D. *Estudio experimental del impacto de la energía de caída de gotas de lluvia en el terreno*, 2021 [en línea]. Barcelona: Escola Técnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports. [consulta: 18 mayo 2023]. Disponible en: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/362353/TFM_Diego_Rodriguez_Siavichay.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

RODRIGUEZ, O. & ARREDONDO, H. *Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto modis de la Nasa, aplicado en estudios de Ingeniería Civil* 2005, [en línea]. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. [consulta: 17 mayo 2023]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7050/tesis123.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

ROFFE, T.; et al. Análisis del factor-LS en diferentes modelos de predicción de la erosión hídrica del suelo.

ROY, D.P.; et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 185, ISSN 00344257. DOI 10.1016/j.rse.2015.12.024.

SÁNCHEZ, B. La teledetección en investigaciones ecológicas como apoyo a la conservación de la biodiversidad: una revisión. *Revista Científica* [en línea], 2018, vol. 33, [consulta: 17 mayo 2023].

2023]. ISSN 0124-2253. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/cient/n33/2344-8350-cient-33-00243.pdf>.

SANTOS, A. & ORREGO, E. Riesgo Potencial a erosión hídrica para la planificación del manejo y conservación de suelos de la agroindustria azucarera Guatemala. *Revista Tikalia Año*, 2016, no. 1,

SAZ, M. & CREUS, J. El cambio climático en La Rioja: evolución reciente de la temperatura media anual en Haro en el contexto de los últimos 600 años. 2008, [en línea], [consulta: 18 mayo 2023]. ISSN 0213-4306. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/77386>.

SEITZ, S.; et al. Controlling Soil Erosion Using No-Till Farming Systems. *No-till Farming Systems for Sustainable Agriculture: Challenges and Opportunities* 2020, [en línea], [consulta: 24 julio 2023]. DOI 10.1007/978-3-030-46409-7_12. Disponible en: <https://eos.com/blog/soil-erosion/>.

SERIO, M.A.; et al. Raindrop size distribution and terminal velocity for rainfall erosivity studies. A review. *Journal of Hydrology*, 2019, vol. 576, ISSN 0022-1694. DOI 10.1016/J.JHYDROL.2019.06.040.

SOAR, P.J.; et al. Quantifying River Channel Stability at the Basin Scale. *Water* 2017, Vol. 9, Page 133 [en línea], 2017, vol. 9, no. 2, [consulta: 24 julio 2023]. ISSN 2073-4441. DOI 10.3390/W9020133. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/2/133/htm>.

THOMPSON, L. & TROEH, F.R. 2021. *Los suelos y su fertilidad* [en línea]. 4a. New York: Reverté. [consulta: 18 mayo 2023]. ISBN 9788429110418. Disponible en: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=VpIUEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=b\)%09Limo:+material+granular+que+se+encuentra+en+el+suelo+y+est%C3%A1+compuesto+por+part%C3%ADculas+de+tama%C3%B1o+entre+0.002+y+0.05+mm.+El+limo+es+importante+para+la+retenci%C3%B3n+de+agua+en+el+suelo.&ots=GCU19vMp95&sig=3Oj5oIHkzm8nJMX_8qarl-M5foo#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=VpIUEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=b)%09Limo:+material+granular+que+se+encuentra+en+el+suelo+y+est%C3%A1+compuesto+por+part%C3%ADculas+de+tama%C3%B1o+entre+0.002+y+0.05+mm.+El+limo+es+importante+para+la+retenci%C3%B3n+de+agua+en+el+suelo.&ots=GCU19vMp95&sig=3Oj5oIHkzm8nJMX_8qarl-M5foo#v=onepage&q&f=false).

TRISTAN, P.M.; et al. Normalización de Imágenes Satelitales en el Análisis Multi-Temporal. 1997.

UHLENBROOK, Stefan. & UNESCO. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos* [en línea]. 2019: UNESCO. [consulta: 16 marzo 2023]. ISBN 9789233001084. Disponible en: <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf>.

USGS. EarthExplorer: USGS. *United States Geological Survey*. 2021

VAN DER KNIJFF, J.M.; et al. European Soil Bureau Soil Erosion Risk Assessment Italy Soil Erosion Risk Assessment in Europe. ,

VEAS, L. *Propuesta de uso alternativo del suelo a través de la determinación del índice de erosión potencial en el cantón Quevedo aplicando sistema de información geográfica*. Quevedo, Ecuador: Universidad Técnica Estatal de Quevedo. 2015.

VEGA, X. Diferentes soluciones para la delimitación y codificación de cuencas superficiales cubanas . *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 2020, vol. XLI, no. 2,

VERDUGO, M. *Análisis morfométrico de las microcuencas a las que pertenece el bosque y vegetación protectora Aguarongo (BVPA), influencia en el comportamiento hidrológico*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. 2017.

VILEMA RAMOS, B.J. Análisis de factores antrópicos en los cambios de cobertura del matorral seco montano del Valle Chota, periodo 1990 - 2020. [en línea], [consulta: 5 octubre 2023]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11689>.

VILLAMARÍN, C.; et al. Caracterización de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú Caracterización física, química e hidromorfológica de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú. *Research Article*, 2014, vol. 42, no. 5, DOI 10.3856/vol42-issue5-fulltext-12.

VILLEGAS, P. Tiempo de concentración de la cuenca. *Agua y SIG* 2014, [en línea]. [consulta: 13 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.aguaysig.com/tiempo-de-concentracion-de-la-cuenca/>.

WIEDER, W.R.; et al. Regridded Harmonized World Soil Database v1.2. ORNL DAAC. *ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA.*, 2014, vol. 4, no. Clm,

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. *Predicting Rainfall-Erosion Losses From Cropland East of the Rocky Mountains* [en línea]. No. 282. 1978: USDA. [consulta: 15 agosto 2023]. Disponible en: <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>.

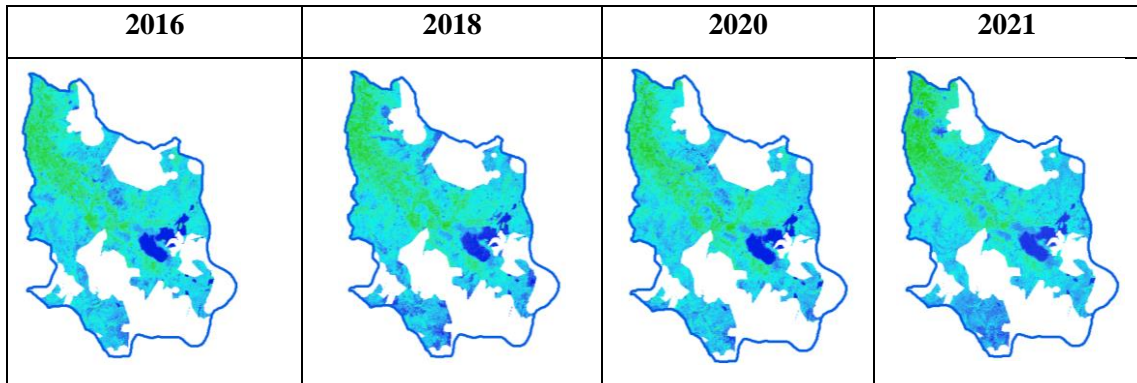
Z FLORES LÓPEZ, M. Análisis y comparación de metodologías de ordenación de cuencas hidrográficas. Aplicación a la cuenca de La Paz en Baja California Sur, México. 2013 [en línea], [consulta: 5 octubre 2023]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/19233>.

ZHICA, J. *Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco, cantón Gualaceo*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. 2020.

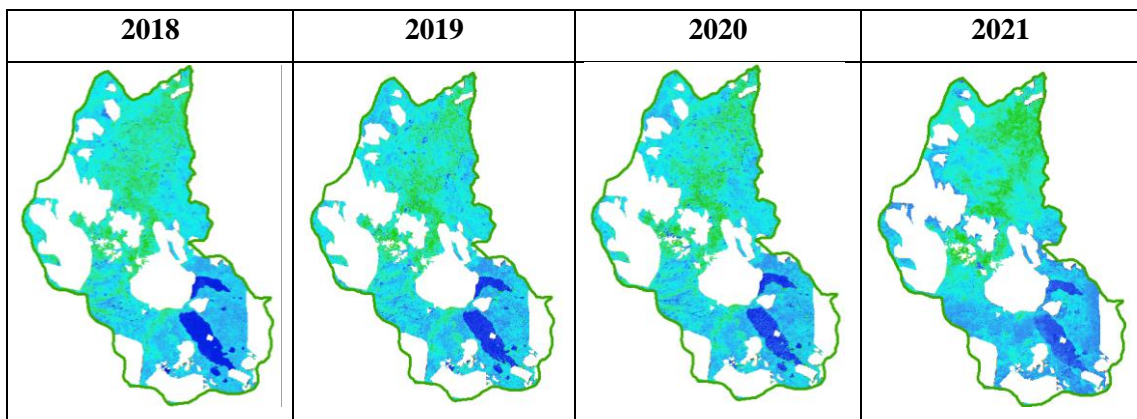
ZURITA, S.; et al. Análisis diversidad florística del ecosistema herbazal inundable del páramo comunidad río colorado alto, Pilahuin-Tungurahua. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, ISSN-e 2550-682X, Vol. 5, N°. Extra 1, 2020 (Ejemplar dedicado a: Noviembre Especial 2020), págs. 80-105 [en línea], vol. 5, no. 1, [consulta: 18 julio 2023]. ISSN 2550-682X. DOI 10.23857/pc.v5i1.1879. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7659361&info=resumen&idioma=SPA>.

ANEXOS

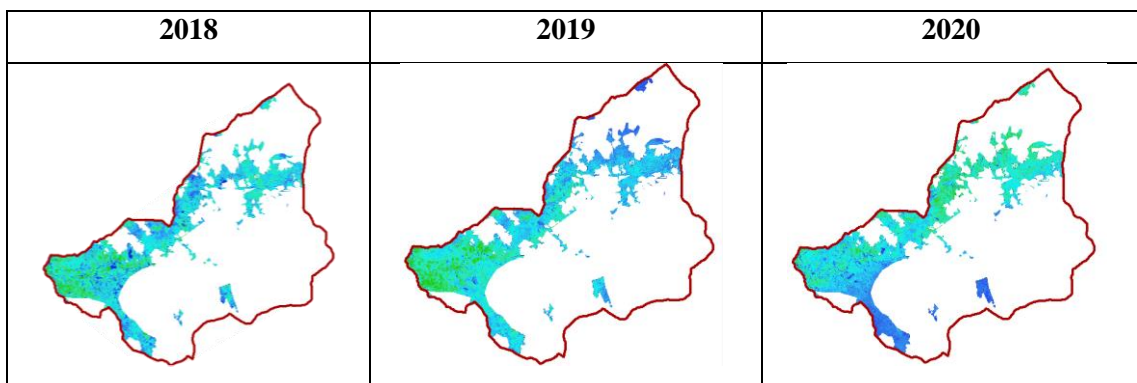
ANEXO A: RASTERS DEL FACTOR C DE LA MICROCUENCA DE ATILLO EN LOS AÑOS 2016 - 2021



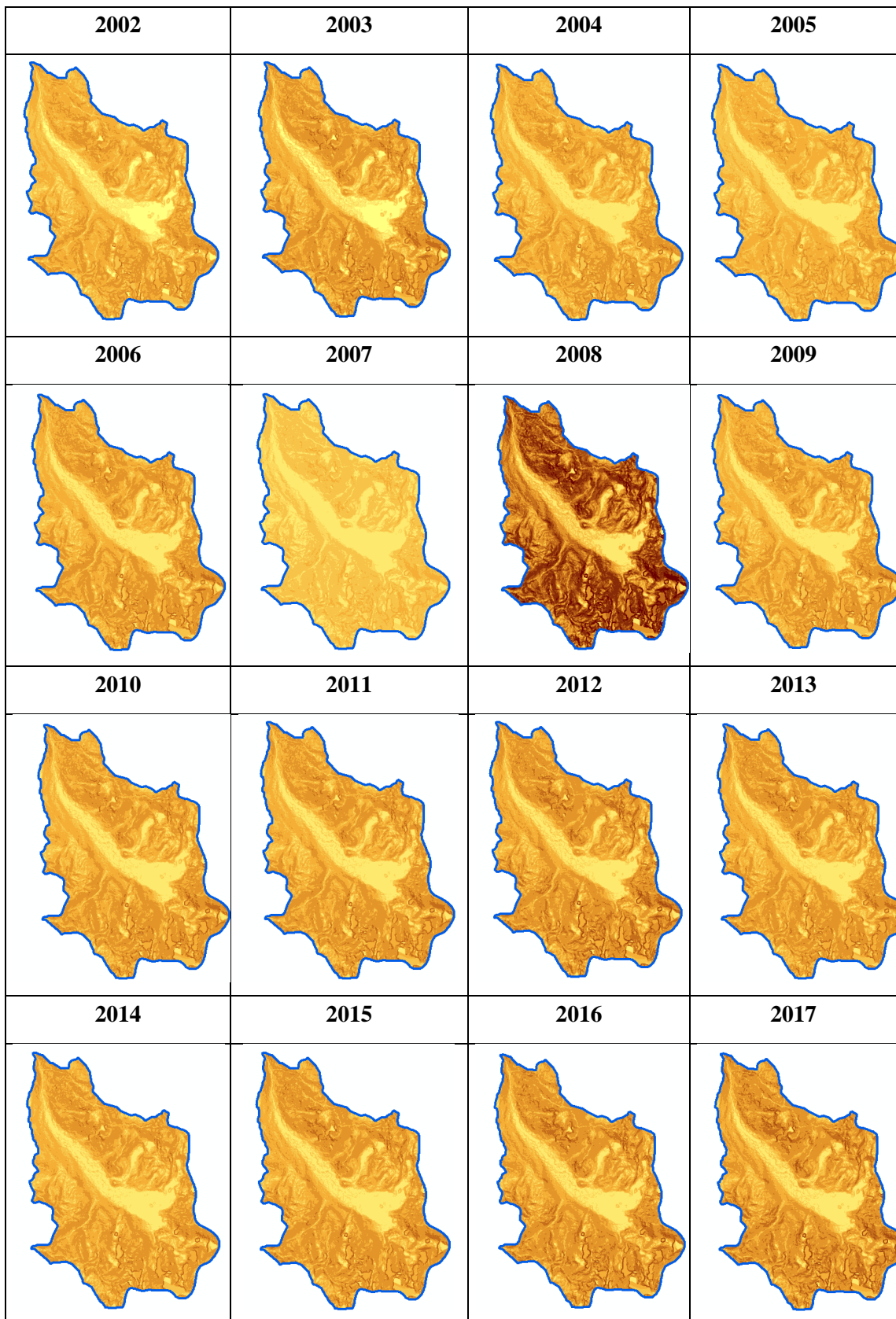
ANEXO B: RASTERS DEL FACTOR C DE LA MICROCUENCA DE OZOGOCHI EN LOS AÑOS 2018 - 2021

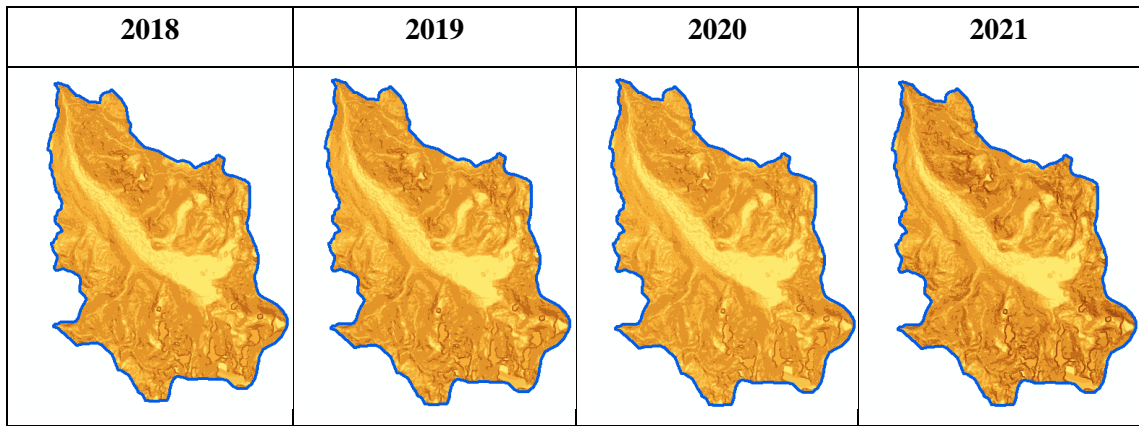


ANEXO C: RASTERS DEL FACTOR C DE LA MICROCUENCA DE YASEPAN EN LOS AÑOS 2018 - 2020

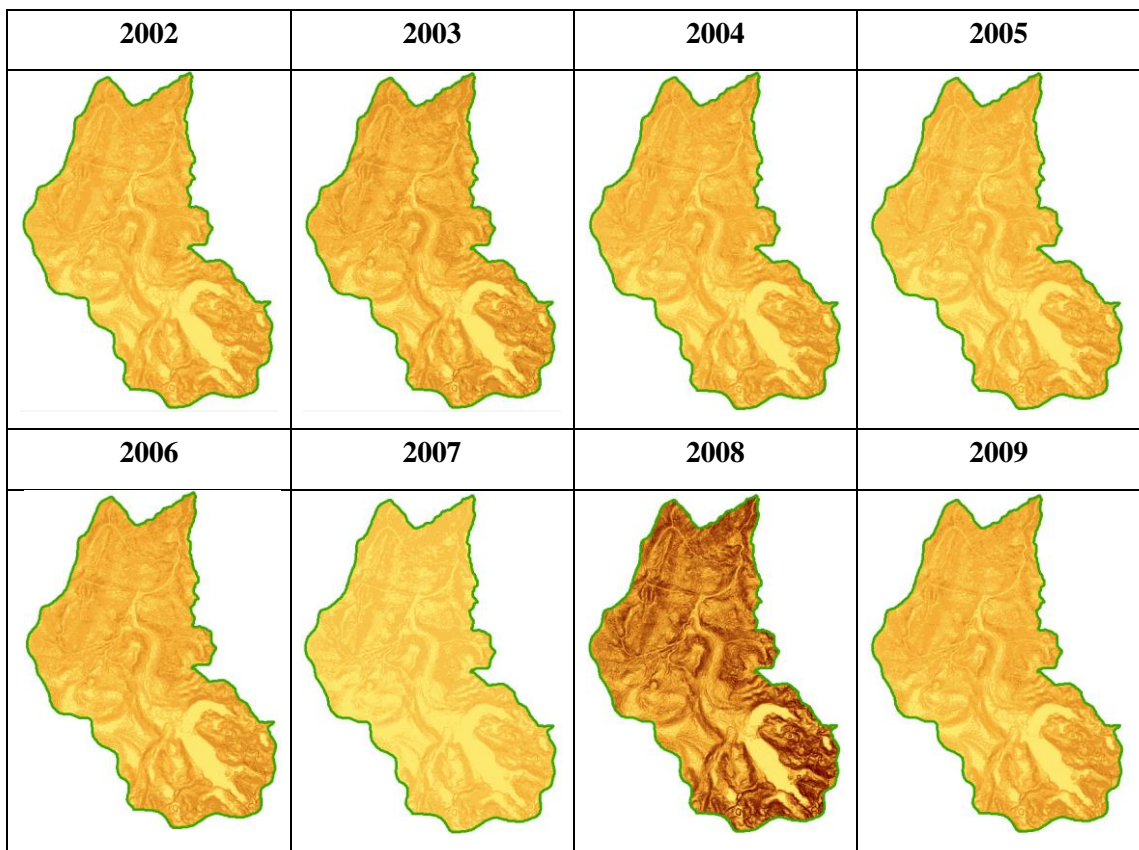


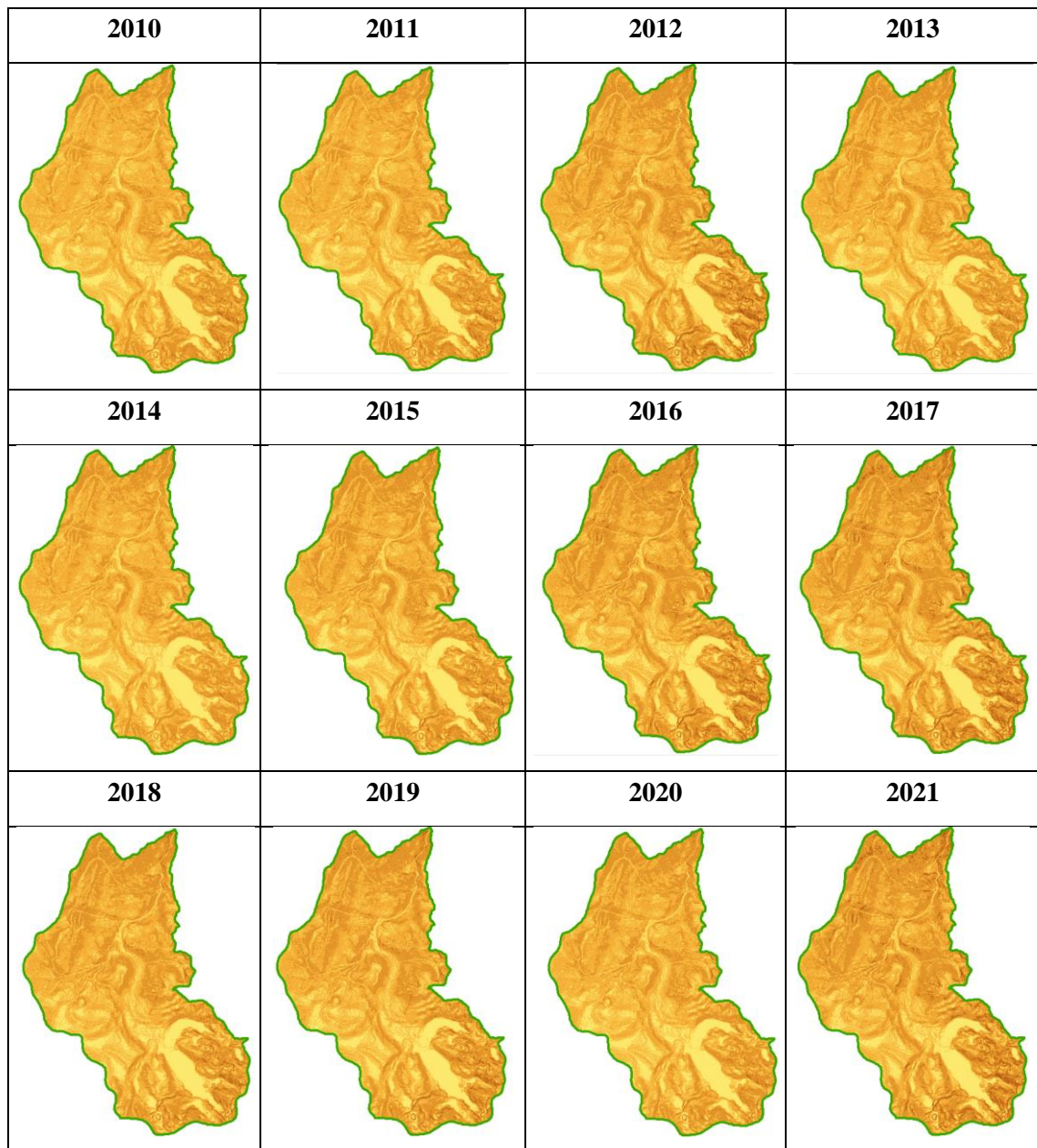
ANEXO D: EROSIÓN POTENCIAL MULTIANUAL DE LA MICROCUENCA DE ATILLO



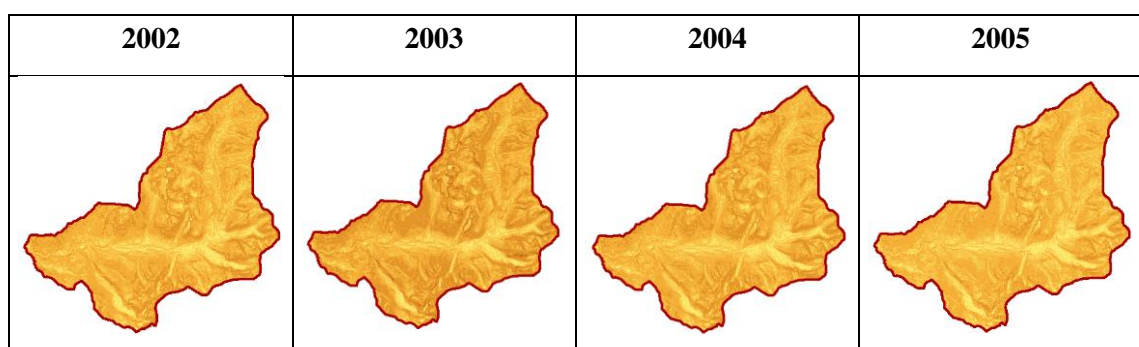


















ANEXO E: EROSIÓN POTENCIAL MULTIANUAL DE LA MICROCUENCA DE OZOGOCHÉ





ANEXO F: EROSIÓN POTENCIAL MULTIANUAL DE LA MICROCUENCA DE YASEPAN



2006	2007	2008	2009
			
2010	2011	2012	2013
			
2014	2015	2016	2017
			
2018	2019	2020	2021
			



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 23 / 01 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Carlos Israel Imbaquingo Cangas
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Ambiental
Título a optar: Ingeniero Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

2216-DBRA-UPT-2023

