

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA



**“CONTROL DE SEDIMENTOS PARA REDUCIR LA
COLMATACIÓN EN POZAS DE SEDIMENTACIÓN DE ÁREAS
DESCUBIERTAS DE LA COMPAÑÍA MINERA COIMOLACHE
S.A.”**

TESIS

Para optar el título profesional de:
INGENIERO HIDRÁULICO

Presentado por el Bachiller:
SEGUNDO DEMETRIO PÉREZ NÚÑEZ

Asesorado por:
PhD Ing. SANTOS OSWALDO ORTIZ VERA

CAJAMARCA-PERÚ

2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme tener la satisfacción de dar un paso más en mi formación profesional.

A mi abuelita Bremilda Tello Saldaña (Q.E.P.D) que hoy me guía desde el cielo, por demostrarme siempre su amor y apoyo incondicional, quien constantemente impulsó y depositó su confianza en mí para alcanzar este objetivo.

A mi Madre y mi Padre por darme su apoyo constante y esa motivación que necesité en cada momento para seguir adelante.

A mis hermanas por motivarme al estudio constante y por su apoyo moral que me brindaron.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por mostrarme el camino y guiarme brindándome fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de mi vida profesional.

En relación al plano académico quiero expresar que las investigaciones pocas veces se deben al trabajo individual, más detrás existe siempre una importante labor de investigadores, que aportan su experiencia y colaboración. Son numerosas las personas que de una u otra forma han contribuido a la elaboración de esta Tesis, resultando una tarea difícil enumerarlas a todas, sin embargo, no puedo dejar de mencionar ha:

A mis asesores Ing. Oswaldo Ortiz Vera e Ing. Ángel Hans Rubio Otoyá por su constante apoyo durante la elaboración de la tesis profesional.

Al equipo de trabajo de Planta de Procesos de la CIA. Minera Coimolache S.A en especial al Ing. Christian Armando Dávila Grados así también a la Ing. Deicy Noemí Sánchez Espinoza por el apoyo que me brindaron en la realización de la tesis.

A la Universidad Nacional de Cajamarca, EAP de Ingeniería Hidráulica y a su excelente plana de docentes por los cinco años de aprendizaje.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	8
RESUMEN.....	10
SUMMARY.....	11
I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. PROBLEMA.....	13
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3. ALCANCES.....	13
1.4. OBJETIVOS.....	14
Objetivo General.....	14
Objetivos Específicos.....	14
1.5. HIPÓTESIS.....	14
II. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
2.2. BASES TEÓRICAS.....	19
Cuenca Hidrográfica.....	19
Transferencia de información hidrometeorológica entre sistemas hidrológicos.....	28
Funciones de distribución de probabilidades.....	30
Tormentas de diseño.....	34
Erosión.....	38
Producción de sedimentos por erosión hídrica.....	43
Coeficiente de Entrega de Sedimento (CES) o Sediment Delivery Ratio (SDR).....	55
Transporte de sedimentos.....	57
Características físicas de los sedimentos.....	60
CLARIFICACIÓN DEL AGUA.....	67
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	72
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	77
3.1. UBICACIÓN.....	77
3.2. ACCESIBILIDAD.....	80
3.3. CLIMA.....	80
3.4. ACTIVIDAD ECONÓMICA.....	81
3.5. FLORA.....	81
3.6. TOPOGRAFÍA.....	81
3.7. MATERIALES.....	81
Materiales.....	81

3.8.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	83
3.9.	PROCEDIMIENTO EN CAMPO	84
a.	Toma de muestras de suelo	84
b.	Pesado, secado y tamizado de las muestras de suelo.	85
c.	Toma de muestras de agua	86
3.10.	PROCEDIMIENTO DE GABINETE	86
a.	Obtención de los parámetros morfométricos de la cuenca	86
b.	Estudio hidrológico de la estación base para la transferencia de información....	90
c.	Obtención del caudal de diseño	94
d.	Determinación de los factores de la USLE	95
e.	Estimación de la producción de sedimentos a través del SDR	116
f.	Estimación del transporte de sedimentos (GS)	117
g.	Control de sedimentos a través de su tratamiento	128
IV.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	141
4.1.	Parámetros geomorfológicos de la cuenca.	141
4.2.	Hidrología y análisis de tormentas	141
4.3.	Caudal de diseño	141
4.4.	Cuantificación de la erosión hídrica y de la producción de sedimentos	142
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	163
5.1.	Conclusiones	163
5.2.	Recomendaciones	165
VI.	BIBLIOGRAFÍA	166
LINKOGRAFÍA		170
OTROS		170
VII.	ANEXOS	172

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: DIVISIÓN DE UNA CUENCA EN BASE A SU SUPERFICIE.	21
TABLA 2: FORMAS GEOMÉTRICAS EN BASE A RANGOS DE VALORES DEL ÍNDICE DE GRAVELIUS.	23
TABLA 3: CLASIFICACIÓN DE DENSIDAD DE DRENAJE (D) DE UNA CUENCA.	28
TABLA 4: GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE LOS PERÍODOS DE RETORNO.	31
TABLA 5: VALORES CRÍTICOS PARA LA PRUEBA SMIRNOV –KOLMOGOROV DE BONDAD DE AJUSTE.	33
TABLA 6: FÓRMULAS PARA EL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.	35
TABLA 7: COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA.	38
TABLA 8: CLASIFICACIÓN DE LAS PENDIENTES	42
TABLA 9: PASOS PARA DETERMINAR LA TEXTURA DE LOS TIPOS DE SUELOS SEGÚN LA FAO.	48
TABLA 10: CÓDIGOS USLE DE ESTRUCTURA DE SUELO.	49
TABLA 11: CÓDIGOS USLE DE PERMEABILIDAD DE SUELOS.	50
TABLA 12: VALOR DEL FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (C).	53
TABLA 13: FACTOR P DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE (WISCHMEIER Y SMITH, 1978.)	54
TABLA 14: FACTOR P EN FUNCIÓN DE LAS CURVAS DE NIVEL Y PRÁCTICAS DE CULTIVO.	54
TABLA 15: CLASIFICACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA FAO.	55
TABLA 16: VARIACIÓN DEL ÁREA DE LA CUENCA CONFORME SU SDR.	56
TABLA 17: CLASIFICACIÓN DE LOS SEDIMENTOS POR TAMAÑO SEGÚN LA AMERICAN GEOPHYSICAL UNION.	61
TABLA 18: NUMERACIÓN DE TAMICES SEGÚN SISTEMA U.S. ESTÁNDAR.	61
TABLA 19: COORDENADAS UTM DEL PUNTO ZONA DE ESTUDIO.	79
TABLA 20: RESUMEN DE LOS PARÁMETROS MORFO MÉTRICOS DE LA CUENCA.	88
TABLA 21: RANGO DE COTAS DE LA CUENCA Y SUS RESPECTIVAS ÁREAS.	88
TABLA 22: REGISTRO DE INTENSIDADES MÁXIMAS DESDE 1973-2011	91
TABLA 23: PERÍODO DE RETORNO Y DURACIÓN DE TORMENTA.	92
TABLA 24: RESUMEN DE PARÁMETROS.	93
TABLA 25: PERÍODO DE RETORNO Y DURACIÓN DE TORMENTA CON DATOS TRASFERIDOS A LA ZONA DE ESTUDIO.	94
TABLA 26: VALORES DEL FACTOR R OBTENIDOS USANDO LAS DIFERENTES ECUACIONES.	97
TABLA 27: RESUMEN DE VALORES DE EROSIVIDAD PARA CADA ESTACIÓN.	99
TABLA 28: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MUESTRA N° 1.	101
TABLA 29: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MUESTRA N° 2.	102
TABLA 30: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MUESTRA N° 3	103
TABLA 31: CODIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE ESTRUCTURA DEL SUELO.	108
TABLA 32: TASA DE INFILTRACIÓN SEGÚN TEXTURA DE SUELO.	109
TABLA 33: CODIFICACIÓN USLE SEGÚN CLASE TEXTURAL.	109
TABLA 34: CLASE TEXTURAL Y SU VALOR DE ERODABILIDAD.	110
TABLA 35: CÁLCULO DEL FACTOR K A TRAVÉS DE LA ECUACIÓN ANTERIOR.	110
TABLA 36: OBTENCIÓN DEL FACTOR K DE CADA TIPO DE SUELO.	111
TABLA 37: VALORES DE C SEGÚN EL TIPO DE COBERTURA VEGETAL.	115
TABLA 38: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MUESTRA N° 4.	117
TABLA 39: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MUESTRA N° 5.	118
TABLA 40: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MUESTRA N° 6	119
TABLA 41: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MUESTRA N° 7.	120
TABLA 42: DATOS FÍSICOS DEL MATERIAL SEDIMENTADO.	121
TABLA 43: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FILTRACIÓN TOMADOS DURANTE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN	122
TABLA 44: RESUMEN DE LOS VALORES DE TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN POR LA FÓRMULA DE GARDE Y PANDE	125
TABLA 45: RESUMEN DE LOS VALORES DE TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN POR LA FÓRMULA DE BENEDICT Y VANUNI PARA LOS DATOS MEDIDOS.	126
TABLA 46: RESULTADOS DEL TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN PARA DIFERENTES TIRANTES.	127

TABLA 47: CARACTERÍSTICAS INICIALES DE LAS MUESTRAS DE AGUA, TOMADAS DEL CANAL.	132
TABLA 48: SECUENCIA DE LA PRUEBA DE JARRAS PARA EL PRIMER ENSAYO, EL CUAL FUE PARA UN AGUA CON TENDENCIA BÁSICA.	132
TABLA 49: PRUEBA DE JARRAS PARA EL TERCER ENSAYO, AGUA CON TENDENCIA ACIDA, EL COLOR VERDE PETRÓLEO ES PORQUE SE LE AGREGÓ SODA CAUSTICA PARA SUBIRLE EL pH.	133
TABLA 50: TURBIDEZ FINAL Y EFICIENCIA DEL USO DE CADA DOSIFICACIÓN.	135
TABLA 51: VALORES DE EROSIVIDAD QUE SE OBTUVIERON DEL MAPA.	145
TABLA 52: CUADRO DE RESUMEN DE VALORES DEL FACTOR K	147
TABLA 53: RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL MAPA DEL FACTOR LS	149
TABLA 54: VALORES ESTIMADOS DE COBERTURA (C).	151
TABLA 55: RESUMEN DE VALORES DEL FACTOR P.	152
TABLA 56: VALORES DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTO, SEGÚN DIFERENTES AUTORES.	156
TABLA 57: COMPARATIVA DE LAS TRES METODOLOGÍAS APLICADAS PARA CALCULAR EL TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN DE SEDIMENTOS.	157
TABLA 58: DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE Y FLOCULANTE EN (L/S) SEGÚN LAS LECTURAS DEL LIMNÍMETRO LATERAL.	161

ÍNDICE DE IMÁGENES

FIGURA 1: CUENCA HIDROGRÁFICA	19
FIGURA 2: ESQUEMA DONDE SE MUESTRAN LAS PARTES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.	20
FIGURA 3: CUENCA, SUBCUENCA Y MICROCUENCA.....	21
FIGURA 4: REPRESENTACIÓN DE UN HISTOGRAMA FRECUENCIAS DE ALTITUDES.	24
FIGURA 5: CURVA HIPSOMÉTRICA Y FRECUENCIA DE ALTITUDES.....	24
FIGURA 6: TRANSFORMACIÓN DE UNA CUENCA EN UN RECTÁNGULO.....	26
FIGURA 7: TRANSFORMACIÓN DE UNA CUENCA EN UN RECTÁNGULO.....	27
FIGURA 8: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PROCESO DE PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA.	36
FIGURA 9: IMPACTO DE UNA GOTA DE LLUVIA EN EL SUELO.....	39
FIGURA 10: INICIO DE EROSIÓN POR GOTAS DE LLUVIA.	40
FIGURA 11: ESQUEMA TÍPICO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA.	41
FIGURA 12: TRIANGULO DE TEXTURAS PARA CLASIFICACIÓN DE SUELOS.	48
FIGURA 13: NOMOGRAMA PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR K.....	50
FIGURA 14: ECUACION QUE RELACIONA EL AREA DE LA CUENCA Y SU SDR.....	56
FIGURA 15: ANALOGÍA DE LA BALANZA DE LANE.....	58
FIGURA 16: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA.	62
FIGURA 17: REDONDEZ PARA DISTINTOS TIPOS DE CONTORNOS.	63
FIGURA 18: GRAFICO DE YALIN PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE CAÍDA DE LA PARTÍCULA.	66
FIGURA 19: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS EN EL AGUA.	67
FIGURA 20: PROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN.....	70
FIGURA 21: UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL CONTEXTO GLOBAL.	77
FIGURA 22: UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL CONTEXTO NACIONAL.....	78
FIGURA 23: UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	79
FIGURA 24: ACCESO DE ZONA DE ESTUDIOS A TRAVÉS DE GOOGLE MAPS.	80
FIGURA 25: ESQUEMA GENERAL DE LA INVESTIGACION.	83
FIGURA 26: RECOLECTANDO LA MUESTRA UNA VÍA DE ACCESO.	84
FIGURA 27: RECOLECTANDO MUESTRA DE UN SUELO NATURAL.	84
FIGURA 28: RECOLECTANDO MUESTRA EN EL DESARENADOR DE MATERIAL SEDIMENTADO.....	85
FIGURA 29: VISTA DE LA PRIMERA POZA DE SEDIMENTACIÓN (600 M ³) LLENA DE SEDIMENTO	85
FIGURA 30: PESANDO LAS MUESTRAS ANTES DE PONERLAS A SECAR.....	85
FIGURA 31: MUESTRAS DE SUELO SECO.	86
FIGURA 32: TAMIZANDO LAS MUESTRAS.....	86
FIGURA 33: PLANO TOPOGRÁFICO DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	87
FIGURA 34: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS.	89
FIGURA 35: OBTENCIÓN DE LA ALTURA MEDIA DE LA CUENCA.	89
FIGURA 36: RED DE DRENAJE DE LA CUENCA.	90
FIGURA 37: CURVAS IDF OBTENIDAS DESPUÉS DE HACER EL ANÁLISIS DE VARIABLE EXTREMA.	92
FIGURA 38: CURVAS IDF OBTENIDAS DESPUÉS DE HACER LA TRASFERENCIA DE TORMENTAS A LA ZONA DE ESTUDIO.	94
FIGURA 39: QUE RESULTA DE UNIR PUNTOS CON IGUAL VALOR DE EROSIVIDAD.	100
FIGURA 40: CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA N° 1.....	101
FIGURA 41: CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA N° 2.....	102
FIGURA 42: CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA N° 3.....	104
FIGURA 43: GENERACIÓN DEL DEM, <i>DATA MANAGEMENT TOOLS/RASTER/CLIP</i>	112
FIGURA 44: GENERACIÓN DEL MAPA DE PENDIENTES, <i>SPATIAL ANALYST TOOLS/SURFACE/SLOPE</i>	112
FIGURA 45: GENERACIÓN DEL RASTER CON EL VALOR DE θ EN RADIANES, <i>SPATIAL ANALYST TOOLS/MAP ALGEBRA/RASTER CALCULATOR</i>	113
FIGURA 46: GENERACIÓN DEL RASTER DEL FACTOR L.	114
FIGURA 47: GENERACIÓN DEL RASTER S.....	114
FIGURA 48: GENERACIÓN DEL RASTER LS.	115
FIGURA 49: RECLASIFICANDO EL MAPA DE PENDIENTES.	116

FIGURA 50: CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA N° 4.....	118
FIGURA 51: CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA N° 5.....	119
FIGURA 52: CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA N° 6.	120
FIGURA 53: CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA N° 7.....	121
FIGURA 54: LÍNEA DE TENDENCIA Y ECUACIÓN QUE REPRESENTA LA VARIACIÓN QUE PRESENTA EL TIRANTE CON SU CONCENTRACIÓN.....	122
FIGURA 55: SECCIÓN DEL CANAL PRINCIPAL.	123
FIGURA 56: PARÁMETROS HIDRÁULICOS PARA UN CAUDAL MÁXIMO DE 5.436 M ³ /S.....	123
FIGURA 57: GRAFICA QUE RELACIONA AL TIRANTE Y AL TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN.	127
FIGURA 58: VISTA GENERAL DE LOS TANQUES DE DOSIFICACIÓN.	128
FIGURA 59: AGUA DE ESCORRENTÍA QUE CIRCULA POR EL CANAL.....	129
FIGURA 60: AGUA DE ESCORRENTÍA EN EL DESARENADOR.	129
FIGURA 61: MATERIAL SEDIMENTADO EN EL DESARENADOR.....	130
FIGURA 62: VISTA DE LA COLMATACIÓN DE LA POZA DE SEDIMENTACIÓN.	130
FIGURA 63: RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN Y LA TURBIDEZ INICIAL.....	136
FIGURA 64: RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN Y LA TURBIDEZ FINAL.	136
FIGURA 65: RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN Y LA EFICIENCIA.	137
FIGURA 66: RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN Y LA TURBIDEZ INICIAL.....	137
FIGURA 67: RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN Y LA TURBIDEZ FINAL.	138
FIGURA 68: RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN Y LA EFICIENCIA.	138
FIGURA 69: RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN Y LA TURBIDEZ INICIAL.....	139
FIGURA 70: RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN Y LA TURBIDEZ FINAL.	139
FIGURA 71: RELACIÓN ENTRE LA DOSIFICACIÓN Y LA EFICIENCIA.	140
FIGURA 72: MAPA DE PENDIENTES.....	143
FIGURA 73: MAPA DE SUELOS DEL ÁREA DE ESTUDIO.	144
FIGURA 74: MAPA DEL FACTOR R.	146
FIGURA 75: MAPA DEL FACTOR K.	148
FIGURA 76: MAPA DEL FACTOR LS.	150
FIGURA 77: MAPA DEL FACTOR P.....	153
FIGURA 78: MAPA DE LA EROSIÓN HÍDRICA.	155
FIGURA 79: COMPARACIÓN DE LAS TRES METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	158
FIGURA 80: COMPARACIÓN DE LAS TRES METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	158
FIGURA 81: REGRESIÓN DE LA FÓRMULA DE BENEDICT Y VANUNI EN FUNCIÓN DE LO MEDIDO.	159
FIGURA 82: ESQUEMA DE DOSIFICACIÓN AL CANAL PRINCIPAL.....	160
FIGURA 83: LA GRÁFICA MUESTRA LA RELACIÓN DE LA LECTURA DEL LIMNÍMETRO RESPECTO DEL CAUDAL.....	162

RESUMEN

La presente investigación se realizó en las áreas de operaciones de la Compañía Minera Coimolache S.A. Y trata sobre el control de sedimentos, que se tiene que hacer al agua de escorrentía superficial, mediante un tratamiento a base de coagulante (Policloruro de aluminio en solución acuosa) y floculante (Copolímero de amida acrílica y acrilato de sodio), de tal manera que la mayor parte de los sedimentos sean retenidos antes de ingresar a la poza sedimentadora. Para realizar el tratamiento del agua de escorrentía se tuvo que estimar que cantidad de sedimento está ingresando a través del área de drenaje la cual tiene 25.3 ha. Luego, se hizo la estimación de la erosión hídrica a través de la USLE, la cual dio un valor de 3.093 tn/ha/año y con ayuda de ArcGis se generó un mapa de erosión hídrica, para identificar las zonas más propensas a erosión, luego se procedió a determinar la producción de sedimentos de manera indirecta a través del coeficiente de entrega de sedimento o SDR, lo cual dio un valor de 64.382 tn/año y por último el transporte de sedimentos con una capacidad de 271.261 kg/s, para un caudal extremo con periodo de retorno de 25 años. Con todo lo antes mencionado se procedió a realizar las pruebas de jarras encontrándose una dosificación optima de 0.5 ml. de coagulante por 1.5 ml. de floculante para tratar un litro de muestra, en concentraciones de 1000 ppm. Los cuales se probaron para rangos de turbidez de 907.2 NTU a 6566.8 NTU y dio una eficiencia de remoción del 98.8.%.

Palabras claves

Erosión, producción, transporte, sedimentación, dosificación, coagulación, floculación y escorrentía.

SUMMARY

The present investigation was carried out in the operations areas of Company Minera Coimolache S.A. And it deals with the control of sediments, which has to be done to surface runoff water, by means of a treatment based on coagulant (aluminum polychloride in aqueous solution) and flocculant (acrylic amide copolymer and sodium acrylate), in such a way that most of the sediments are retained before entering the sedimentation pond. To perform the runoff water treatment, it was necessary to estimate how much sediment is entering through the drainage area, which has 25.3 ha. Then, the estimation of the water erosion was made through the USLE, which gave a value of 3,093 tn / ha / year and with the help of ArcGis a map of water erosion was generated, to identify the most prone to erosion, then the sediment production was determined indirectly through the sediment delivery coefficient or SDR, which gave a value of 64,382 tn / year and finally the transport of sediments with a capacity of 271,261 kg / s, for an extreme flow with return period of 25 years. With all the aforementioned, the jar tests were carried out, finding an optimum dosage of 0.5 ml. of coagulant for 1.5 ml. of flocculant to treat a liter of sample, in concentrations of 1000 ppm. Which were tested for turbidity ranges from 907.2 NTU to 6566.8 NTU and gave a removal efficiency of 98.8%.

Keywords

Erosion, production, transport, sedimentation, dosage, coagulation, flocculation and runoff.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha notado una creciente actividad minera en zonas altoandinas como lo es Cajamarca puntualmente la zona de estudio que está dentro del área de influencia de la Compañía Minera Coimolache S.A. Ubicada a altitudes que varían entre los 3750 – 4050 m.s.n.m.; donde el módulo de precipitación media anual es de 1140 mm. Según la Estación Meteorológica – Campamento Definitivo.

Por otra parte, la minería por ser una actividad extractiva deja sin cobertura vegetal zonas fácilmente erosionables, trayendo consigo la problemática de la erosión hídrica del suelo y el transporte de sedimentos. Esto origina que los embalses se llenen de sedimentos, disminuyendo su capacidad y vida útil.

En la presente investigación se consideran como medidas de control al tratamiento del agua de escorrentía superficial y a la eficiente dosificación con coagulante y floculante de esta.

La estimación de la producción de sedimentos se realiza con procedimientos que se basan en medición y otros en modelación matemática. Y estos a su vez se dividen en empíricos, estocásticos y de simulación de procesos físicos.

Para la estimación de la erosión hídrica se hace uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) o Universal Soil loss Equation (USLE), la cual fue desarrollada por Wischmeier y Smith en 1956. Por su parte, los métodos de simulación de procesos físicos, en cuanto a precisión son mucho mejores, pero a su vez se han visto limitados, debido a que requieren una gran cantidad de datos para su uso.

El coeficiente de entrega de sedimentos (CES) o Sediment Delivery Ratio (SDR) se utilizó para poder estimar en qué proporción de lo erosionado es lo que llega a sedimentarse en un punto específico del área de estudio. Es decir, determinar la producción de sedimentos conociendo su erosión. Lo anterior hace alusión de que no todo el suelo que es erosionado por efecto de la precipitación ingresa a la red de drenaje, es decir que solo un cierto porcentaje de este es el que es transportado por los cursos de agua. La colmatación en pozas de sedimentación provoca la pérdida del volumen efectivo de almacenamiento de agua y a su vez poniendo en peligro la estructura al aumentar la carga estática, es por esto que se debe de frenar la entrada de sedimentos hacia las pozas colectoras, mediante tratamientos físicos (desarenador) y químicos (coagulación y floculación).

1.1. PROBLEMA

Durante la estación húmeda (oct-abr), hay una gran cantidad de sedimentos transportados producto de las precipitaciones que caen sobre áreas con poca o escasa cobertura vegetal y que luego son transformados en escurrimiento superficial para ser conducidos por los canales perimétricos hacia el desarenador y posteriormente a las pozas de sedimentación.

Debido a que no se conoce la cantidad de agua cargada de sedimento producto de la escorrentía superficial, no se le puede hacer el control de sedimentos a ésta a través de su tratamiento, el cual consiste en dosificar con coagulante y floculante al agua para reducir su concentración y que esta sea retenida en el desarenador que se ubica a unos metros antes de las pozas sedimentadoras.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Es necesario la identificación de los lugares más propensos a ser erosionados, así como la estimación del material que es transportado por escorrentía superficial producto de la erosión hídrica en periodos de precipitación pluvial, para que de esta manera se tome las medidas de control necesarias y reducir la cantidad de sedimentos que ingresa a las pozas de sedimentación.

Al conocer la cantidad de sedimento que ingresa por el canal hacia el desarenador y posteriormente a las pozas sedimentadoras, se podrá planificar el momento adecuado para su mantenimiento y limpieza.

Se dará mayor eficiencia en el uso de aditivos químicos, (coagulante y floculante), para acelerar la precipitación de sólidos en suspensión y que estos sean retenidos en su mayoría en el desarenador, antes de su ingreso hacia las pozas sedimentadoras, logrando de esta manera alargar la vida útil de las pozas.

Se busca lograr la eficiencia en el uso de aditivos, reducir costos y horas hombre.

1.3. ALCANCES

Dada la naturaleza de la investigación aquí propuesta, esta puede ser reproducida para muchos escenarios en donde se busque tener un control del agua de escorrentía que ingresa hacia sus estructuras de sedimentación. Además, que sirva como base para futuras investigaciones relacionadas a la erosión hídrica, transporte y control de sedimentos.

1.4. OBJETIVOS

Objetivo General

- Controlar la sedimentación para reducir la colmatación de las pozas de sedimentación en áreas de operaciones mineras.

Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros geomorfológicos de la microcuenca de estudio.
- realizar el análisis de variable extrema de la estación base.
- realizar la transferencia de información de tormentas.
- determinar los caudales de diseño.
- Estimar la erosión hídrica a través de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE).
- Estimar la producción y transporte de sedimentos.
- determinar la dosificación óptima para el tratamiento de agua de escorrentía superficial.

1.5. HIPÓTESIS

Para reducir la colmatación de las pozas de sedimentación es necesario conocer la cantidad de sedimento que ingresa, con lo que se conseguirá dar un adecuado manejo en el tratamiento de esta, antes de su ingreso a las pozas sedimentadora.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Internacionales

En México – Querétaro, en el 1° Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología, llevado a cabo en agosto del 2015, se presentó el artículo titulado “Relación entre Erosión Media y Transporte de Sedimentos en una Cuenca de Alta Pendiente”. El cual muestra un estudio comparativo de transporte de sedimentos tanto en régimen fluvial y régimen torrencial y su relación con lo erosionado para la cuenca del río Las Cruces, en el Estado de México. Cabe mencionar que el río Las cruces es de especial interés por sus características que posee las cuales son alta pendiente y los marcados cambios de uso de suelo en su cuenca de aporte, que en combinación con fuertes precipitaciones provoca el arrastre de grandes cantidades de sedimentos.

La cuenca en estudio tiene 18.76 km², tiene una altitud que varía de 4,300 m.s.n.m. A 2,757 m.s.n.m. Con una longitud del cauce principal de 12.48 km, una pendiente media del cauce de 11.45%, con un módulo de precipitación media anual de 1100 mm. Y una temperatura que oscila de 4 – 12°C.

Para lo cual primero estima la erosión del suelo mediante la ecuación universal de pérdida de suelo revisada, (RUSLE), por sus siglas en inglés, posteriormente estima el transporte de sedimentos. Con el modelo de (Mora et al., 1990) se estima la tasa de transporte de sedimentos en régimen fluvial del caudal líquido para un período de retorno de 2 años, con los modelos de (O’brien et al., 1985) y el Modelo de Bagnold 1980. Se estima la tasa de transporte en régimen torrencial

Como resultados del cálculo de la erosión se obtuvieron que la erosión media unitaria fue de 45.19 t/ha/año, la tasa de entrega de sedimentos fue de 1.13 kg/s; la tasa de transporte de sedimentos en masa en régimen fluvial fue de 0.42 kg/s. haciendo una relación entre la tasa de entrega y la tasa de transporte se obtuvo 0.37 lo cual quiere decir que 37% es la tasa de transporte de sedimentos de fondo. Luego para régimen torrencial se obtuvo que la tasa de transporte de sedimento en masa fue de 4.72 kg/s, haciendo una relación entre la tasa de entrega y la tasa de transporte para este régimen se obtuvo 4.17, lo cual quiere decir que la tasa de transporte de sedimento representa el 417% del aporte total de la erosión. Por última se hace una comparación de las tasas de transporte de sedimentos para los regímenes mencionados dando como resultado

11.24 lo cual quiere decir que la tasa de transporte de sedimentos hiperconcentrados es de 11 veces mayor.

Como conclusiones de esta investigación indica que el aporte de sedimentos podría definirse como la relación directa entre la capacidad de transporte y la disponibilidad de sedimentos. Para cauces de alta pendiente, la capacidad de transporte es inherente al cauce, así como la disponibilidad de sedimentos lo es a la cuenca de aporte. (MENDOZA et al. 2015)

En México se presenta el artículo titulado “Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México” presentado en la revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. El presente artículo trata sobre la pérdida de suelo por erosión hídrica lo cual disminuye la calidad y cantidad del agua que capta la presa Madín a través de su microcuenca. Además, menciona que el cambio de uso de suelo está repercutiendo en el aumento de sedimentos en la presa. Por otra parte, hace una proyección futura para evaluar cuáles serían las consecuencias que tendrían que ver en el mal manejo del suelo con respecto a la presa.

El área de estudio está comprendida por el cauce principal, Río Tlalnepantla, el cual tiene una longitud de 23.87 km. La microcuenca tiene un área de 99.93 km², un perímetro de 59.92 km, con altitudes que varían de 2333 m.s.n.m. a 3542 m.s.n.m. con una temperatura media de 10.24 °C, con un módulo de precipitación media anual de 1090.4 mm, con una pendiente media de 16.067 % y seis unidades edafológicas: andosol, cambisol, durisol, luvisol, pheozem y regosol. El principal uso de suelo es el forestal, seguido del urbano y pequeñas áreas de suelo agrícola.

Esta investigación se basó en el uso de la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS), para lo cual se necesitó un raster o modelo de elevación digital (MDE), de la zona en estudio, con una resolución de 10 m. por pixel, para el caso de las precipitaciones se elaboraron raster de isoyetas medias anuales y para determinar el cambio de uso de suelo y vegetación se usó una imagen satelital LandSat 7 ETM+ tomadas en febrero del 2008. con esta información se procedió a determinar todos los parámetros de la EUPS y su posterior análisis de la erosión.

Como resultados y conclusiones se puede decir que la erosión actual de la microcuenca es de 7.58 t/ha/año lo que se considera como una erosión incipiente, pudiendo llegar hasta 166.6 t/ha/año en caso se perdiera completamente la cobertura vegetal y para

determinar la degradación de la microcuenca de la presa Madín, son necesarios los análisis de calidad del agua, nivel de colmatación de la presa, análisis de degradación química del suelo y estudios socio-económicos para trazar estrategias integrales para la recuperación de la microcuenca. (CASTRO, M. et al., 2013).

Nacionales

En la ciudad de Lima se presentó una tesis para optar por el grado de MSc. en Ingeniería de Recursos Hídricos, titulada “Cuantificación de Flujos Sedimentarios de las Cuencas Amazónicas de Perú” la cual tiene por objeto central cuantificar los flujos sedimentarios de los principales ríos de la cuenca amazónica peruana para el período 2004 – 2009. Además, pretende conocer el grado de incertidumbre tanto en laboratorio como en campo, explorar la distribución espacial de sedimentos en suspensión e implementar una nueva metodología de análisis de sedimentos en suspensión a través de la turbiedad.

El área de estudio es la cuenca amazónica peruana con una superficie de 977 920 km² Con un módulo de precipitación media anual de 1600 mm. (1964-1997), con una altitud promedio de 500 m.s.n.m. Además, se contó con 8 estaciones hidrometeorológicas distribuidas de sur a norte.

Resultados y conclusiones la cuenca amazónica peruana exporta $574 \times 10^6 \pm 36\%$ t/año de sedimentos en suspensión al año, y un caudal de 36 000 m³/s. El río Ucayali aporta la mayor cantidad de sedimentos con 67%, la cuenca del río Marañón 33% y la cuenca el Napo 9%. La parte andina del Perú (ríos Marañón, Huallaga y Ucayali) transporta $385 \times 10^6 \pm 55\%$ t/año. Cabe mencionar que cada valor de flujos sólidos obtenido no lineales y únicos sino más bien variables ya que se añade la incertidumbre lo cual da más valor a los resultados ya que se asemejan a la realidad. Por otro lado, se puede decir que la turbiedad sería una buena opción para el estudio de la variabilidad espacial (experiencia que se añade como perspectiva), y también para la variabilidad temporal ya que se observa que existe una relación entre turbiedad y concentración de material en suspensión. (CÁRDENAS, A. 2010).

En la ciudad de Lima se presentó una tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola, titulada “Modelamiento Geoespacial en la Determinación del Riesgo, Vulnerabilidad y de la Cuantificación de la Erosión Hídrica en la Microcuenca del Río Atuén – Amazonas” la cual tiene por objeto cuantificar la erosión hídrica, utilizando la

ecuación universal de pérdida de suelo mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), de la microcuenca del río Atuén; Identificar las zonas críticas de erosión mediante el Modelamiento Geoespacial y proponer alternativas de protección para las afectadas por la erosión hídrica.

Resultados y conclusiones el procesamiento de variables con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (RUSLE) utilizando imágenes de satélite y procesadas mediante el Sistema de Información Geográfica, nos permitió estimar la pérdida de suelo dentro de la microcuenca del río Atuén. Obteniendo, un área de 16222.5 ha con una pérdida de 0.6407 t/ha-año, 12036.5 ha una pérdida de 2.3491 t/ha-año, 6227 ha una pérdida de 4.9118 t/ha-año, en 2295.3 ha una pérdida de 8.9161 t/ha-año y en 399.9 ha una pérdida de 19.32 t/ha-año de suelo. Teniendo en cuenta la clasificación de la FAO se puede decir que gran parte del territorio se encuentra con un grado de erosión de ligero a moderado ya que presentan valores menores a 50 t/ha-año. Mediante el modelamiento geoespacial con las variables más incidentes e importantes se obtuvo las zonas vulnerables a erosión hídrica de la microcuenca del río Atuén, clasificadas en tres rangos: alto con un área de 4003.4 ha abarcando un 10.7% del territorio, medio con un área 17048.4 ha abarcando un 45.4% del territorio y bajo con 16463.4 ha abarcando un 43.8% del territorio e la microcuenca Atuén. Se debe priorizar proyectos de prevención a futuro, para las zonas con mayor riesgo a ser erosionadas, como es la parte más alta de la microcuenca y las riveras de los ríos; en las zonas más elevadas se tendría en cuenta realizar proyectos de reforestación ya que la cobertura vegetal es poco densa, mientras que en las zonas cercanas al río se construirían diques para el control de cárcavas y construcción de andenes para la agricultura, ya que estas zonas presentan pendientes más pronunciadas. (CABREJOS, M. 2016).

Locales

En la ciudad de Lambayeque se presentó una tesis para optar el título de Ingeniero Agrícola, titulada “Sedimentación y Colmatación en el Embalse Gallito Ciego, Distrito de Yonán - Cajamarca” la cual tiene por objeto describir la sedimentación y el proceso de colmatación de los sólidos transportados por los cauces en el embalse del Gallito Ciego desde el inicio de operación.

Resultados y conclusiones la presa tiene un volumen actual de 452.03 MMC. Cuya vida útil se diseñó para 50 años y el volumen promedio de sedimento es de 4.210

MMC/año; el costo de descolmatación por año sería de 380 millones de dólares. De esta evaluación se determinó que el río Puchush es el que contribuye con el 70% de caudal de ingreso al embalse. (TIRADO, K. 2014).

2.2. BASES TEÓRICAS

Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica es un área natural en la que el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua. La cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o ‘divisoria de aguas’ se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río” (RAMAKRISHNA, 1997).

Cuenca hidrológica

La cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida para cada punto de su recorrido. (VILLÓN, M. 2011).

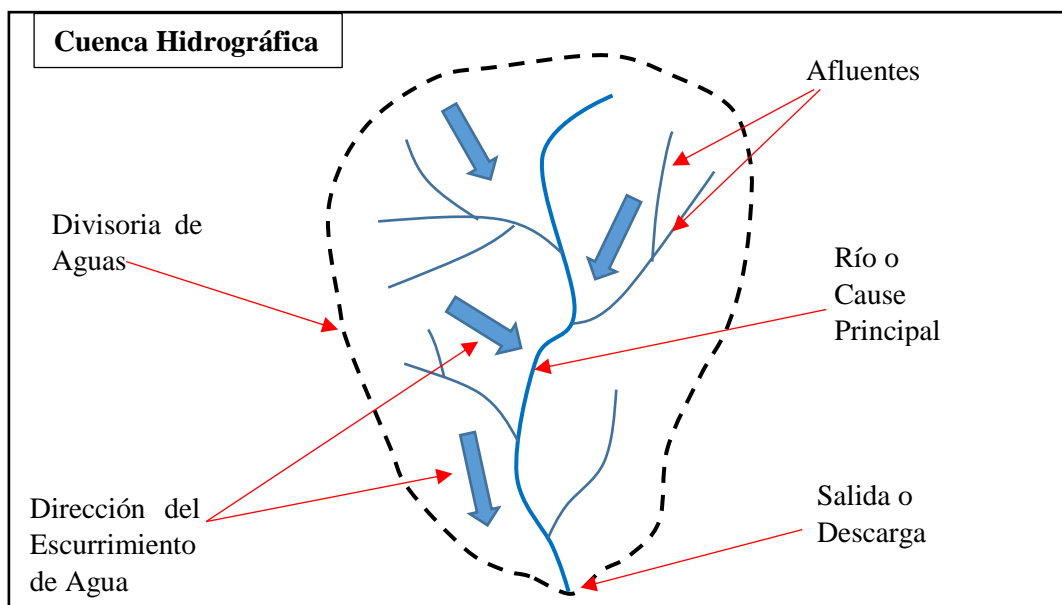


Figura 1: Cuenca Hidrográfica

Partes de una cuenca

Una cuenca altoandina consta de tres partes, altas medias y bajas.

- **Partes altas:** Estas partes comprenden altitudes superiores a los 3,000 metros sobre el nivel del mar, llegando en algunos casos hasta los 6,500 msnm. En tales

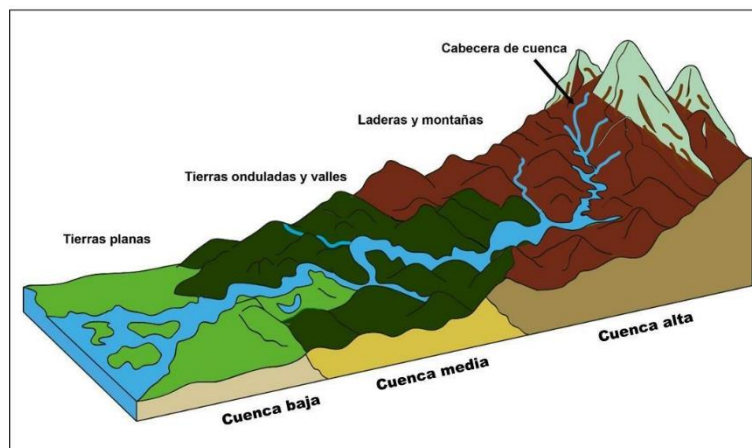
áreas se concentra el mayor volumen de agua ya sea en forma de nevados o de lluvia, dado que allí la precipitación pluvial es intensa y abundante; es frecuente asimismo la formación de nevados. La topografía de estas zonas es sumamente accidentada y escarpada; en consecuencia, *su potencial erosivo es sumamente alto*. La precipitación total anual promedio alcanza los 800 hasta 1,600 mm por año; pero al mismo tiempo en estas zonas se encuentra un gran potencial con recursos mineros. También se les llama cabeceras de cuencas.

- **Partes medias:** Son las comprendidas entre los 800 y 3000 msnm. Las precipitaciones promedio que caen en estas zonas varían entre los 100 – 800 mm/año. En estas zonas están los valles interandinos, caracterizados por el clima benigno y variado. La función de estas partes de la cuenca está relacionada fundamentalmente con el escurrimiento del agua.
- **Partes bajas:** Abarcan desde el nivel del mar hasta los 800 msnm. La precipitación promedio que cae en la zona es muy escasa (< 100 mm/año), su pendiente es igualmente baja. En este ámbito están los amplios valles costeros. (VÁSQUEZ et al., 2016).

Figura 2: Esquema donde se muestran las partes de la cuenca hidrográfica.

Fuente: Adaptado por (VÁSQUEZ et al., 2016).

División de una cuenca hidrográfica



Es un tema de permanente discusión y considera como punto de partida para el análisis al grado de ramificación de los cursos de agua que puedan existir así por ejemplo se pueden considerar como micro cuencas a los cursos de agua de primer, segundo y tercer orden; a sub cuencas, los cursos de agua de cuarto y quinto orden

y a cuencas los cursos de agua de sexto orden y más. Una excepción a este criterio de división es la cuenca del río Amazonas, ya que sus subcuencas son realmente cuencas si nos basamos en el criterio de su superficie. Es decir que para dividir una cuenca se debe de hacer con criterio técnico práctico. (VÁSQUEZ et al., 2016).

Tabla 1: División de una cuenca en base a su superficie.

Unidad Hidrográfica	Área (miles de has)
Cuenca	> 50
Subcuenca	may-50
Microcuenca	< 50

Fuente: Adaptado por (Vásquez, A. et al., 2016).

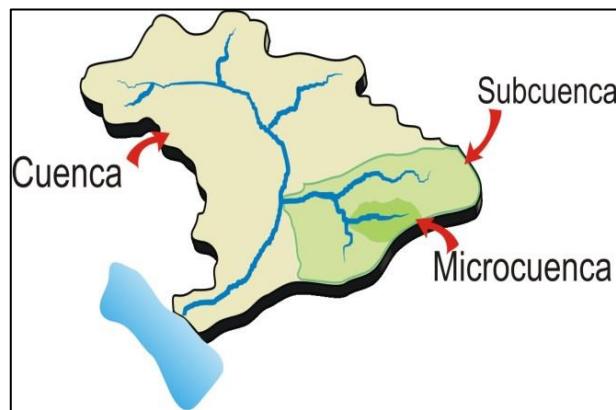


Figura 3: Cuenca, Subcuenca y Microcuenca.

Fuente: Adaptado por (CASA VERDE, 2011).

Características y/o parámetros físicos de una cuenca

a. Área de drenaje

El área de drenaje (A) es la superficie, en proyección horizontal, delimitada por la divisoria de aguas. La divisoria de aguas es una línea imaginaria que pasa por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de estudio de otras cuencas vecinas. Debe tenerse en cuenta que esta línea no es en general el contorno real de la cuenca, ya que la influencia de la geología puede hacer que el contorno de aportación de aguas subterráneas y sub-superficiales sea distinto del superficial. (NANÍA, L. 2003).

b. Parámetros de forma

La forma de una cuenca hidrográfica también desempeña un papel importante en su comportamiento hidrológico. A partir de la comparación de cuencas con características semejantes, identificamos que las cuencas con forma más circular presentan una tendencia de generar picos de creciento más elevados en relación a cuencas alargadas. Las cuencas circulares presentan diversos drenajes con extensiones semejantes, y así el recorrido de los escurrimientos es más corto generando respuestas más rápidas y concentradas a eventos de lluvia. Ya las cuencas más alargadas, en general, presentan un río principal con diversos tributarios menores donde las aguas tienen que recorrer un camino más largo hasta el exutorio. De este modo, tiende a presentar crecientes más distribuidas con menor caudal de pico. (VILLELA et al., 1975).

Los parámetros que miden la forma de la cuenca son el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius y el factor de forma.

- Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (k_c)

Este coeficiente relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de iguala área que la cuenca

$$K_C = \frac{\text{peri.cuenca}}{\text{peri.círculo}} = 0.282 \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad (1)$$

Dónde:

P: Perímetro de la cuenca (Km.)

A: Área de la cuenca (Km²)

Cabe mencionar que mientras más alto sea el valor del índice de Gravelius más irregular será la cuenca.

- Factor de forma (k_f)

Este factor relaciona el ancho medio de la cuenca con respecto a la longitud del cauce principal.

$$K_f = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2} \quad (2)$$

Dónde:

B: Ancho medio de la cuenca (Km.)

L: longitud del cauce principal (Km.)

A: Área de la cuenca (Km²)

Tabla 2: Formas geométricas en base a rangos de valores del índice de Gravelius.

Clase de geometría	Rango de clase	Forma de cuenca
K _{c1}	1 < K _C ≤ 1.25	Oval redonda
K _{c2}	1.25 < K _C ≤ 1.50	Oval oblonga
K _{c3}	1.50 < K _C ≤ 1.75	Oblonga alargada

Fuente: Adaptado de (HENAO, J. 1988)

c. Parámetros de relieve

Dentro de este parámetro tenemos a la pendiente media de la cuenca, histograma de frecuencias altimétricas, curva hipsométrica, alturas características, a la pendiente del cauce principal y al rectángulo equivalente.

- **Pendiente media de la cuenca:** se calcula mediante la siguiente expresión.

$$S = \frac{DL_L}{A} \quad (3)$$

Dónde:

L_L: Es la longitud total de todas las curvas de nivel que están dentro de la cuenca (Km)

D: Es la equidistancia entre curvas de nivel (Km.)

A: Área de la cuenca (Km²)

- **Histograma de Frecuencias Altimétricas:** Representa el grado de incidencia de las áreas comprendidas entre curvas de nivel con respecto al total del área de la cuenca.

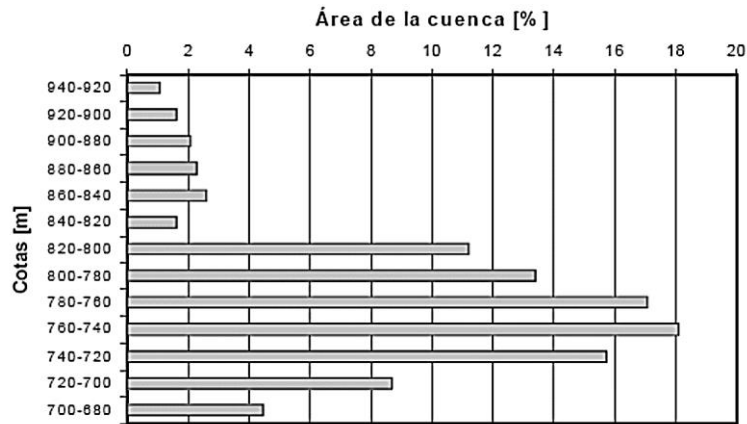


Figura 4: Representación de un Histograma Frecuencias de altitudes.

Fuente: Conceptos Básicos de Hidrología, Balance Hídrico, (CATIE, 2009)

- **Curva hipsométrica:** es la representación gráfica del relieve de una cuenca. Una curva hipsométrica puede darnos algunos datos sobre las características fisiográficas de la cuenca.

Una curva hipsométrica con concavidad hacia arriba indica una cuenca con valles extensos y cumbres escarpadas y lo contrario indicaría valles profundos y sabanas planas. (NANÍA, L. 2003).

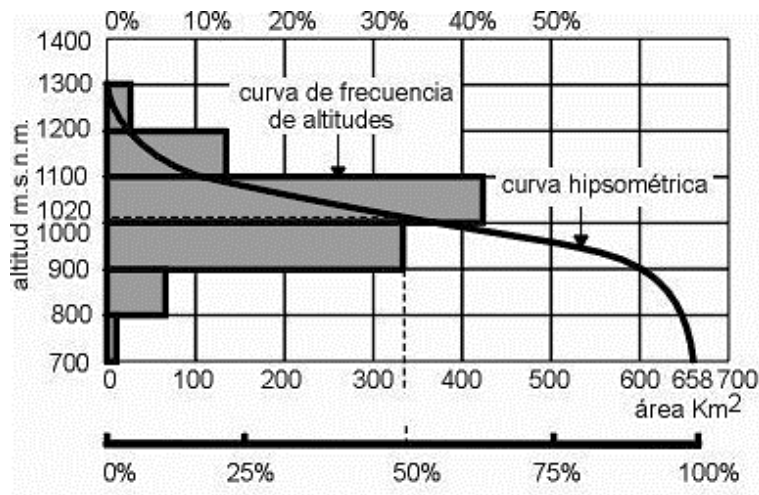


Figura 5: Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes.

Fuente: Hidrología, (VILLÓN, M. 2011).

Del anterior se define a las curvas características

- **Alturas características**

La altura media Es la ordenada media de la curva hipsométrica, en ella el 50% del área de la cuenca, está situado por encima de esa altitud y el 50% está situado por debajo.

La altura más frecuente: Es al máximo valor en porcentaje de la curva de frecuencia de altitudes.

Altitud de frecuencia media: Es la altitud correspondiente al punto de abscisa media de la curva de frecuencia de altitudes.

Numéricamente la elevación media de la cuenca se obtiene con la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{\sum ae}{A} \quad (4)$$

Dónde:

E_m : Es la elevación media de la cuenca (Km)

a : Es el área entre curvas de nivel (Km²)

e : es la equidistancia (Km)

- **La pendiente del cauce principal**

De esta acepción se desprenden otras como son la pendiente media y la pendiente equivalente:

$$S_m = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{L} \quad \Rightarrow \quad S_{eq} = \left[\frac{L}{\sum \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2 \quad (5)$$

Dónde:

S_m : pendiente media del cauce principal (%)

$H_{m\acute{a}x}$: cota máxima (km)

$H_{m\acute{i}n}$: cota mínima (km)

L : es la longitud del cauce principal (km)

S_{eq} : pendiente equivalente (%)

L_i : son las longitudes de los n tramos del cauce principal considerados (km)

S_i : son las pendientes de dichos tramos (%)

- Rectángulo equivalente

El rectángulo equivalente es una transformación geométrica, que permite representar a la cuenca, de su forma heterogénea, en la forma de un rectángulo, que tiene la misma área y perímetro (y por lo tanto el mismo índice de compacidad o índice de Gravelius). En este rectángulo, las curvas de nivel se convierten en rectas paralelas al lado menor, siendo estos lados, la primera y última curvas de nivel.

Se calcula de la siguiente manera:

$$Lm = \frac{K_C}{1.12} \sqrt{A} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \quad (6)$$

$$lm = \frac{K_C}{1.12} \sqrt{A} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_C} \right)^2} \right] \quad (7)$$

Dónde:

Lm: longitud del lado mayor del rectángulo (km)

lm: longitud del lado menor del rectángulo (km)

K_C : índice de Gravelius

A: área de la cuenca (km²)

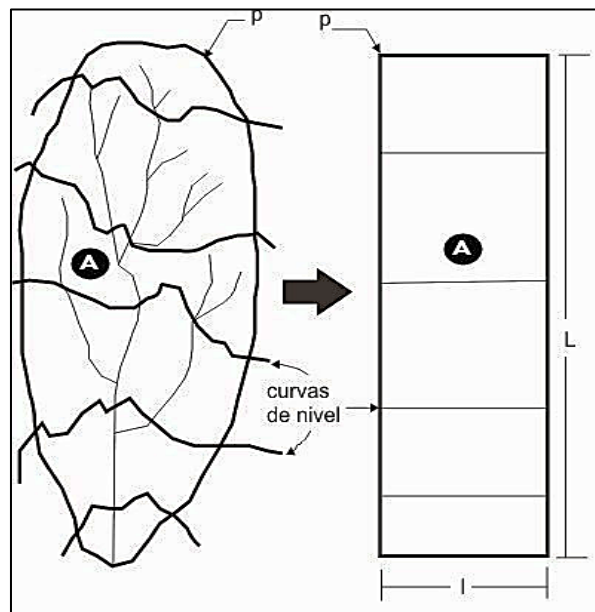


Figura 6: Transformación de una cuenca en un rectángulo.

Fuente: Hidrología, (Villón, M. 2011).

d. Parámetro de la red de drenaje

La forma en que estén conectados los canales en una cuenca dada, influye en la respuesta de ésta a un evento de precipitación. (ORDOÑEZ, J. 2011).

- Orden de la cuenca

Permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden se relaciona con el caudal relativo del segmento de un canal. Hay varios sistemas de jerarquización, siendo los más utilizados el de HORTON, (1945) y el de STRAHLER, (1952).

Por el Método de Horton (1945), se realiza a través de las siguientes premisas:

Los cauces de primer orden son los que no tienen tributarios.

Los cauces de segundo orden se forman en la unión de dos cauces de primer orden y, en general, los cauces de orden n se forman cuando dos cauces de orden n-1 se unen.

Cuando un cauce se une con un cauce de orden mayor, el canal resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los órdenes.

El orden de la cuenca es el mismo del su cauce principal a la salida.

En esa investigación solo se usará el método de Horton

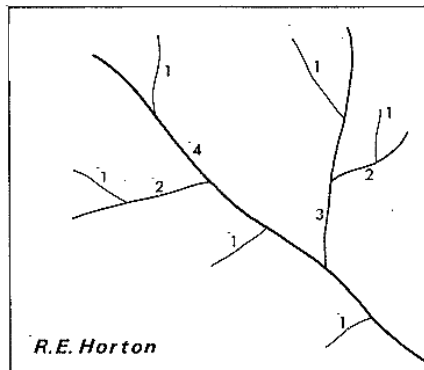


Figura 7: Transformación de una cuenca en un rectángulo.

Fuente: Hidrología, (VILLÓN, M. 2011).

- **Densidad de drenaje (D)** La densidad de drenaje se define como la relación entre la longitud total de los cursos de agua de la cuenca y su área total.

$$D = \frac{\sum L_i}{A} \quad (8)$$

Dónde:

L_i : longitud del cauce y tributarios (km)

A: área de la cuenca (km²)

Strahler en 1952 encontró en Estados Unidos valores de D desde 0,2 Km/Km² para cuencas con drenaje pobre hasta 250 Km/Km² para cuencas muy bien drenadas. (NANÍA, L. 2003).

Tabla 3: Clasificación de densidad de drenaje (D) de una cuenca.

D (km/km²)	Denominación
< 0.50	Baja
0.50 – 2.00	Media
2.01 – 3.50	Alta
> 3,50	Muy Alta

Fuente:(BELTRAME, A. 1994)

Transferencia de información hidrometeorológica entre sistemas hidrológicos

Para considerar que dos sistemas hidrológicos tienen semejanza hidráulica es necesario que estos cumplan con condiciones de semejanza. (ORTIZ, O. 2015).

En su investigación titulada “Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica” encontró que los parámetros como el de índice de Gravelius, relación de confluencias y el coeficiente orográfico son suficientes para considerar la similitud siempre y cuando el valor de cada parámetro mencionado tenga cierta aproximación numérica o igualdad entre los sistemas estudiados.

Relación de confluencia

Por la influencia que ejerce en la configuración espacial de la red de drenaje, se considera que la relación de confluencias promedio es un buen referente de la similitud cinemática de los sistemas hidrológicos.

$$r_c = \frac{n_i}{n_{i+1}} \quad (9)$$

Dónde:

n_i : número de cursos naturales de orden i .

r_c : relación de confluencias parcial.

n_{i+1} : número de cauces de orden inmediatamente superior a i ($i = 1, 2, 3, \dots, N-1$).

$$R_c = \frac{1}{n} \sum_i^n r_{ci} \quad (10)$$

Dónde:

n: Número de relación de confluencias parciales calculadas.

r_{ci} : cada uno de los “n” valores parciales.

R_c : relación de confluencias promedio.

Cabe mencionar que la categorización de la red de drenaje se está usando el método de Horton

Coefficiente orográfico

Se obtiene al dividir la altura media de la cuenca al cuadrado sobre su área. (MARTONNE, E. 1940).

$$C_o = \frac{H_m^2}{A} \quad (11)$$

Dónde:

C_o : coeficiente de orografía (%).

H_m : altura media de la cuenca (km).

A: área de la cuenca (km²).

Función de transferencia de intensidades de precipitación

$$I_d = \left(\frac{H_d}{H_0}\right) \left(\frac{t_0}{t_d}\right) I_0 \quad (12)$$

Donde:

I_d = Intensidad de precipitación en la cuenca destino.

I_o = Intensidad de precipitación en la cuenca de origen.

t_e = Escala de períodos de duración.

H_0 = Altura en la cuenca de origen.

H_d = Altura de destino.

Funciones de distribución de probabilidades

Probabilidad

Sea S un espacio muestral asociado a un experimento, y A cualquier suceso de S , tal que A es un subconjunto de S , se dice que la probabilidad de $P(A)$ de un evento A , es un experimento aleatorio que tiene N_s resultados igualmente posibles y N_a resultados favorables, está dado por:

$$P(A) = \frac{N_a}{N_s} \quad (13)$$

Además, se puede decir que $0 \leq P(A) \leq 1$ y $P(S) = 1$

(CAHUANA et al., 2009).

Período de retorno

El Período de Retorno T , se define como el tiempo o lapso promedio entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada, dicho de otra forma, es el intervalo de recurrencia promedio para un cierto evento.

Estadísticamente el Período de Retorno es la inversa de la probabilidad de excedencia, es decir:

(CAHUANA et al., 2009).

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} \quad (14)$$

Tabla 4: Guía para la selección de los períodos de retorno.

No.	Tipo de proyecto o obra	Período de retorno (años)
1	Drenaje urbano [bajo riesgo] (hasta 100 ha)	5 a 10
2	Drenaje urbano [mediano riesgo] (más de 100 ha)	25 a 50
3.	Drenaje vial	25 a 50
4	Aliviadero principal (presas)	25 a 100
5	Drenaje vial	50 a 100
6	Diques longitudinales [mediano riesgo]	50 a 100
7	Drenaje urbano [alto riesgo] (más de 1,000 ha)	50 a 100
8	Desarrollo de zona de inundación	100
9	Diseño de puentes (pilares)	100 a 500
10	Diques longitudinales [alto riesgo]	200 a 1000
11	Aliviadero de emergencia (presas)	100 a 10,000 (PMP)
12	Hidrograma de borde libre [para una presa de clase (c)]	10,000 (PMP)

Fuente: https://ponce.sdsu.edu/períodos_de_retorno_articulo.html

Distribución normal

También denominada distribución gaussiana. Se dice que una variable aleatoria X tiene una distribución normal, cuando su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (15)$$

Dónde:

$f(x)$: función de densidad de la variable x .

x : variable independiente.

μ = parámetro de localización, igual a la media aritmética de x .

S = parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x .

σ = parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x .

Distribución Gumbel

Derivando la función de distribución acumulada, con respecto a x , se obtiene la función de densidad de probabilidad, es decir:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (16)$$

$$f(x) = \alpha e^{\left[\pm \alpha(x-\beta) - e^{\pm \alpha(x-\beta)}\right]} \quad (17)$$

Para $-\infty < x < +\infty$,

El signo (+) se aplica para valores mínimos y el signo (-) se aplica para valores máximos (distribución Gumbel o Tipo I).

Si se hace la transformación:

$$Y = \alpha(x - \beta) \quad (18)$$

Con lo cual, la función densidad reducida es:

$$f(y) = e^{\left(\pm y - e^{\pm y}\right)} \quad (19)$$

El signo (+) se emplea para eventos mínimos y el signo (-) para eventos máximos.

La función de distribución acumulada es:

$$F(y) = e^{-e^{-y}} \rightarrow (\text{Máximo}) \quad F(y) = 1 - e^{-e^y} \rightarrow (\text{Mínimo}) \quad (20)$$

$$F(y)_{\min} = 1 - F(-y)_{\max} \quad (21)$$

Los valores correspondientes de x e y , están relacionadas por: $F(x) = F(y)$ y la relación:

$$Y = \alpha(x - \beta) \quad \text{O} \quad x = \beta + \frac{y}{\alpha} \quad (22)$$

- **Método de Gumbel (valor extremo tipo 1)**

El método de Gumbel se utiliza para predecir magnitudes máximas de variables hidrológicas asumiendo que estos valores son independientes entre sí, también son usadas frecuentemente para el estudio de magnitud - duración - frecuencias de lluvias. (PAULET et al., 1974).

Este método es adecuado cuando se utiliza como datos las descargas máximas anuales en un punto de control de una vertiente o un Río.

Prueba de Smirnov Kolmogorov

Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D que hay entre la función de distribución observada $F_o(P_m)$ y la estimada $F(P_m)$

$$D = \text{máx}|F_o(P_m) - F(P_m)| \tag{23}$$

Con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionada si $D < d$, se acepta la hipótesis. Esta prueba tiene la ventaja sobre la X^2 de que compara los datos con el modelo estadístico sin necesidad de agruparlos. La función de distribución de probabilidad observada se calcula como:

$$F_o(P_m) = 1 - \frac{m}{n + 1} \tag{24}$$

Donde m es el número de orden del dato X_m en una lista de mayor a menor y n es el número total de datos.

Valores críticos para la prueba Smirnov –Kolmogorov de bondad de ajuste

Tabla 5: Valores críticos para la prueba Smirnov –Kolmogorov de bondad de ajuste.

Tamaño de la muestra	a= 0.10	a = 0.05	a = 0.01
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.30	0.34	0.40
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
31	0.22	0.24	0.29
40	0.19	0.21	0.25
N grande	$1.22/\sqrt{n}$	$1.36/\sqrt{n}$	$1.63/\sqrt{n}$

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/87838860/HIDROLOGIA>

Tormentas de diseño

Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)

Son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno. (TÉMEZ, J. 1978).

Junto con la definición de las curvas, surgen otros elementos a considerar, como son la intensidad de precipitación, la frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento. Por ello, es de suma importancia tener claro el concepto de cada una de estas variables, de modo de tener una visión más clara de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.

En este sentido, se debe destacar que la intensidad, se define como la tasa temporal de precipitación, o sea, la profundidad por unidad de tiempo (mm/hr). (CHOW et al., 1994). Y ésta se expresa como:

$$i = \frac{p}{Td} \quad (25)$$

Donde:

p: es la precipitación en mm. o pulg.

Td: es el tiempo en hr.

Tiempo de concentración (Tc)

Este se puede estimar como el tiempo que tarda en salir una gota de lluvia que cae en el punto más alejado de la cuenca y que es arrastrada por el flujo hasta la sección de salida de la cuenca.

Además, debe tenerse en claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante.

Aunque muy ligeramente depende, de la intensidad y la precipitación. (MARCO et al., 1992).

Tabla 6: Fórmulas para el tiempo de concentración.

MÉTODO Y FECHA	FÓRMULA PARA t_c (minutos)	OBSERVACIONES
Kirpich (1940)	$t_c = 0.01947.L^{0.77}.S^{-0.385}$ <p>L = longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m. S = pendiente promedio de la cuenca, m/m</p>	Desarrollada a partir de información del SCS en siete cuencas rurales de Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10%); para flujo superficial en superficies de concreto o asfalto se debe multiplicar t_c por 0.4; para canales de concreto se debe multiplicar por 0.2; no se debe hacer ningún ajuste para flujo superficial en suelo descubierto o para flujo en cunetas.

Fuente: USDA - National Engineering Handbook Hydrology, 2010 cap. 15.

Adaptado del Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje – MTC.

Escorrentía

Se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. (APARICIO, F. 1997).

- **Escurrimiento superficial**

Se define como el flujo de agua proveniente de las precipitaciones que circula por gravedad sobre el terreno y luego por los cauces.

- **Escurrimiento subsuperficial**

Escurrimiento subsuperficial o hipodérmico es aquél que luego de infiltrarse una determinada cantidad en el perfil del suelo, se manifiesta escurriendo en la primera capa del suelo, y en algunos casos, vuelve a aparecer en superficie, sumándose al superficial. Este tipo de escurrimiento tiene una velocidad de conducción lenta.

- **Escurrimiento subterráneo**

Es aquel que proviene del agua subterránea, la cual es recargada por la parte de la precipitación que se infiltra, una vez que el suelo se ha saturado. El escurrimiento subterráneo y la parte retardada del escurrimiento subsuperficial constituyen el escurrimiento base de los ríos.

- **Escurrimiento directo o escorrentía directa**

El escurrimiento directo está integrado por la precipitación en los cauces, flujo sobre el terreno y escurrimiento subsuperficial.

- **Escorrentía base o escorrentía base**

El escurrimiento base, está constituido por el escurrimiento subterráneo y el escurrimiento subsuperficial de lento drenaje. (CAHUANA et al., 2009).

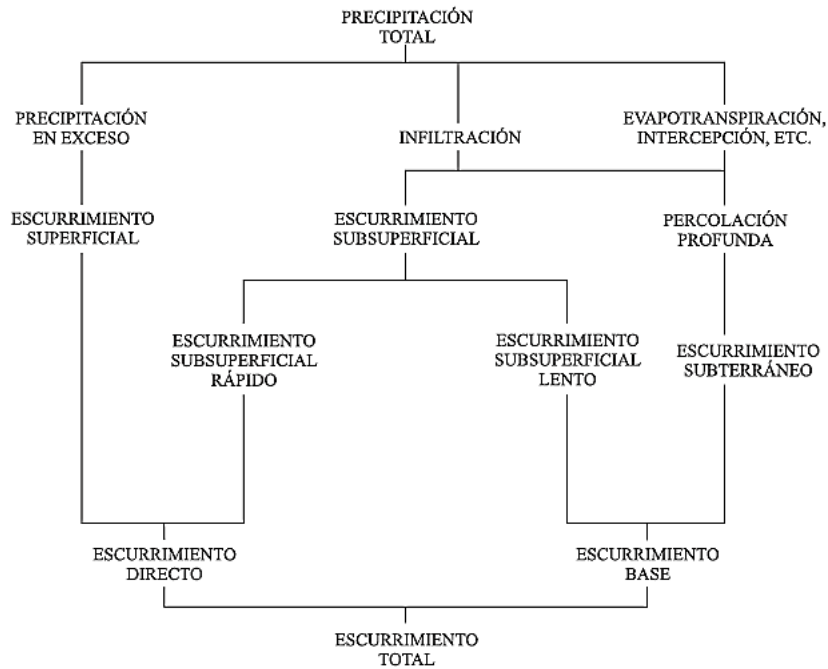


Figura 8: Representación gráfica del proceso de precipitación escorrentía.

Fuente:(CAHUANA et al., 2009).

Método racional

El método racional es un modelo de *precipitación – escorrentía*, que se clasifica como un *método empírico* y que es muy usado cuando no se cuenta con registro hidrométrico es decir con aforos de corrientes de agua.

El método racional consiste en que a partir de la precipitación obtener el caudal en un determinado punto de un río. Además, este método es muy usado en diseños de drenaje.

Se representa de la siguiente manera:

$$Q = \frac{CIA}{360} \tag{26}$$

Donde:

Q: es el caudal máximo (m³/s).

C: es el coeficiente de escorrentía (adim.).

I: intensidad de precipitación (mm/h).

A: Es el área de la cuenca (Ha).

Coefficiente de escorrentía (C)

Se podría afirmar que el coeficiente de escorrentía es el menos preciso de la fórmula del método racional y este representa la relación del volumen de escorrentía superficial respecto al volumen precipitado, es decir este factor simboliza la fracción de agua de la precipitación pluvial.

Se representa de la siguiente manera.

$$C = \frac{VES}{VP} \text{ o también } C = \frac{\sum_i^n C_i A_i}{\sum_i^n A_i} \quad (27)$$

Donde:

C: es el coeficiente de escorrentía (adim.).

VES: es el volumen de escorrentía superficial (m³).

VP: es el volumen de precipitación pluvial total (m³).

C_i: Coeficiente de escorrentía en una sub área de la cuenca (adim.).

A_i: Porción del área de la cuenca que contiene un determinado tipo de cobertura (km²).

La segunda expresión se utiliza cuando el área en estudio está constituida con diferentes tipos de cobertura y superficie, por lo que el coeficiente de escorrentía se obtiene sacando un promedio ponderado. (CAHUANA et al., 2009).

Tabla 7: Coeficientes de escorrentía.

Tipo de superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Zonas urbanas							
Asfalto	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95	1,00
Cemento, tejados	0,75	0,80	0,83	0,88	0,92	0,97	1,00
Zonas verdes (céspedes, parques, etc.)							
<i>Condición pobre (cobertura vegetal inferior al 50% de la superficie)</i>							
Pendiente baja (0-2%)	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,58
Pendiente media (2-7%)	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,61
Pendiente alta (> 7%)	0,40	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55	0,62
<i>Condición media (cobertura vegetal entre el 50% y el 75% del área)</i>							
Pendiente baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Pendiente media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente alta (> 7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
<i>Condición buena (cobertura vegetal superior al 75%)</i>							
Pendiente baja (0-2%)	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36	0,49
Pendiente media (2-7%)	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,56
Pendiente alta (> 7%)	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51	0,58
Zonas rurales							
Campos de cultivo							
Pendiente baja (0-2%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,57
Pendiente media (2-7%)	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51	0,60
Pendiente alta (> 7%)	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54	0,61
Pastizales, prados, dehesas							
Pendiente baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41	0,53
Pendiente media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49	0,58
Pendiente alta (> 7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53	0,60
Bosques, montes arbolados							
Pendiente baja (0-2%)	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39	0,48
Pendiente media (2-7%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47	0,56
Pendiente alta (> 7%)	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52	0,58
Nota: Los valores de esta tabla son los utilizados en la ciudad de Austin (Texas, USA) para determinar caudales punta por el método racional en su término municipal.							

Fuente: (CHOW et al, 1988).

Erosión

En hidrología se define como erosión el desgaste de la superficie terrestre causada por agentes externos como son el viento y el agua; en este trabajo nos centraremos en la erosión causada por el agua.

La erosión es un fenómeno que comprende el desprendimiento y traslado o arrastre de las partículas del suelo por acción del agua, del viento, o de la actividad biológica. Puede ser natural (normal o geológica) cuando se produce por los cambios naturales en el ambiente y en largos períodos geológicos contribuyendo a la formación de los suelos y del relieve terrestre; o acelerada siendo uno de los problemas más serios que tiene que enfrentar cualquier acción encaminada a lograr el desarrollo agropecuario, ya que además de ser la causa de bajos rendimientos de los cultivos, acorta la vida útil de las obras de regulación por la cantidad de sedimentos que acarrea el agua que se almacena colmatando el lecho de los ríos y favoreciendo, en muchos casos las inundaciones, problemas de drenaje y salinización de las tierras. (VÁSQUEZ, A. 2000).

Erosión hídrica

La erosión hídrica es un proceso físico que consiste en el desprendimiento, transporte y sedimentación de las partículas del suelo por efectos de la acción del agua. (NÚÑEZ J., 2001).

La erosión hídrica es un proceso físico definido como el desprendimiento y arrastre de partículas de suelo por acción del agua. Las gotas de lluvia desprenden el suelo y el agua de escorrentía es la encargada de realizar el transporte y la sedimentación. (PAULET et al., 1974).

a. Erosión hídrica por impacto

Los estudios de Huang en 1982 en que se estima que la velocidad local de esos chorros alcanza el doble de la velocidad de caída de las gotas (entre 4 m/s y 9 m/s) dependiendo de su tamaño. Estos chorros de alta velocidad imparten velocidad a algunas partículas de suelo lanzándolas por el aire, contenidas en pequeñas gotas que son formadas por el fraccionamiento de la gota de lluvia en contacto con el suelo. En suma, las gotas de lluvia tienen un efecto de consolidación y dispersión del suelo. (MORGAN et al., 1995).



Figura 9: Impacto de una gota de lluvia en el suelo.

Fuente: (USGS - DDS - 21)

b. Erosión hídrica por escorrentía superficial

El escurrimiento superficial se presenta siempre y cuando haya pendiente en el terreno y el suelo ya esté saturado.

Esencialmente, el escurrimiento se forma cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la velocidad de infiltración. La corriente erosiona por medio de dos acciones: una disgregadora y otra transportadora. La primera se produce cuando las fuerzas tractivas del flujo superan a las fuerzas resistentes de las partículas del

suelo. La segunda se lleva a cabo cuando se satura el suelo y el agua empieza a escurrir, trasladando los sólidos hacia aguas abajo. Estas partículas son muy finas y van a componer la carga de lavado de los cauces. (RAMÍREZ, J. 2009).

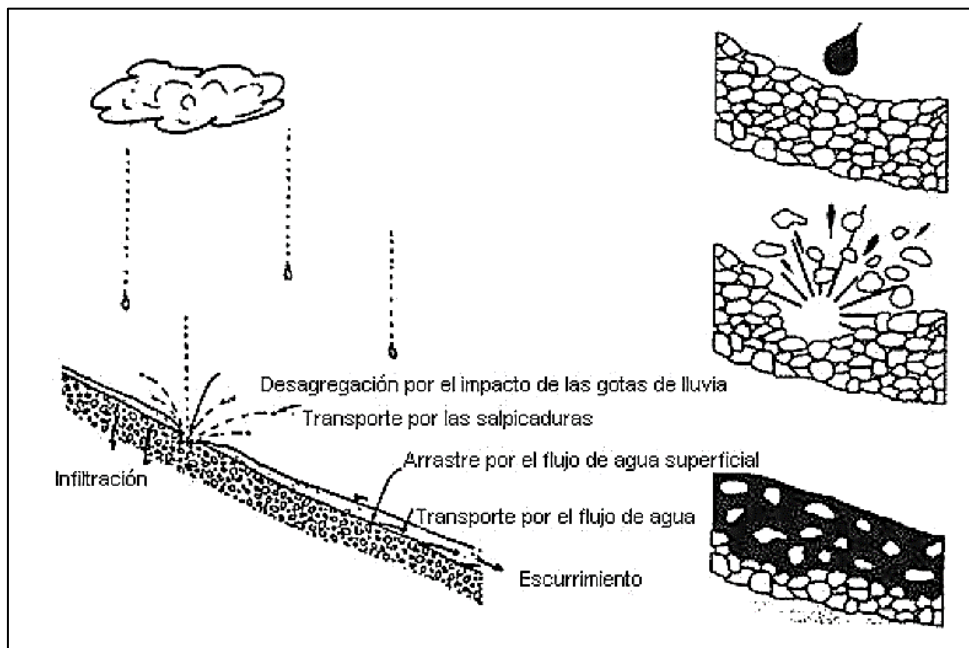


Figura 10: Inicio de erosión por gotas de lluvia.

Fuente: (RIVERA et al., 2006)

Tipos de erosión hídrica

a. Erosión laminar

Esta consiste en una remoción de delgadas capas de suelo extendida más o menos uniformemente en toda la superficie. (VANONI, V. 1977).

La erosión laminar causa grandes aportaciones de sedimentos a los cuerpos de agua, además de generar la pérdida de nutrientes en los suelos debido a que se afectan las partículas más finas. (LÓPEZ, F. 2003).

b. Erosión por surcos

Los riachuelos son incisiones longitudinales en el suelo, generalmente intermitentes. Estos se presentan como consecuencia de la concentración local del flujo de agua, canalizada por las características locales del microrrelieve. Son lo suficientemente pequeños para desaparecer por completo con los métodos de cultivo ordinarios. (VANONI, V. 1977).

c. Erosión por cárcavas y barrancos

Son cursos de agua, cauces o ríos con circulación permanente o intermitente. Los procesos de erosión se presentan sobre la superficie que define el propio cauce. Consisten en profundas incisiones en el terreno debido a una gran concentración de escurrimiento, las cuales no desaparecen con los métodos ordinarios de agricultura. Cuando el tirante del arroyuelo excede los 300 mm se le denomina cárcava. (HAAN et al., 1982).

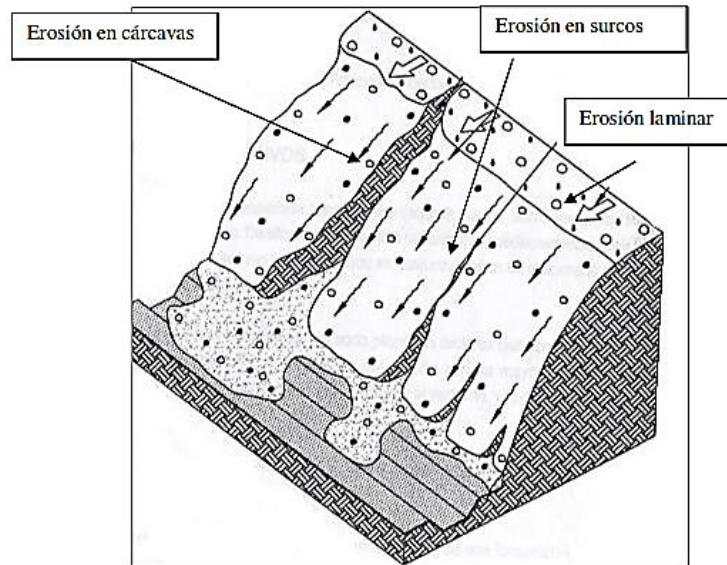


Figura 11: Esquema típico de los diferentes tipos de erosión hídrica.

Fuente: (Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes, 2002)

Factores de la erosión hídrica

Se considera los siguientes factores

- a. **El suelo.** Las características físicas del suelo (estructura, textura, contenido de materia orgánica, etc.) determinan el grado de resistencia de las partículas del suelo al desprendimiento y transporte por efecto del impacto del agua sobre el suelo, de la escorrentía y la capacidad de infiltración del suelo.
- b. **La topografía.** Las características topográficas que inciden en la erosión hídrica son la pendiente y la longitud de la ladera, así como la forma y tamaño del área de drenaje.

Tabla 8: clasificación de las pendientes

Rango de pendientes para laderas cortas (%)
0 - 4
0 - 8
8 - 15
15 - 25
25 - 50
50 - 75
>75

Fuente: Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (2009)

- c. El clima.** Entre los factores climáticos que más inciden en la erosión hídrica están la precipitación, la humedad, el viento y la temperatura. Existe una estrecha relación entre las características de la precipitación y la escorrentía. El viento en muchos casos cambia la velocidad de la lluvia y su ángulo de impacto sobre el suelo, afectando su fuerza erosiva.
- d. La vegetación.** La vegetación protege a la superficie del suelo del impacto directo del agua, sea esta proveniente de lluvia o escorrentía. La vegetación protege al suelo mediante:
- La intercepción y disminución o anulamiento de la energía cinética con la que caen las gotas de lluvia ya sea mediante las hojas, tallos o los residuos de las plantas.
 - La reducción de la velocidad del agua de escorrentía por efecto de la resistencia hidráulica debido al “colchón” que forman los residuos vegetales o cubierta vegetal.
 - El aumento de la capacidad de infiltración y almacenamiento del agua en el suelo debido al mejoramiento de la estructura y porosidad del suelo por efecto de las raíces, los residuos vegetales y la actividad microbiana.
 - El aumento de la resistencia del suelo a la erosión debido al “amarre” de las partículas de suelo que producen las raíces de las plantas.
- e. El hombre.** El hombre es el agente principal y decisorio en todo proceso erosivo, debido fundamentalmente a su rol y participación en el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, agua, suelo y cubierta vegetal, por ello se lo considera como el factor antrópico de la erosión. (VÁSQUEZ et al., 2016).

Etapas de la erosión hídrica

el proceso de erosión hídrica comienza primeramente por el desprendimiento de las partículas de suelo, de las partes elevadas de un terreno. El desprendimiento de estas partículas puede ser llevado a cabo por la lluvia y por el escurrimiento superficial, ya que ambos pueden llegar a poseer la suficiente energía para desprender partículas del suelo. La lluvia y el escurrimiento además de llevar a cabo la función de desprendimiento, también realizan la función de transporte de suelo. (WISCHMEIER y SMITH, 1978).

Producción de sedimentos por erosión hídrica

Los sedimentos son el producto de la erosión hídrica. Se sabe que de todo el suelo que es erosionado solo una pequeña parte de este, es el que atraviesa y llega a la salida de cuenca, el resto de los sedimentos son depositados en las colinas, planicies de inundación y las áreas entre riachuelos

La producción de sedimentos consiste en el total de material que sale de la cuenca o sistema de drenaje, medido para un cierto periodo y un punto específico (VANONI, V. 1977).

Por lo general se estima con base en muestreos y se relaciona con el gasto del cauce o por medio de mediciones de los sedimentos descargados en los embalses. La erosión de una cuenca es directamente proporcional a la producción de sedimentos de la misma. Ésta última se ve afectada por la cubierta vegetal existente; por consiguiente, en las zonas áridas se tiene una producción mayor. En ese sentido, puede haber cuencas pequeñas con una producción de sedimentos más importante que cuencas más extensas. La carga de sedimentos de una corriente es definida como la tasa de transporte de masa a través de una determinada sección del cauce y se puede medir en peso por volumen (mg/l) o por concentración (ppm). Esta se comprende de partículas finas transportadas en suspensión. La parte de la carga suspendida se le denomina carga de lavado, está constituida principalmente por limos y arcillas. También existe la llamada carga de fondo, la cual está compuesta de arenas, gravas y rocas, que al convertir el movimiento en la energía cinética de los remolinos y turbulencia de la corriente ocasiona que se arrastren las partículas hacia aguas abajo (RAMÍREZ, J. 2009).

La cantidad de sedimentos en una corriente depende del suministro de material, de las características del cauce, del gasto y de las características físicas del sedimento. El suministro de material y el gasto son función de la climatología, la topografía, la geología, la cubierta vegetal y el uso del suelo de la cuenca. Las características del cauce dependen de la morfología, de la pendiente del cauce, de la rugosidad y del material de fondo. Por otro lado, las características físicas de las partículas son función del tipo de suelo, de la geología y del estado de intemperismo de la cuenca y el cauce (RAMIREZ, J. 2009).

Relación entre la producción de sedimentos y la deforestación

Se ha demostrado que la producción de sedimentos tiene una relación directa a la deforestación. Otra consecuencia de la deforestación es la compactación del suelo, lo que reduce su velocidad de infiltración (STOTT y MOUNT, 2004).

Metodología para la estimación de la erosión hídrica

Dentro de los métodos usados para determinar la erosión hídrica tenemos a los de medición directa los cuales consisten en:

a. Métodos directos

- Métodos de los clavos

Nos mencionan que este es un método muy sencillo y fácil de usar, ya que consiste en parcelar una determinada área de terreno, luego se instalan varillas metálicas, las cuales se marcaran para saber el antes y el después de un período de tiempo como ha variado la altura del suelo en ese tiempo. (VÁSQUEZ & TAPIA, 2011).

- Simuladores de lluvia

Nos mencionan que este método nos da gran flexibilidad para simular eventos de precipitación variable de medir in situ la erosión que se produce por salpicadura y arrastre. (BUBENZER & JONES, 1971).

b. Métodos indirectos

Tenemos a los métodos con base en modelación matemáticas los cuales a su vez se dividen en: métodos empíricos, métodos estocásticos y métodos de simulación de procesos físicos. De los cuales, por su simplicidad los más empleados son los métodos empíricos. Par el presente estudio se utiliza el método empírico que utiliza la ecuación universal de pérdida de suelo para estimar la erosión.

Ecuación universal de pérdida de suelo (USLE)

También es denominada como Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, (EUPS o USLE por sus siglas en inglés). Se dedujo a partir de los datos obtenidos tras la investigación de la erosión en más de 10,000 parcelas a lo largo de 49 localidades de los Estados Unidos de Norteamérica.

Para su evaluación se requiere varios tipos de datos como: los climáticos, hidrológicos, topográficos, vegetación, tipo de suelo y prácticas de conservación. (WISCHMEIER y SMITH, 1978).

La ecuación que describe el proceso de erosión es:

$$E = (R)(K)(L)(S)(C)(P) \quad (28)$$

Dónde

E: es la pérdida de suelo por unidad de área en ton/(ha año).

R: es el factor de erosividad por precipitación pluvial en (MJ mm)/(ha h año)

K: es el factor de erodabilidad del suelo en (ton h ha) / (MJ mm ha).

L: Factor de longitud del talud (adimensional).

S: Factor de pendiente del talud (adimensional).

C: es el factor de coberturas de suelo y manejo de cultivos (adim).

P: es el factor del método de control de erosión (adim).

Estos factores los obtenemos de la siguiente manera

Factor de Erosividad debido a la lluvia (R)

Wischmeier mostro que cuando los demás factores de la ecuación USLE permanecen constantes y cuando la lluvia varia, entonces la pérdida de suelo es directamente proporcional a la energía cinética de la tormenta. Lo cual quiere decir que este factor cuantifica el efecto erosivo de la lluvia debido a su intensidad.

Se calcula así:

$$R = \sum_{i=1}^m EI_{30} \quad (29)$$

$$E = \sum_{j=1}^n e_j p_j \quad (30)$$

$$e_j = 0.119 + 0.0873(\log_{10} I_j) \quad I_j < 76 \text{ mm/h} \quad (31)$$

$$e_j = 0.278 \quad I_j \geq 76 \text{ mm/h} \quad (31)$$

Donde:

R: factor de erosividad de la lluvia (MJ mm / ha hr año).

pj: lámina de lluvia en el intervalo de tiempo j (mm).

- Ij: intensidad de la lluvia en el intervalo j (mm/hr).
- ej: energía cinética para el intervalo de tiempo j (MJ/ha mm).
- n: número de intervalos de tiempo j.
- m: número de tormentas en el año.
- I₃₀: la intensidad máxima de precipitación pluvial durante 30 minutos para la tormenta (mm/h).

Otros de los métodos para determinar el factor de erosividad son los que se muestran a continuación:

- El propuesto por Foster citado por Ramos (2001).

$$R = \frac{0.276pI_{30}}{100} \quad (33)$$

Donde:

I₃₀: 75 mm/h (valor recomendado por Wischmeier).

p: Precipitación media anual.

- Lombardi Neto y Moldenhauer en 1980, después de hacer una serie de evaluaciones del cálculo del factor “R” en cuencas que no cuenten con información de intensidades propusieron la siguiente ecuación.

Si suponemos la precipitación media constante durante todo el año entonces se cumple lo siguiente:

$$R = 6.866 \left(\frac{Pi^2}{Pt} \right)^{0.86} \quad (34)$$

Donde:

Pi: es la máxima precipitación media mensual (mm).

Pt: es la precipitación media anual (mm).

R: es el índice medio de erosividad anual.

- inicialmente el valor de erosividad se hallaba mediante la ecuación del índice de Fournier (IF), el cual consistía en buscar el mes más lluvioso elevarlo al cuadrado y dividirlo por el acumulado de dicho año; luego Arnoldus (1980), propuso una modificación del índice de Fournier (IMF), que no solo se considere el mes más lluviosos sino que se haga de todo el año, esta ecuación luego fue adoptado por la FAO (1980), La cual se expresa así:

$$R = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} \quad (35)$$

Donde:

Pi: precipitación media mensual (mm).

Pt: es la precipitación media anual (mm).

R: es el factor de erosividad.

- El Instituto para la Conservación de la Naturaleza, ICONA (1988), obtuvo el factor de la erosividad de la lluvia (Factor R) que correlaciona R con el índice de agresividad climática "F" de Fournier, mediante el índice y ecuación modificada de Fournier.

$$R = 2.56F^{1.065} \quad (36)$$

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{m\acute{a}x}^2}{P_t} \quad (37)$$

Donde

F: índice de Fournier modificado

n: número de años analizados.

Pmáx: precipitación media del mes más lluvioso (mm).

Pt: es la precipitación media anual de dicho año (mm).

Factor de Erodabilidad del suelo (k)

Expresa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, para su cálculo se utiliza un nomograma que incluye diferentes características del suelo, previo a la utilización del nomograma se debe de obtener información física del suelo.

- **Textura:** el análisis textural del suelo es para obtener los porcentajes de arena, limo, arcilla y arenas finas. De acuerdo a los manuales originales de USLE.

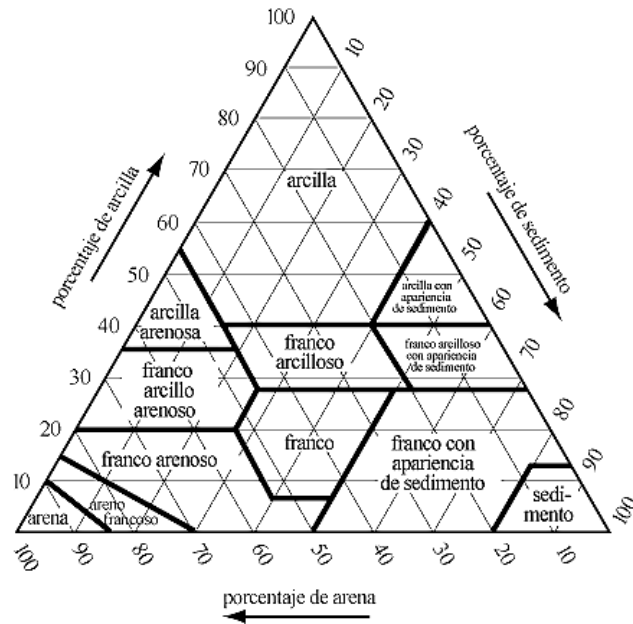


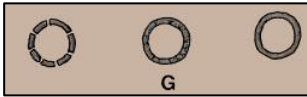
Figura 12: Triángulo de texturas para clasificación de suelos.

Fuente: <http://tesis.bioetica.org/lp1.htm>

Otra manera de obtener la textura del suelo es a través del método propuesto por la FAO, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9: Pasos para determinar la textura de los tipos de suelos según la FAO.







Prueba de manipulación	
<p>Tome una muestra de suelo (A). Mójela un poco en la mano hasta que sus partículas comiencen a unirse, pero sin que se adhiera a la mano.</p>	
<p>Amase la muestra de suelo hasta que forme una bola de unos 3 cm de diámetro (B).</p>	
<p>Deje caer la bola (C).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si se desmorona, es arena. - Si mantiene la cohesión, prosiga con el siguiente paso. 	
<p>Amase la bola en forma de un cilindro de 6 a 7 cm, de longitud (D).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si no mantiene esa forma, es arenoso franco. - Si mantiene esa forma, prosiga con el siguiente paso. 	
<p>Continúe amasando el cilindro hasta que alcance de 15 a 16 cm de longitud (E).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si no mantiene esa forma es franco arenoso. - Si mantiene esa forma, prosiga con el siguiente paso. 	
<p>Trate de doblar el cilindro hasta formar un semicírculo (F).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si no puede, es franco. 	

- Si puede, prosiga con el siguiente paso.	
Siga doblando el cilindro hasta formar un círculo cerrado (G). - Si no puede, es franco pesado - Si puede, y se forman ligeras grietas en el cilindro, es arcilla ligera. - Si puede hacerlo sin que el cilindro se agriete, es arcilla.	

Fuente: FAO, adaptación propia.

- **Materia Orgánica:** Se estima su proporción porcentual dentro del suelo, para lo cual se efectúa un análisis de las muestras obtenidas en campo. Según USLE, el porcentaje de materia orgánica oscila entre 0 y 4 %, con valores de números enteros, si el contenido fijado es más que el rango especificado, se asume un 4 %.
- **Estructura del suelo:** su determinación se efectúa mediante la observación visual y tacto. para lo cual es recomendable emplear algún manual de comparación, de acuerdo a la USLE, las categorías y códigos empleados son solo cuatro.

Tabla 10: Códigos USLE de estructura de suelo.

Código USLE	Tipo de estructura	
1	Granular muy fina	
2	Granular fina	
3	Granular media a gruesa	
4	Bloques	
	Laminar	
	Masiva	

Fuente: (MANCILLA, G. 2008)

- Para la **permeabilidad** se le asignan valores o códigos de acuerdo a la velocidad de infiltración de cada suelo determinado. Estos códigos son asignados por la USLE.

Tabla 11: Códigos USLE de permeabilidad de suelos.

Código USLE	Categoría de Permeabilidad
1	Rápida (más de 12,7 cm-h ⁻¹)
2	Moderada a rápida (6,3 a 12,7 cm-h ⁻¹)
3	Moderada (entre 2 y 6,3 cm-h ⁻¹)
4	Lenta a moderada (entre 0,5 y 2 cm-h ⁻¹)
5	Lenta (entre 0,13 y 0,5 cm-h ⁻¹)
6	Muy lenta (menor a 0,13 cm-h ⁻¹)

Fuente: (MANCILLA, G. 2008)

Wischmeier propone un nomograma (Figura 13) que permite evaluar el factor K usando cinco parámetros:

1. Porcentaje de limos y arenas muy finas, diámetro de 0.002mm- 0.10mm.
2. Porcentaje de arena, partículas de diámetro 0.10-2.0mm.
3. Porcentaje de materia orgánica.
4. Estructura del suelo.
5. Permeabilidad.

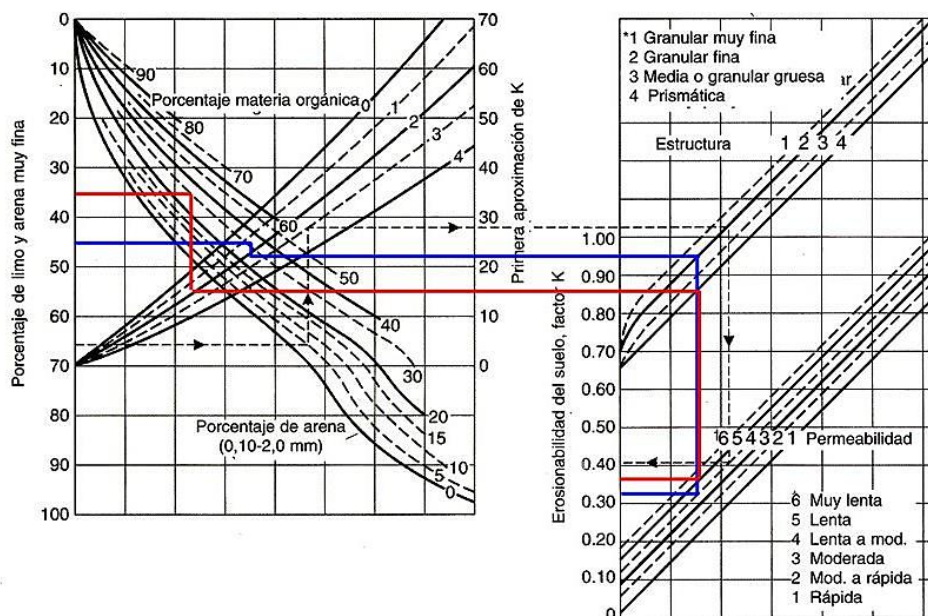


Figura 13: Nomograma para el cálculo del factor K

Fuente: (FIGUEROA et al., 1991. Citado por RAMÍREZ, J. 2009).

A través de la ecuación.

$$K = \frac{(10^{-4})(2.71 M^{1.14})(12-a)+(4.2)(b-2)+(3.23)(c-3)}{100} \quad (38)$$

Donde:

M: Factor representativo de la textura. Es el producto entre el porcentaje de limos y arenas muy finas (0.002 – 0.1 mm) por el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0.002 y 2.0 mm de diámetro, o lo que es igual, 100 menos el porcentaje de arcilla de la muestra

$$M = (\% \text{limo} + \text{arena muy fina}) (100 - \% \text{arcilla})$$

a = porcentaje de materia orgánica.

b = número correspondiente a la estructura del suelo según la codificación de la tabla 10.

1. Gránulo muy fino y limo muy fino (< 1 mm)
2. Gránulo fino y grumo fino (1 – 2 mm)
3. Gránulo y grumo medio (2 – 5 mm) y gránulo grueso (5 – 10 mm)
4. Gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso (> 10 mm)

c: en función a la tabla 11.

Los valores de la textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15 – 20 cm superiores del suelo, y los de permeabilidad a todo el perfil.

El factor K está comprendido en el intervalo [0.01 – 1.00]

Factor de longitud de talud (L)

Con ayuda de los SIG, el cálculo de la longitud y gradiente se ha hecho más fácil, para los cual se utiliza un DEM de la cuenca a estudiar, el cual posee una determinada resolución. Para la estimación de este parámetro se seguirá la metodología propuesta por DESMET & GOVER, (1996). Citado por VELÁSQUEZ, (2008).

A continuación, se muestra las ecuaciones usadas.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (39)$$

$$m = \frac{\beta}{\beta+1} \quad (40)$$

$$\beta = \frac{\text{sen}\theta/0.0896}{3(\text{sen}\theta)^{0.8}+0.56} \quad (41)$$

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j)}+D^2)^{m+1}-A_{(i,j)}^{m+1}}{X^m * D^{m+2} * (22.13)^m} \quad (42)$$

Donde:

A(i,j) [m] es el área aportadora unitaria de un pixel (celda).

D: es el tamaño del pixel (m.).

X: es un factor de corrección (X=1 para sistemas pixelados).

Factor de pendiente del talud (S).

En 1987 se propuso una ecuación para mejorar el cálculo del factor “S” lo cual permitió aplicar la ecuación en pendiente con mayor inclinación. (MCCOOL et al., 1987. Citado por FIGUEROA et al., 1991).

$$S = 10.8 \operatorname{sen}\theta + 0.03 \quad \theta < 5.14^\circ \quad (43)$$

$$S = 16.8 \operatorname{sen}\theta - 0.5 \quad \theta \geq 5.14^\circ \quad (44)$$

O también:

$$\tan\beta(i,j) < 0.09 \quad S(i,j) = 10.8 \operatorname{seno}(\beta(i,j)) + 0.03 \quad (45)$$

$$\tan\beta(i,j) \geq 0.09 \quad S(i,j) = 16.8 \operatorname{seno}(\beta(i,j)) - 0.5 \quad (46)$$

Donde S es el factor de pendiente del talud y θ, β en ($^\circ$).

A estos dos factores mostrados anteriormente se les denomina *factor topográfico LS* y que para facilitar su cálculo hay una tabla la cual permita asignar un valor directamente al factor LS según el porcentaje de inclinación que tenga la pendiente en estudio.

Factor de coberturas (C)

El factor de vegetación “C” recoge la influencia que la cubierta vegetal y sus residuos producen sobre el suelo, frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino que la velocidad de la escorrentía superficial. (BASCUNÁN, S. 2010).

Para determinar este factor Wischmeier publicó una tabla con diferentes tipos de cultivo y su respectivo valor de “C”

Tabla 12: Valor del factor de cobertura vegetal (C).

Cultivo y Práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1
Bosque o matorral denso	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobre pastoreada	0.1
Maíz, sorgo, alto rendto., laboreo convencional	0.20 - 0.55
Maíz, sorgo, alto rendto., sin laboreo convencional	0.50 - 0.90
Maíz, sorgo, bajo rendto., laboreo mínimo	0.02 - 0.10
Maíz, sorgo, alto rendto., laboreo con chisel	0.12 - 0.20
Maíz, sorgo, bajo rendto., laboreo con chisel	0.30 - 0.45
Algodón	0.40 - 0.70
Pradera herbácea	0.01 - 0.025
Soya	0.20 - 0.50
Trigo	0.10 - 0.40
Arroz	0.10 - 0.20
Cacahuate	0.30 - 0.80
Frutales con cobertura vegetal	0.01 - 0.80
Caña de azúcar	0.56
Arbolado denso	0.001 - 0.003
Arbolado forestal clareado	0.003 - 0.009
Arbolado muy clareado (25 - 60%)	0.041
Matorral con buena cobertura	0.003 - 0.013
Matorral ralo y eriales	0.20 - 0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Pasturas	0.15
Plantas herbáceas y matojos (100%)	0.003
Plantas herbáceas y matojos (60%)	0.035
Cubierta escasa (60%)	0.15 - 0.09
Cubierta inapreciable	0.45

Fuente:(CAYO, L. 2011. Citado por CABREJOS, M. 2016)

Factor del método de control de erosión (P)

La conservación de suelos ha sido definida como la ciencia de mantener y/o aumentar la productividad de los terrenos mediante prácticas mecánicas, vegetativas y agronómicas, que deben ser aplicadas de acuerdo a las características particulares de cada tipo de terreno.

El factor de prácticas de conservación P, expresa la relación entre la cantidad de suelo perdido utilizando la práctica de conservación que se aborda, y la que se

perdería labrando según la máxima pendiente. (TORRES, C. 1984. Citado por FLORES, E. 2016)

Muchas veces la presencia de vegetación no evita la producción de escurrimiento superficial. En este sentido, el empleo de prácticas de conservación en el suelo minimiza el efecto del flujo de agua. (CABREJOS, M. 2016).

Al respecto, USLE incluye el factor P de prácticas de conservación para tres situaciones:

- El empleo de labranza siguiendo las curvas de nivel (cultivo en contorno)
- El empleo de fajas de cultivo en contorno
- El empleo de terrazas

Tabla 13: Factor P de prácticas de conservación de (WISCHMEIER y SMITH, 1978.)

Pendiente (%)	Cultivo en contornos o curvas de nivel		P para cultivos en terrazas
	P*	Longitud máxima de ladera (m)	
1 - 2	0,60	122	0,12
3 - 5	0,50	91	0,10
6 - 8	0,50	61	0,10
9 - 12	0,60	37	0,12
13 - 16	0,70	24	0,14
17 - 20	0,80	18	0,16
21 - 25	0,90	15	0,18

* Se pondrá por 0,8 si considera contornos realizados con pilas de residuos.

Fuente: (MANCILLA, G. 2008. Citado por CABREJOS, M. 2016).

Tabla 14: Factor P en función de las curvas de nivel y prácticas de cultivo.

Pendiente	Curva de nivel	Franjas de cultivo	Terrazas
0.0 – 7.0	0.55	0.27	0.10
7.0 – 11.3	0.60	0.30	0.12
11.3 – 17.6	0.80	0.40	0.16
17.6 – 26.8	0.90	0.45	0.18
26.8 >	1.00	0.50	0.20

Fuente: (SHIN, G. 1999).

Tabla 15: clasificación de la erosión hídrica FAO.

Tipo	Rango	Clasificación
1	<50	Baja
2	50 - 100	media
3	100 - 150	considerable
4	150 - 200	alta
5	200 – 250	Muy alta
6	>250	extrema

Fuente: FAO (1980)

Coefficiente de Entrega de Sedimento (CES) o Sediment Delivery Ratio (SDR)

La producción de sedimentos es un dato de mucha importancia para la solución de problemas relacionados al transporte de sedimentos, es decir hay muchos factores que afectan temporal y espacialmente la deposición de sedimentos producidos por una cuenca. El CES se utiliza para ajustar la erosión total estimada y compensarla por la deposición de sedimentos durante el transporte y estimar el aporte de sedimentos en un punto específico de la cuenca. Esto indica que no todo el sedimento producido por la erosión superficial ingresa a la red hidrográfica y es transportado por los cursos de agua (MARTÍNEZ, 2010).

Dicho de otra manera, la SDR es la relación que existe entre la producción de sedimentos en un punto dado con su erosión superficial; a esto se lo representa de la siguiente manera (BROOKS et al., 1997).

$$SDR = \frac{Y_s}{E} \quad (47)$$

Donde:

Y_s: producción de sedimentos en un punto dado (tn/ha/año).

E: es la erosión superficial (tn/ha/año).

SDR: coeficiente de entrega de sedimento (adim.).

El autor además menciona que tal relación solo arroja valores de muy baja aproximación, ya que la erosión y las concentraciones de sedimentos pueden variar enormemente para cada cuenca.

Criterios para evaluar el CES o SDR

Varios investigadores emplearon relaciones para calcular el SDR, y de esta manera poder determinar la producción de sedimentos (Y_s), conociendo su erosión hídrica.

Steward et al,1975.

Proponen utilizar la tabla 16, la cual muestra la variación del área de drenaje de la cuenca y su SDR, tal como se muestra a continuación.

Tabla 16: variación del área de la cuenca conforme su SDR.

Área de drenaje de la cuenca (Km ²)	SDR
1.29	0.33
2.59	0.30
12.95	0.22
25.90	0.18
129.50	0.12
259.00	0.10
518.00	0.08

Fuente: (STEWARD et al,1975)

De la table anterior se desprende el siguiente gráfico.

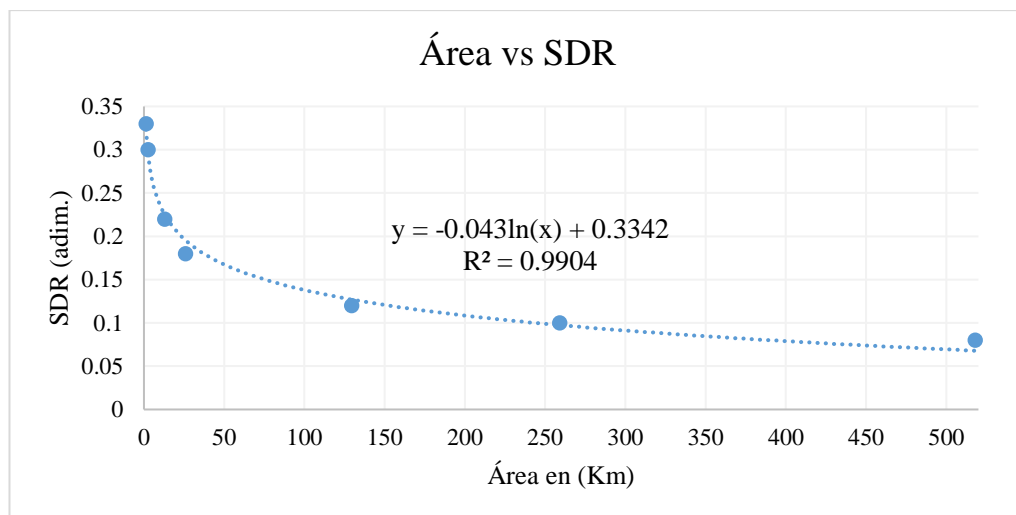


Figura 14: ecuacion que relaciona el area de la cuenca y su SDR.

Calculándose el SDR a través de la ecuación siguiente.

$$SDR = -0.043 \ln(A) + 0.3342 \quad (48)$$

Williams y Berndt, 1972

$$DR = 0.627(SLP)^{0.403} \quad (49)$$

Vanoni, 1975.

$$DR = 0.47(A)^{-0.125} \quad (50)$$

USDA SCS, 1979:

$$DR = 0.566(A)^{-0.11} \quad (51)$$

Roehl, 1962:

$$DR = 0.36(A)^{-0.2} \quad (52)$$

Donde:

SDR: coeficiente de entrega de sedimento (Adim.)

A: área de la cuenca expresada en (Km²)

SLP: pendiente media del cauce principal en (%)

Transporte de sedimentos

Se entiende por sedimento a todas las partículas de suelo y roca que son arrastradas y transportadas por una corriente de agua (MAZA Y GARCÍA, 1996),

a. Formas del transporte de sedimento

Existen básicamente dos formas del transporte de sedimentos.

- **Transporte de fondo (GB):** está comprendido por el material sólido que se mueve en las proximidades del lecho de la corriente saltando o rodando.
- **Transporte en suspensión (GS):** el transporte en suspensión, moviliza el material fino proveniente tanto de la erosión laminar de la cuenca como de los cauces
(MAZA et al, 1996).

b. Concepto de equilibrio de fondo

Lane en 1955, propuso tener en cuenta cuatro variables que intervienen en el equilibrio del fondo del cauce: el caudal líquido (q, caudal unitario de agua), el caudal sólido (qs, caudal sólido unitario que se mueve por el fondo), la pendiente

(S) y el tamaño del sedimento (D_{50}), y las dispuso en la analogía de la balanza, así como se muestra a continuación (MENDOZA, F. 2014)

Lane estableció de una forma cualitativa (ecuación 50) de manera que el conjunto caudal sólido-granulometría del sedimento debe estar en equilibrio con el conjunto caudal líquido-pendiente del cauce.

$$q_s D_{50} = q S \quad (53)$$

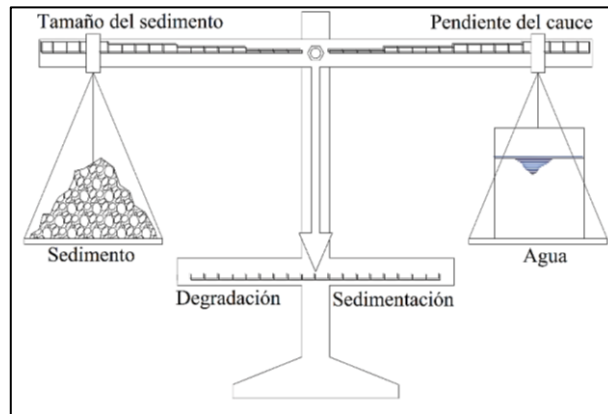


Figura 15: Analogía De La Balanza De Lane.

Fuente: (LANE, 1955 adaptado por MENDOZA LÓPEZ, 2014)

El desplazamiento de la balanza por un exceso de peso (los caudales) o por un brazo en exceso (la pendiente y el tamaño), da lugar a un desequilibrio que conlleva procesos de erosión o sedimentación, Para recuperar el equilibrio, el flujo debe aumentar el peso opuesto o incrementar su brazo. Es importante resaltar que la pendiente es la principal variable que permite recuperar el equilibrio (MARTÍN, M. 2003).

c. estimación del transporte de sedimentos

cabe precisar que el transporte de sedimentos que se presenta en el área de estudio es el transporte en suspensión.

Para que una partícula de suelo entre en suspensión, puede darse por un aumento brusco de caudal, en el cual la fuerza de corte llega a ser mayor que la velocidad de caída de las partículas, en ello influye mucho la pendiente del canal.

Su cálculo se realiza a través de las ecuaciones propuestas por:

Fórmula de Garde y Pande

$$\frac{GS}{q \gamma} = 0.000051 \left(\frac{V_c}{\omega}\right)^4 \quad (54)$$

$$V_c = \sqrt{g R s} \quad (55)$$

Donde:

GS: transporte en suspensión por unidad de ancho en (kg/s/m)

q: es el caudal unitario en (m³/s/m)

γ: es el peso específico del agua (kg/m³)

V_c: es la velocidad de corte (m/s)

R: es el radio hidráulico (m)

g: es la aceleración de la gravedad (m/s²)

s: pendiente (m/m)

Fórmula de Benedict y Vanuni

$$GS = 0.0027(QCs) \quad (56)$$

$$Q = 35.314 Q_{(m^3/s)} \quad (57)$$

Donde:

GS: transporte en suspensión por unidad de ancho en (tn/día/m).

Q: descarga de agua en (pies³/s).

Cs: concentración en (ppm).

Medición del transporte en suspensión

El transporte en suspensión puede ser obtenido a través de un análisis de laboratorio y obtener la concentración por diferencia de pesos.

a continuación, se explica el procedimiento para determinar la concentración en (ppm).

$$Cs = \frac{Wf - Wi}{Vol} 10^3 \quad (58)$$

Donde:

Cs: concentración en (ppm).

Wf: peso del filtro con sedimento (g.).

Wi: peso del filtro (g.)

Vol: volumen de la muestra (l.).

Por lo tanto, el transporte de sólidos en suspensión se calcula mediante la siguiente expresión:

$$GS = (Q Cs)86.4 \quad (59)$$

Donde:

Gs: transporte en suspensión (tn/día).

Q: caudal en (m³/s).

Características físicas de los sedimentos

Las características que definen el transporte de sedimento no son solamente el flujo sino también las propiedades del sedimento, como son el tamaño, la forma, la distribución granulométrica, peso específico y concentración, principalmente.

a. Tamaño

El tamaño es la propiedad más importante que presenta el sedimento, a continuación, se mencionan los diámetros característicos.

Diámetro nominal (D_n)

Viene a ser el diámetro de una esfera de igual volumen que la partícula del que se está tratando.

$$D_n = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (60)$$

Donde:

D_n: diámetro nominal de la muestra (mm).

V: es el volumen en (mm³).

Cabe mencionar que las gravas y arenas se miden por el diámetro de tamizado mientras que los limos y arcillas por el diámetro de sedimentación.

Diámetro de tamiz (D_w): Es la abertura mínima de una malla por la cual pasa una partícula en una distribución granulométrica.

Diámetro de sedimentación (D_i): Es el diámetro que tiene una esfera de igual densidad de la partícula que cae a una misma velocidad y a una misma temperatura en un mismo fluido.

Diámetro medio ponderado (D_m)

Es una medida de tendencia central y se denota de la siguiente manera.

$$D_m = \frac{\sum D_i P_i}{\sum P_i} \quad (61)$$

Donde:

D_m: diámetro medio de la muestra (mm).

P_i: peso del material retenido en cada malla (g).

Diámetro medio aritmético (D₅₀).

Viene a ser el diámetro medio del material en función al peso.

Tabla 17: Clasificación de los sedimentos por tamaño según la American Geophysical Union.

Grupo	Clase	Tamaño (mm)		
Piedras (guijarros)	Muy grande	2,048	a	4,096
	Grande	1,024	a	2,048
	Mediana	512	a	1,024
	Pequeña	256	a	512
Cantos (cascajo)	Grande	128	a	256
	Pequeña	64	a	128
Grava	Muy gruesa	32	a	64
	Gruesa	16	a	32
	Mediana	8	a	16
	Fina	4	a	8
	Muy fina	2	a	4
Arena	Muy gruesa	1.000	a	2.000
	Gruesa	0.500	a	1.000
	Mediana	0.250	a	0.500
	Fina	0.125	a	0.250
	Muy fina	0.062	a	0.125
Limo	Gruesa	0.031	a	0.062
	Mediana	0.016	a	0.031
	Fina	0.008	a	0.016
	Muy fina	0.004	a	0.008
Arcilla	Gruesa	0.002	a	0.004
	Mediana	0.001	a	0.002
	Fina	0.0005	a	0.001
	Muy fina	0.00024	a	0.0005

Fuente: (GARCÍA, F. y MAZA, A. 1998).

Tabla 18: Numeración de tamices según sistema U.S. Estándar.

Número	Abertura (mm)	Número	Abertura (mm)
4"	101.60	16	1.19
2"	50.80	20	0.84
1"	25.40	30	0.59
¾"	19.10	40	0.42
½"	12.70	50	0.297
3/8"	9.52	60	0.25
3	6.35	70	0.21
4	4.76	100	0.149
6	3.36	140	0.105
8	2.38	200	0.074
10	2	270	0.053
12	1.68	400	0.037

Fuente: <https://es.scribd.com/document/67281175/T-TRANSPORTE-SEDIMENTOS>

b. Distribución granulométrica

El análisis granulométrico de muestras del lecho del río se realiza con dos finalidades, la primera para determinar la rugosidad y la segunda para realizar su distribución granulométrica, esta distribución se hace usando procedimientos estadísticos que relacionan el peso retenido en cada tamiz con el tamaño de cada tamiz. Esto se representa de manera gráfica, en una hoja semilogarítmica en el cual se muestra la curva granulométrica que usualmente para el caso de sedimentos de ríos muestra una distribución log-normal.

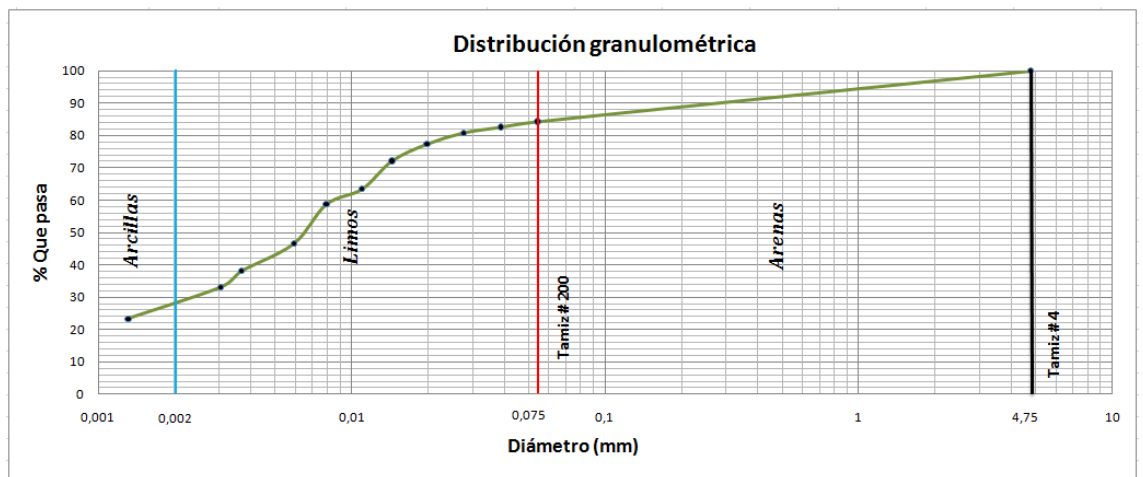


Figura 16: representación gráfica de la distribución granulométrica.

Fuente: <http://suelosyestudio.blogspot.com/2010/06/ensayo-de-granulometria-por-hidrometro.html>

Parámetros derivados de la granulometría

Coefficiente de uniformidad (Cu)

Este coeficiente indica si el suelo está bien o mal gradado, es decir si el valor es menor igual a 5 es suelo está bien gradado, y se calcula de la siguiente manera:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (62)$$

Donde:

D₆₀: tamaño donde pasa el 60% del material.

D₁₀: tamaño donde pasa el 10% del material.

Coefficiente de curvatura (Cc)

Este parámetro nos indica una granulometría constante sin escalones, esto se cumple cuando este está en el rango de mayor a 1 y menor a 3, y se calcula de la siguiente manera.

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}} \quad (63)$$

Donde:

D_{10} : tamaño donde pasa el 30% del material.

c. Forma de la partícula

La forma describe la geometría de la partícula independientemente de su tamaño, densidad o composición mineralógica. La forma es importante debido a su influencia en el movimiento de la partícula en el seno de la corriente hídrica (BASILE, P. 2018).

Redondez

La redondez se utiliza para caracterizar el contorno o bordes de las partículas de sedimento, por lo tanto, se asocia al grado de agudeza de las aristas y ángulos. La redondez indica el grado de abrasión que han experimentado los granos y refleja la historia de transporte (BASILE, P. 2018).

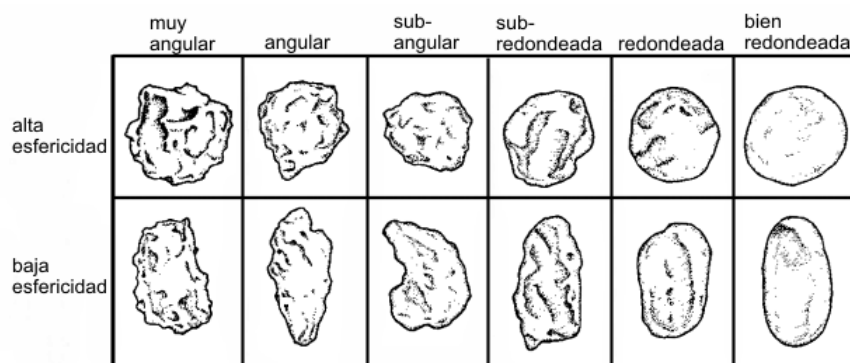


Figura 17: Redondez para distintos tipos de contornos.

Fuente: (BASILE, P. 2018).

Esfericidad (ϵ)

Se define como la relación entre el área superficial de una esfera que posee el mismo volumen que una partícula de sedimento, su valor se obtiene utilizando la siguiente fórmula (KRUMBEIN, 1941)

$$\epsilon = \sqrt[3]{\frac{b^2}{a} \frac{c}{b}} = \sqrt[3]{\frac{bc}{a^2}} \quad (64)$$

Donde a, b y c son las dimensiones triaxiales, es decir, a (mayor), b (intermedia) y c (menor).

La esfericidad máxima es 1, en la práctica la misma varía entre 0.3 y 0.9, pudiéndose clasificar en baja: $0.3 \leq \epsilon < 0.5$, media: $0.5 \leq \epsilon < 0.7$ y alta: $0.7 \leq \epsilon < 0.9$ (BASILE, P. 2018).

d. Peso específico (γ)

Se define como la relación entre el peso de la partícula de sedimento y su volumen.

$$\gamma = \frac{P}{V} \quad (65)$$

Donde:

P: peso de la partícula en (Kg).

V: volumen de la partícula (m^3).

Peso específico de la mezcla agua-sedimento (γ_m)

Esto es aplicado cuando la muestra de agua lleva arcillas, arenas finas y limo en suspensión y se calcula de la siguiente manera.

$$\gamma_m = \gamma + \frac{V_s}{V_m} (\gamma_s - \gamma) \quad (66)$$

Donde:

V_s: volumen del sedimento (m^3).

V_m: volumen de la mezcla (m^3).

e. Concentración (Cs)

Es la relación que hay entre la cantidad de partículas que están contenidas en el agua, con respecto al volumen total.

$$C_S = \frac{W_S}{V_m} = \frac{\gamma_S V_S}{V_m} \quad (67)$$

Donde:

Cs: es la concentración la cual se puede expresar en (mg/l o ppm)

Ws: es el peso del sedimento en (g.)

f. Velocidad de caída (ω)

Viene a ser la rapidez con la que cae una partícula de sedimento en un fluido y se la calcula así:

$$\omega = \sqrt{\frac{4 g D (\gamma_S - \gamma)}{3 C_D \gamma}} \quad (68)$$

Donde:

ω : es la velocidad de caída (m/s)

C_D : es el coeficiente de arrastre (adim.)

g: es la aceleración de la gravedad (m/s^2)

D: es el diámetro de la partícula (m.)

El coeficiente de arrastre depende tanto del diámetro de la partícula como del número de Reynolds.

$$Re = \frac{\omega D}{\nu} \quad (69)$$

Sin embargo, hay un gráfico, (gráfico de Yallin), que se puede determinar la velocidad de caída de manera rápida, calculando primero la expresión siguiente.

$$\frac{(\gamma_S - \gamma) D^3 g}{\gamma \nu^2} \quad (70)$$

Donde:

ν : es la viscosidad cinemática del agua (m^2/s)

Del gráfico se obtiene:

$$\frac{\omega D}{v} \quad (71)$$

Luego se despeja y se obtiene el valor de la velocidad de caída.

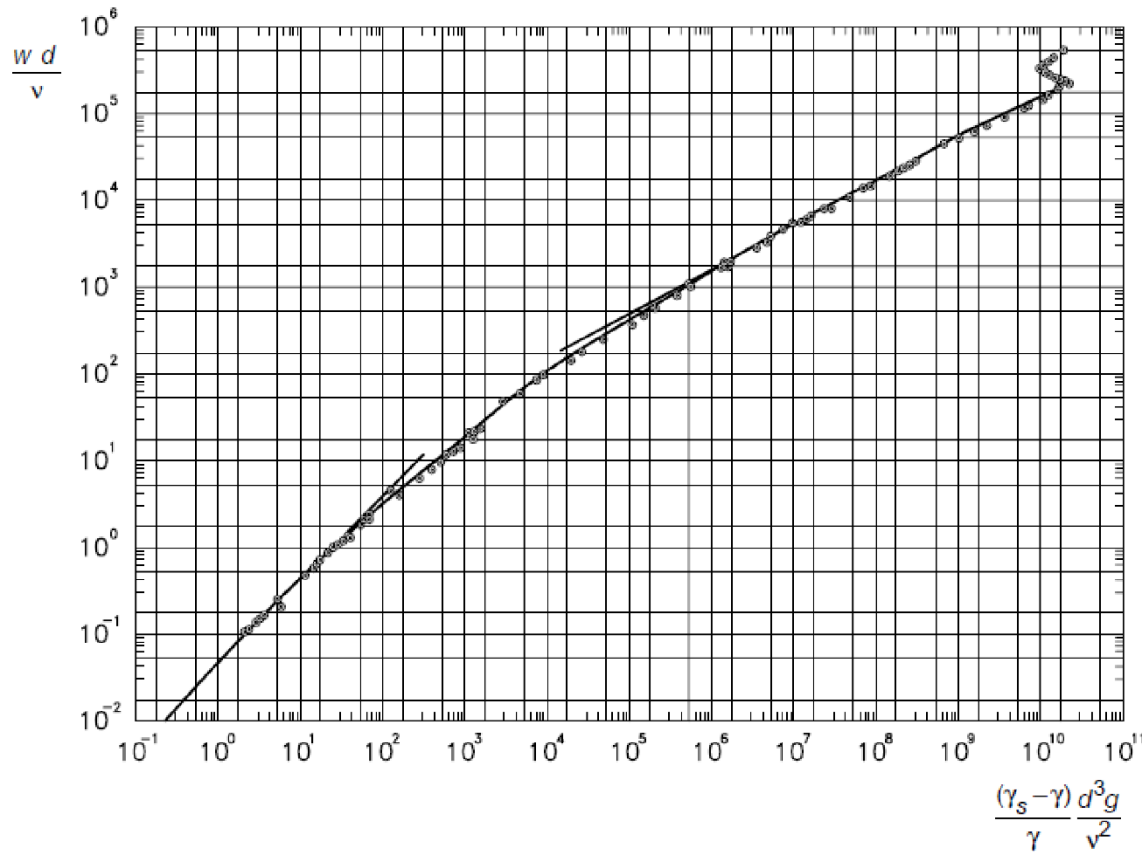


Figura 18: Grafico de Yalin para determinar la velocidad de caída de la partícula.

Fuente: <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1119&context=biosysengfacpub>

CLARIFICACIÓN DEL AGUA

El proceso de clarificación tiene como objetivo la eliminación de sustancias en suspensión, sustancias disueltas y la supresión de la flora microbiana además de la posible corrección de algunas características físico química (PÉREZ DE LA CRUZ et al., 2011).

Coagulación

Se denomina coagulación al proceso de desestabilización y posterior adherencia de partículas en suspensión presentes en el agua, para potenciar la etapa de decantación o espesado en la que esas partículas deben separarse del agua. La desestabilización se consigue neutralizando sus cargas eléctricas, con lo que dejan de actuar las fuerzas de repulsión, su potencial Zeta se anula y los coloides tienden agregarse por acción de masas (HERNÁNDEZ, A. 2001).

Normalmente, las partículas a coagular proceden:

- 1) Del suelo, traídas a las fuentes de agua por escorrentía superficial y por el viento.
- 2) De descomposición de materia orgánica natural en los cursos de agua.
- 3) De vertidos domésticos e industriales.

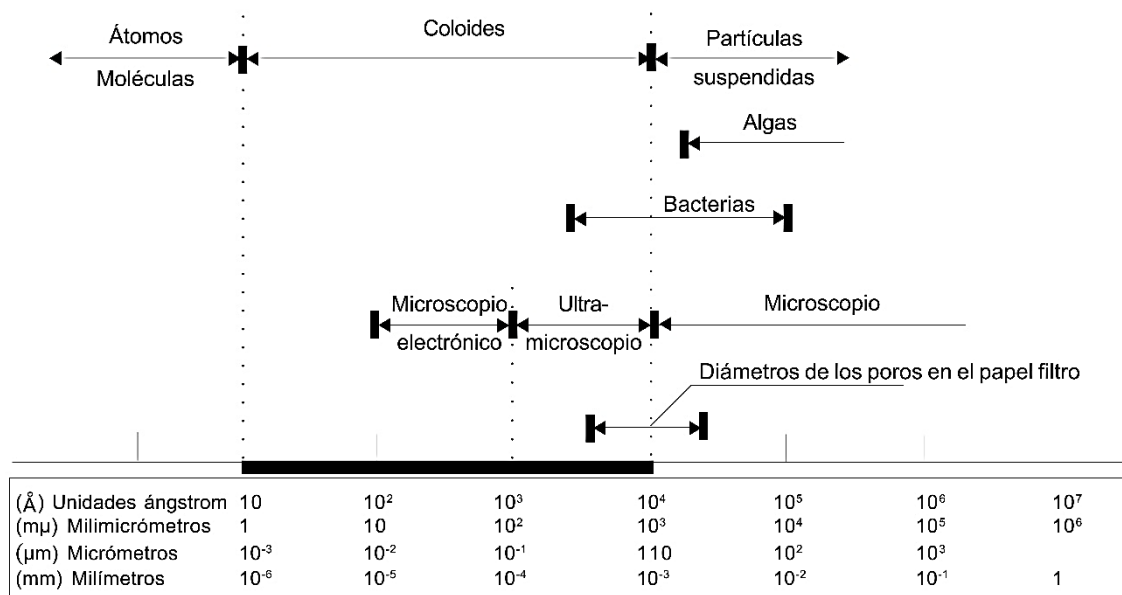


Figura 19: Distribución de tamaños de las partículas en el agua.

Fuente: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf>

El objetivo de la coagulación es hacer que las partículas insolubles en el agua se adhieran una a otras, de modo que sean más separables, es decir es mucho más sencillo separar partículas grandes y pesadas que partículas ligeras y de poca superficie específica, el proceso de coagulación tenderá a agrupar partículas pequeñas en otras mayores, y por tanto más sólidas, que denominaremos flóculos, para así separarlas más fácilmente.

a. Factores que influyen en el proceso

- 1) Tipo y cantidad de coagulante: la cantidad exacta se debe determinar mediante ensayos, (la prueba de jarras), para evitar sobredosificaciones que rompan la adsorción superficial.
- 2) pH del agua: Para cada coagulante: existe una zona de pH donde se produce una buena floculación en plazo corto y con una dosis dada de coagulante.
- 3) Tiempo de mezcla y floculación (período de coagulación): Es el tiempo entre la adición de coagulante y el final de la agitación a una velocidad que impida la decantación de las materias floculadas.
- 4) Temperatura del agua: La temperatura influye en el tiempo requerido para una buena formación de coágulos, (más fría, más tiempo).
- 5) Agitación y presencia de núcleos (sólidos en suspensión).

b. Características

- 1) Cargas opuestas al coloide, con el fin de neutralizar las fuerzas electrostáticas (punto isoeléctrico o potencial Zeta nulo). A veces, el reactivo coagulante no consigue reducir el potencial Zeta hasta valores próximos a cero, siendo necesarios otros compuestos de apoyo denominados coadyuvantes como la cal, el floculante, etc.
- 2) Han de ser muy pesados, para que los flóculos formados puedan separarse lo más rápidamente posible por precipitación.

c. Dosificación

La dosificación de este reactivo es muy variada ya que este depende de factores como la turbiedad, y la cantidad óptima a dosificar se obtiene por medio de la prueba de jarra.

Floculación

La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microfloculos y que estas a su vez se adhieren a otras para formar los flocs. De esta manera se logra aumentar su densidad de las partículas disueltas en el agua, para que posteriormente estas sean decantadas y así poder clarificar el agua (HERNÁNDEZ, A. 2001).

Además, se puede decir que previo a este proceso se realiza la coagulación, es por ello que al proceso se le denomina coagulación – floculación

En la actualidad se usan floculantes sintéticos, (polímeros), polielectrolíticos.

a. Medios para lograr la sedimentación de los flóculos.

- 1) Una coagulación previa tan perfecta como sea posible.
- 2) Un aumento de la cantidad de flóculos en el agua.
- 3) Una agitación lenta y homogénea del conjunto. Para que se puedan adherir partículas coloidales con lo flóculos.
- 4) El empleo de ciertos productos llamados floculantes. Para favorecer la formación de flóculos.

b. Factores que afectan la floculación

- 1) Dosis óptima de polímero: Para una cierta concentración de sólidos. El punto a partir del cual el polímero no es totalmente adsorbido corresponde a la dosis óptima, que será la cantidad máxima de polímero que puede ser adsorbido sobre el sólido para producir un sistema floculado
- 2) Agitación: Una adecuada agitación es necesaria tanto en el momento de dosificación del polímero como en el proceso de formación y engorde del flóculo. Es decir, al inicio debe de ser rápida para la buena formación de flocs y luego de be de ser lenta y así poder evitar la ruptura de los flocs.
- 3) Peso molecular del polímero: El peso molecular es una de las propiedades que caracterizan a un polímero y determinan la eficacia de la floculación. Cuando se utiliza un polímero de alto peso molecular se produce un aumento en la relación óptima polímero/sólidos, es decir, mayor número de moléculas pueden ser adsorbidas y utilizadas por las partículas.
- 4) Concentración de sólidos: La estabilidad de los flóculos crece con la densidad de los sólidos.

- 5) Superficie de los sólidos: La dosis óptima de floculante es proporcional a la superficie específica del sólido; es decir al aumentar de tamaño o superficie de la partícula se reduce la dosis de floculante.
- 6) Efecto de la temperatura: Existe la creencia general de que un aumento de temperatura mejora la floculación. Esto no siempre es así, ya que, si bien la velocidad de difusión del floculante y de colisión de partículas es mayor, la adsorción es menor por ser exotérmica.
- 7) Efecto del pH: El pH puede afectar a la cantidad y tipo de cargas presentes en la superficie de los sólidos, así como la cantidad de carga libre que configura el polímero en disolución.

La efectividad de los polímeros varía en función del rango del pH:

- a) Los polímeros aniónicos, normalmente, son más efectivos a pH entre 7 y 14.
- b) Los no iónicos son capaces de adsorber las partículas Los no iónicos son capaces de adsorber las partículas con pH de 6 a 10.
- c) Finalmente, los catiónicos suele actuar entre pH 4 y 8

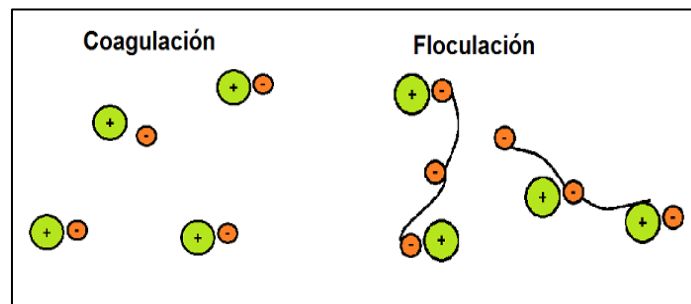


Figura 20: Proceso de coagulación y floculación.

Fuente: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/floculantes-o-ayudantes-de-coagulacion/>

Eficiencia en la remoción de la turbidez

En lo que respecta a la eficiencia en la remoción de la turbiedad del agua, esta relaciona la turbiedad inicial expresada en NTU, antes de ser dosificada con coagulante y floculante, menos la turbidez final, todo esto sobre la turbidez inicial y para tenerlo en porcentaje al resultado anterior le multiplicamos por 100.

Para hallar la eficiencia se tiene la siguiente ecuación:

$$Ef(\%) = \frac{NTU(inicia) - NTU(final)}{NTU(inicia)} 100 \quad (72)$$

Dónde:

Ef (%): eficiencia el tratamiento.

NTU (inicial): turbidez inicial.

NTU (final): turbidez final.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Afirmado:

Capa compactada de material granular natural o procesado con gradación específica que soporta directamente las cargas y esfuerzos del tránsito. Debe poseer la cantidad apropiada de material fino cohesivo que permita mantener aglutinadas las partículas. Funciona como superficie de rodadura en carreteras y trochas carrozables.

Canal de coronación:

El canal de coronación se diseña en la parte alta de un talud con la finalidad de interceptar y conducir adecuadamente las aguas lluvias, evitando su paso por el talud.

Colmatación:

Se denomina comúnmente colmatación a la acumulación de sedimentos. Se dice que un suelo está colmatado, cuando, su permeabilidad original se ha reducido sustancialmente, a causa del progresivo entupimiento de los poros existentes entre sus partículas, con materiales finos transportados en suspensión por el agua que se va infiltrando.

Coloides:

Puede decirse que un coloide es un sistema no homogéneo. El concepto de coloide se emplea para nombrar a aquella sustancia que, al encontrarse en un líquido, se dispersa poco a poco. Un coloide se compone de dos fases: una fase dispersora o dispersante y una fase dispersa.

Control:

Consiste en atrapar las partículas de sedimentos dentro del límite de la operación y proyectos para reducir la cantidad de sedimento transportado a estructuras ubicadas fuera del área de operaciones.

Los controles usados para capturar los sedimentos y reducir la carga de partículas deben ser específicos, se recomienda el uso de serpentines; pozas y/o diques de contención, para reducir la energía cinética del agua, incrementar el tiempo de retención y propiciar de manera física el asentamiento de los sólidos; en el caso de persistencia de sedimentos se usarán de químicos (coagulantes/floculantes) para estimular el asentamiento de los sedimentos.

DEM:

Es el modelo digital de elevación, y viene a ser una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, lo cual permite la caracterización de su relieve.

Geomembrana:

Las geomembranas son un recubrimiento, una membrana o barrera de muy baja permeabilidad aplicada a la ingeniería para controlar la migración de fluidos. Las geomembranas son hechas a partir de hojas relativamente delgadas de polímeros como HDPE o PVC. En general, son sistemas de impermeabilización para la construcción de túneles, canales, *embalses*, lagunas de oxidación, rellenos sanitarios y piscinas de recolección de lodos.

Gramíneas:

Son las plantas angiospermas monocotiledóneas que tienen tallos cilíndricos, comúnmente huecos, interrumpidos de trecho en trecho por nudos llenos, hojas alternas que nacen de estos nudos y abrazan el tallo, flores muy sencillas, dispuestas en espigas o en panojas, y grano seco cubierto por las escamas de la flor; p. Ej., el trigo, el arroz, el ichu, etc. Usado también como sustantivo femenino.

Granulometría:

La granulometría es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

El método de determinación granulométrico más sencillo es obtener las partículas por una serie de mallas de distintos anchos de entramado, que actúen como filtros de los granos que se llama comúnmente columna de tamices

Gravas:

Se denomina grava a las rocas formadas por clastos de material pétreo (es decir, piedras) de tamaño variable que comprendido entre 2 y 64 milímetros. Este material se origina por fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial.

Ichu

Es un pasto del altiplano andino sudamericano empleado como forraje para ganado. Planta herbácea espontánea en los páramos de la cordillera de los andes. (Familia gramíneas).

Partes por millón (ppm):

Es una unidad de medida en las que se mide la concentración, es decir viene hacer la cantidad de unidades de una sustancia que hay por cada millón del conjunto.

Partículas en suspensión:

Son todas las partículas microscópicas sólidas y líquidas, de origen humano o natural, que quedan suspendidas en el aire durante un tiempo determinado. Dichas partículas tienen un tamaño, composición y origen muy variables y muchas de ellas son perjudiciales.

pH:

Se trata de una unidad de medida de alcalinidad o acidez de una solución, más específicamente el pH mide la cantidad de iones de hidrógeno que contiene una solución determinada, los significados de sus siglas son, potencial de hidrogeniones que determinan el grado de acidez y alcalinidad de una sustancia.

Pozas de sedimentación:

Poza de sedimentación: estructura que sirve para almacenar y dar tiempo de reposo a las aguas de escorrentía a fin de permitir la sedimentación de los sólidos en suspensión contenidos en el agua.

RASTER:

Es una matriz de celdas organizadas en filas y en columna, en la que cada celda contiene información, como coberturas vegetales, etc.

Remediación

Tarea o conjunto de tareas a desarrollarse en un sitio contaminado con la finalidad de eliminar o reducir contaminantes, a fin de asegurar la protección de la salud humana y la integridad de los ecosistemas.

Sistema de información geográfica (GIS O SIG):

Es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización

de grandes cantidades de datos geográficos que están vinculados a una referencia espacial.

Suelos arcillosos

Este tipo de suelos está formado por granos finos de color amarillento, retienen mucho el agua y forman charcos. Este tipo de suelos tienen gran poder de retener agua y nutrientes pero una baja porosidad.

Suelos arenosos:

Contiene partículas más grandes que el resto de los suelos. Es áspero y seco al tacto porque las partículas que lo componen están muy separadas entre ellas y no mantienen bien el agua, se caracterizan por que el agua se drena rápidamente.

Suelos limosos

Estos tipos de suelos se componen de partículas más pequeñas y suaves al tacto que los arenosos. Los suelos limosos retienen el agua por más tiempo. Su color es marrón oscuro, los limos se componen de una mezcla de arena fina y arcilla que forma una especie de barro junto al lodo y restos vegetales.

Temperatura:

La temperatura es una magnitud que mide el nivel térmico o el calor que un cuerpo posee. Toda sustancia en determinado estado de agregación (sólido, líquido o gas), está constituida por moléculas que se encuentran en continuo movimiento. La suma de las energías de todas las moléculas del cuerpo se conoce como energía térmica; y la temperatura es la medida de esa energía promedio.

Tiempo de residencia

Es el tiempo requerido para que un determinado material complete su ciclo de ingreso, permanencia y egreso en un medio permeable.

Transporte:

Es el traslado de algo de un lugar a otro a través de un medio, para el caso del tema en estudio, se habla del transporte de sedimentos, el cual consiste en el traslado de sedimentos a través de una corriente de agua en un canal natural o artificial, producto de la erosión del suelo.

Turbidez:

Se entiende por turbidez o turbiedad a la medida del grado de transparencia que pierde el agua o algún otro líquido incoloro por la presencia de partículas en suspensión .

Turbidímetro:

Un turbidímetro es un instrumento nefelométrico que mide la turbidez causada por partículas suspendidas en un líquido. Haciendo pasar un rayo de luz a través de la muestra se mide la luz reflejada por las partículas en un ángulo de 90° con respecto al rayo incidente. Las lecturas se dan en unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

Unidades nefelométricas de turbidez (NTU)

Son las unidades en las que se mide la turbidez en una muestra de agua y significa que el instrumento mide la luz difusa de la muestra en un ángulo de 90 grados con respecto a la luz incidente.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN.

Los proyectos Tantahuatay y Ciénega Norte, los cuales están ubicados en la comunidad campesina del tingo y en los alrededores del distrito de Chugur respectivamente, estos pertenecen a la provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca. Estos proyectos están a una altitud que varía desde los 3750-4050 m.s.n.m. los cuales son jurisdicción de la CIA Minera Coimolache S.A.



Figura 21: Ubicación de la zona de estudio en el contexto global.

Fuente: IGN-2013.

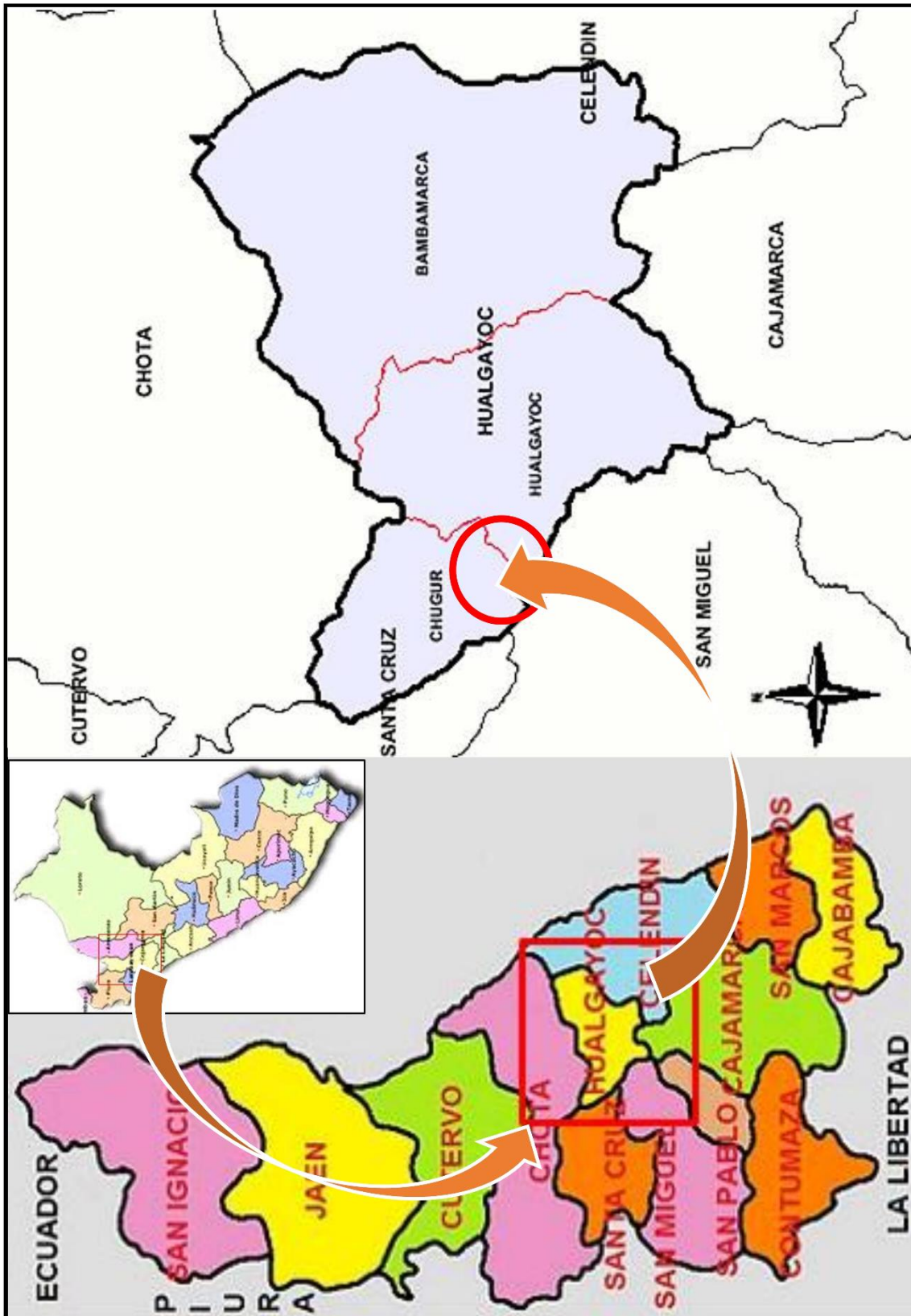


Figura 22: Ubicación de la zona de estudio en el contexto nacional.

El área de estudio de esta investigación tuvo lugar dentro del proyecto Tantahuatay en las instalaciones de la Planta de Procesos Metalúrgicos. Específicamente tiene el nombre de Huevo 1 Oeste. Dicho lugar está en la zona 17S y el sistema de coordenadas utilizadas es PSAD56, tal como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 19: Coordenadas UTM del punto zona de estudio

Área de Estudio	Coordenadas UTM		Altitud (m.s.n.m.)
	Este	Norte	
Huevo 1 Oeste	756840.4	9253988.1	3826.5

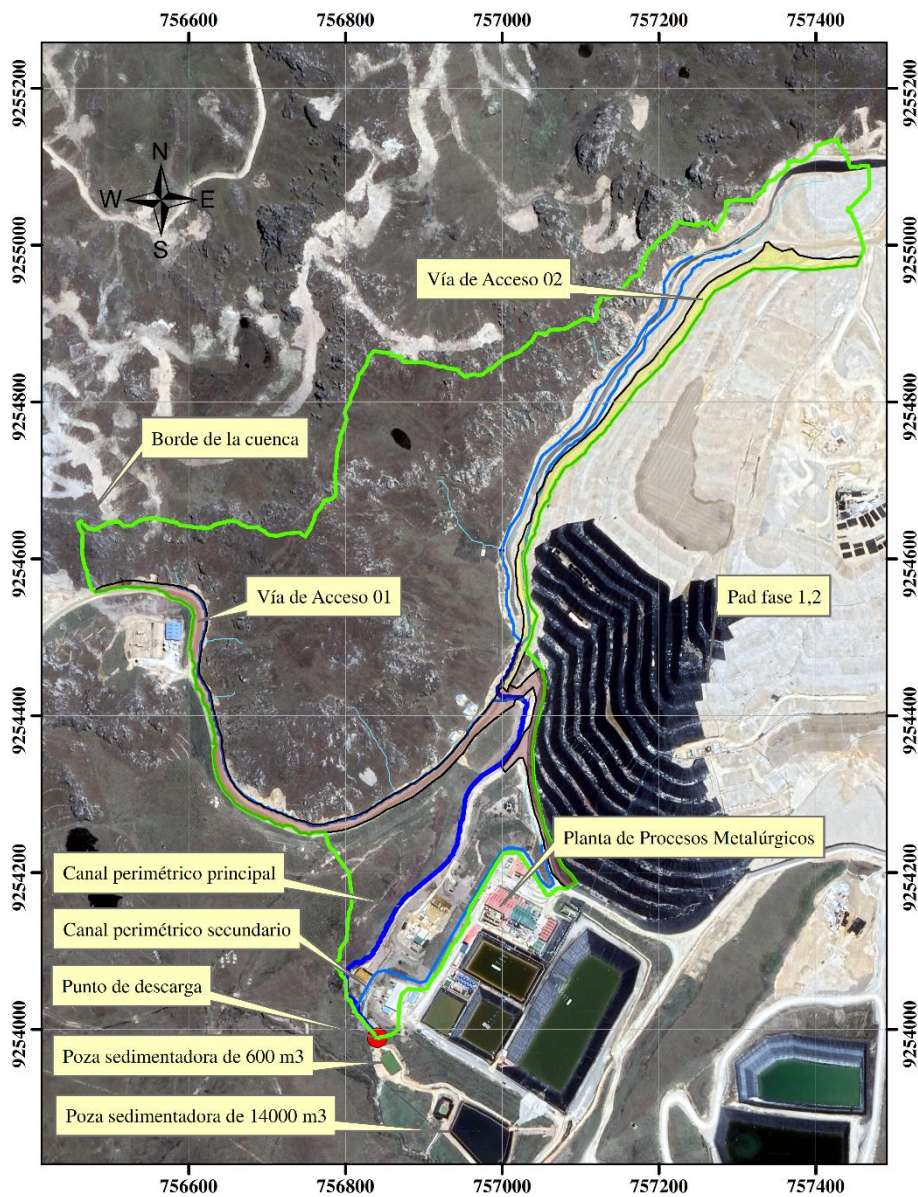


Figura 23: Ubicación de la zona de estudio.

3.2. ACCESIBILIDAD

Para llegar hacia la zona de estudio, es a través de la vía asfaltada que comunica a Cajamarca con Bambamarca, a la altura del km 71 la vía se bifurca en una vía afirmada denominada desvío a Ramírez de la cual son 4 km. Más para llegar al lugar del estudio. El tiempo que tarda en llegar una camioneta es de 2 h 10 minutos aproximadamente y una combi es de 2h 20 minutos.

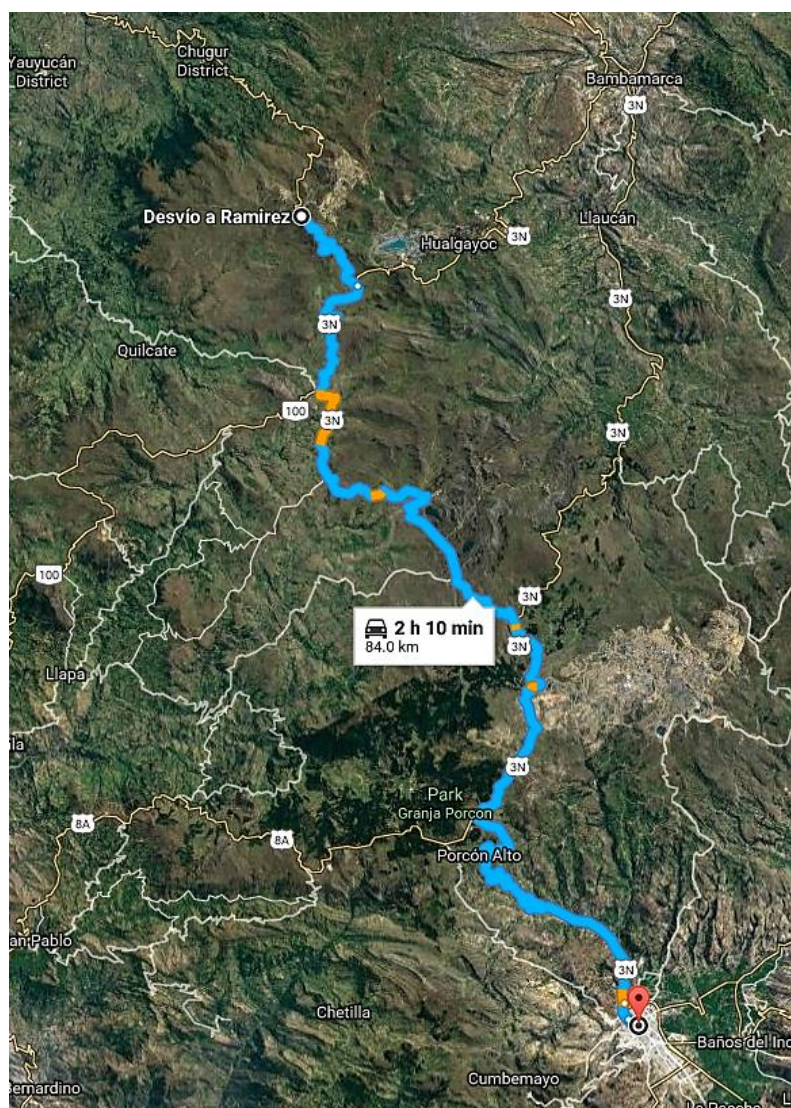


Figura 24: Acceso de zona de estudios a través de Google Maps.

3.3. CLIMA

El clima del lugar tiene tendencia a ser húmedo frío.

En cuanto a la temperatura media anual, esta oscila entre los 5.0°C a 8.0 °C, con respecto a las precipitaciones esta presenta un módulo de precipitación media anual de 1140 mm; según registro de la Estación Campamento Definitivo.

3.4. ACTIVIDAD ECONÓMICA

La actividad económica gira en torno a la minería extractiva polimetálica con operaciones a cielo abierto.

3.5. FLORA

A la vegetación típica de esta zona es el ichu, una gramínea propia de esta región climática, también hay la presencia de cultivos como oca, olluco y papa.

3.6. TOPOGRAFÍA

La topografía del lugar se caracteriza por presentar una superficie accidentada y montañosa, lo cual fue producto de factores geodinámicas, geológicos y tectónicos.

3.7. MATERIALES

Materiales

Los materiales usados fueron:

- Wincha de 5 m.
- Balde de 20L.
- Palana.
- Pico.
- Bolsas para muestras.
- Tamices según norma ASTM.
- Brocha.
- Martillo.
- Probetas
- Pipetas
- Vasos de precipitación.
- Floculante.
- Coagulante.
- Agua destilada.
- Libreta de apuntes.
- Marcadores.
- Bandejas.

Los equipos usados fueron

- Balanza con precisión de 0.1 g.
- Balanza analítica.
- Horno para secado de muestras.
- Turbidímetro.
- Multiparámetro. (para medir pH y temperatura)
- JAR TEST (para las pruebas de jarras).
- Cámara fotográfica.
- Computadora.

Los softwares usados fueron.

- Microsoft Excel 2013.
- Microsoft Power Point 2013.
- Microsoft Word 2013.
- Autocad Civil 3D 2015.
- Global Mapper v.18.
- Google Earth Pro.
- ArcGIS v10.4.1
- Hcanales v3.0.

3.8. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

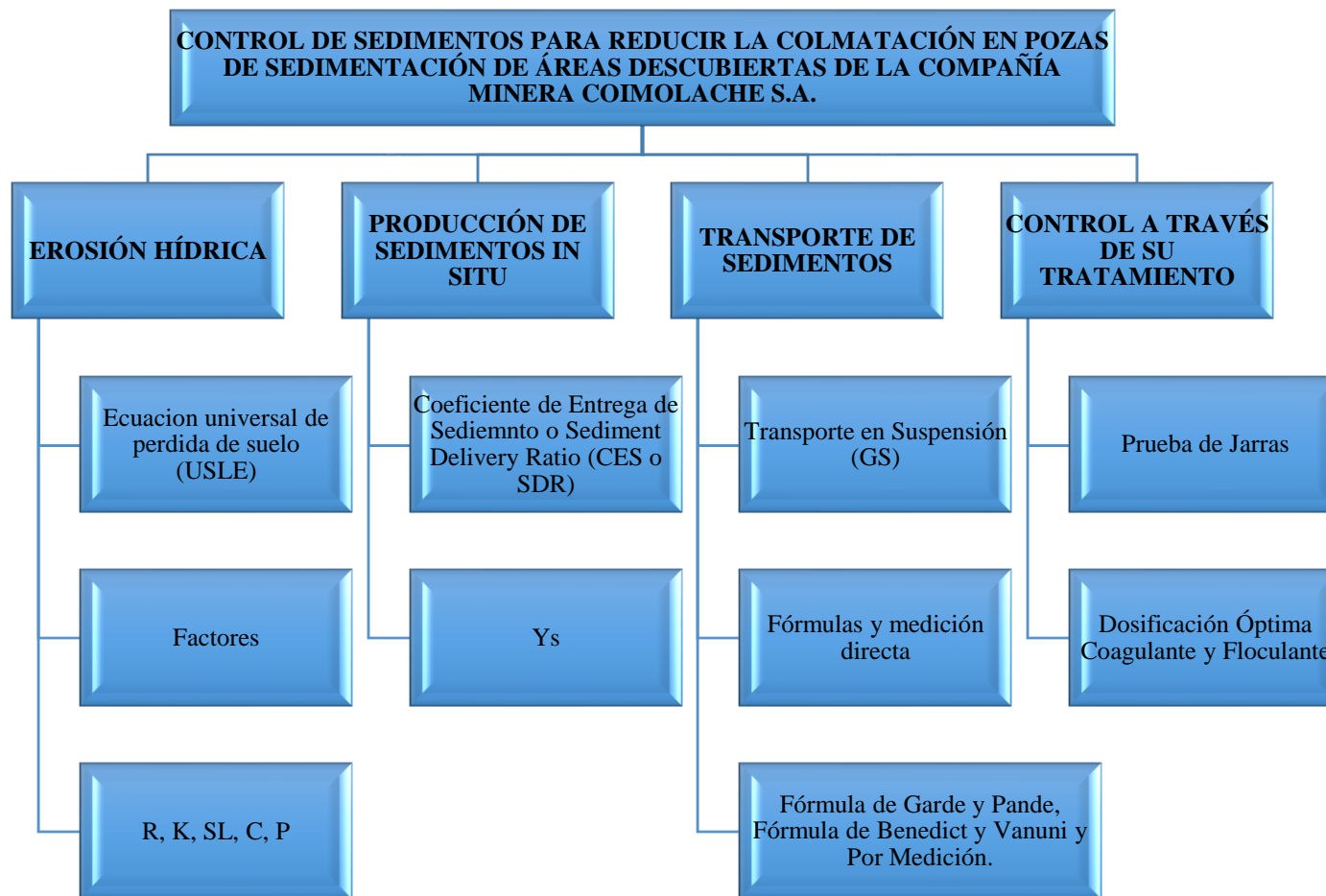


Figura 25: Esquema general de la investigación.

3.9. PROCEDIMIENTO EN CAMPO

El procediendo se realizó de la siguiente manera, primero fue la identificación de la zona de estudio, es decir primero se realizó la delimitación de la microcuenca a estudiar, luego se procedió a realizar la toma de muestras de los diferentes tipos de suelos que se pudo identificar, tanto en áreas disturbadas como en áreas naturales, remediadas y por último se realizó la toma de muestras de material sedimentado tanto en el desarenador como en las pozas de sedimentación.

También se realizó la toma de muestras de agua en eventos de precipitación pluvial.

a. Toma de muestras de suelo

Las muestras se tomaron en diferentes puntos de la zona de estudio.



Figura 26: Recolectando la muestra una vía de acceso.



Figura 27: Recolectando muestra de un suelo natural.



Figura 28: Recolectando muestra en el desarenador de material sedimentado.



Figura 29: Vista de la primera poza de sedimentación (600 m³) llena de sedimento

b. Pesado, secado y tamizado de las muestras de suelo.

En este procedimiento se realizó el secado de las muestras a la temperatura de 105°C por un día para realizar el análisis granulométrico.

También se realizó el registro de datos como densidad y peso específico.



Figura 30: Pesando las muestras antes de ponerlas a secar.



Figura 31: Muestras de suelo seco.



Figura 32: Tamizando las muestras

c. Toma de muestras de agua

En este paso se realizó la recolección de las muestras de agua del canal principal, y estos fueron tomados en cuando se producía los eventos de precipitación pluvial, estas muestras se tomaron en un balde de 20 litros de capacidad.

Las muestras que se tomaron se indica en el anexo 3.

3.10. PROCEDIMIENTO DE GABINETE

a. Obtención de los parámetros morfométricos de la cuenca

Este paso trata sobre el cálculo de los parámetros morfométricos que se obtuvieron de la cuenca los cuales son una pieza clave en el estudio, ya que de ella depende los cálculos que se usaran en la aplicación de la USLE, cálculo del caudal de diseño y también para la transferencia de información.

A partir del levantamiento topográfico se obtuvo las curvas de nivel, luego se procedió a realizar la delimitación de la cuenca a ser estudiada y ubicar el punto de descarga.

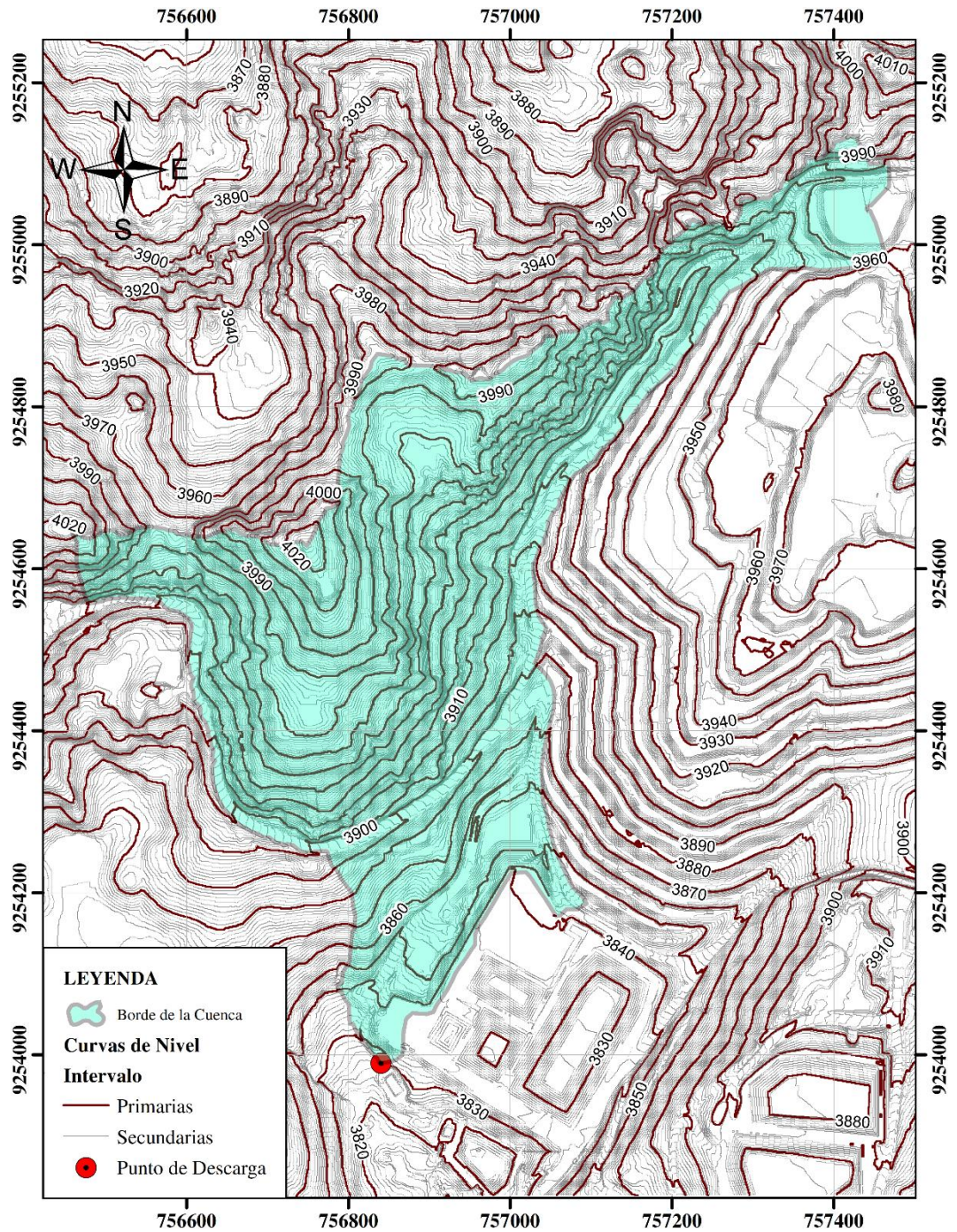


Figura 33: Plano topográfico de la zona de estudio.

Una vez que se definió el área de estudio, se procedió a determinar los parámetros morfo métricos, los cuales se presentan a continuación.

Tabla 20: Resumen de los parámetros morfo métricos de la cuenca.

Parámetros Geomorfológicos de la Cuenca		unidad	Valor
Información general de la cuenca	Área (Km ²)	Km ²	0.325
	Perímetro (Km)	Km	4.075
	longitud del cauce principal (L)	Km	0.661
	longitud total de cauces (Li)	Km	3.926
	cota mayor del cauce principal	m.s.n.m.	3885
	cota menor del cauce principal	m.s.n.m.	3827
Parámetros de forma	Coefficiente de compacidad o índice de Gravelius (k _c)	Adim.	2.015
	Factor de forma (k _f)	Adim.	0.744
Parámetros de relieve	Pendiente media de la cuenca(S)	%	24.959
	Histograma de Frecuencias Altimétricas	Ver Figura 34	
	Curva hipsométrica	Ver Figura 35	
	Elevación media de la cuenca (Em)	m.	3934
	La pendiente del cauce principal (Sm)	%	11.665
	Longitud Lado Mayor (Lm)	Km	1.879
	Longitud Lado Menor (lm)	Km	0.173
Parámetro de la red de drenaje	Orden de la cuenca	Adim.	3
	Densidad de drenaje (D)	Km ⁻¹	12.068

Tabla 21: Rango de cotas de la cuenca y sus respectivas áreas.

Intervalo (m.s.n.m.)	Cota Media (m.s.n.m.)	Áreas (km.)	%	Área Acumulada Por Debajo	% Acumulado	Área Acumulada Por Encima	% Por encima
						0.3253	100.00%
3827	3830	3829	0.0004	0.13%	0.0004	0.13%	99.87%
3830	3850	3840	0.0192	5.92%	0.0197	6.05%	93.95%
3850	3870	3860	0.0270	8.31%	0.0467	14.36%	85.64%
3870	3890	3880	0.0224	6.90%	0.0692	21.26%	78.74%
3890	3910	3900	0.0228	7.01%	0.0920	28.27%	71.73%
3910	3930	3920	0.0408	12.54%	0.1328	40.81%	59.19%
3930	3950	3940	0.0470	14.45%	0.1797	55.26%	44.74%
3950	3970	3960	0.0629	19.33%	0.2426	74.58%	25.42%
3970	3990	3980	0.0547	16.82%	0.2973	91.40%	8.60%
3990	4010	4000	0.0215	6.61%	0.3188	98.01%	1.99%
4010	4026	4018	0.0065	1.99%	0.3253	100.00%	0.00%
TOTAL		0.325					

De la tabla anterior se obtiene el histograma de frecuencias y la curva hipsométrica.

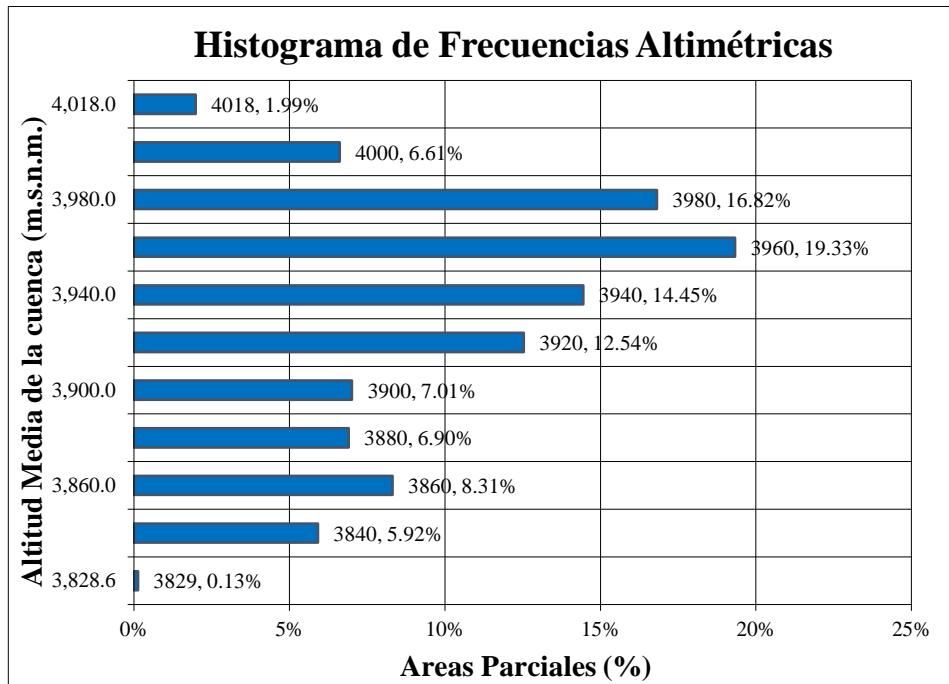


Figura 34: histograma de frecuencias.

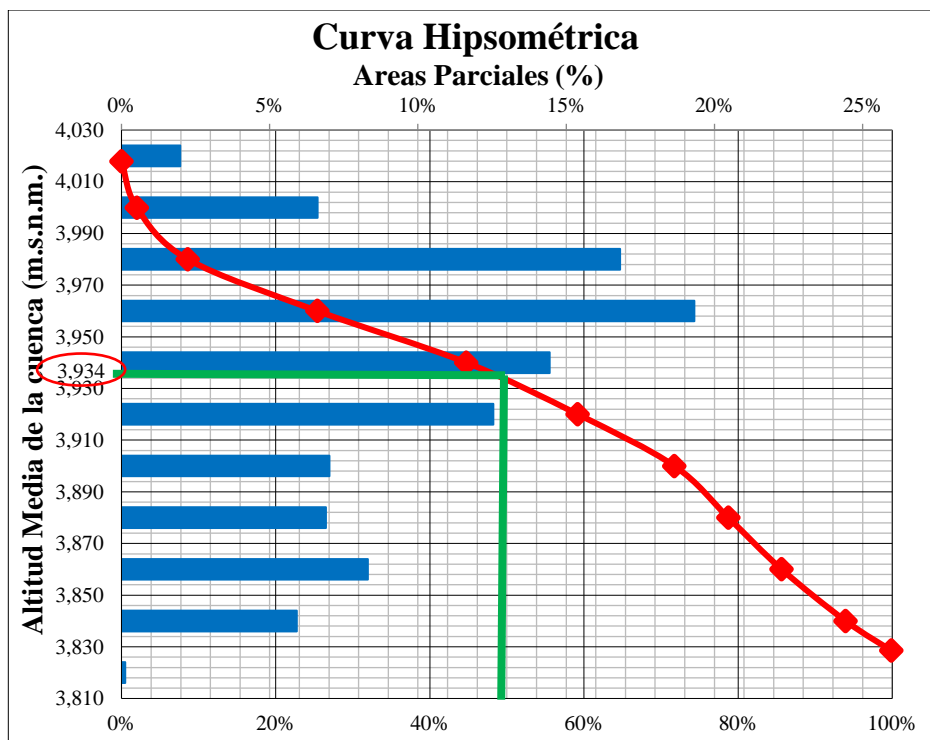


Figura 35: Obtención de la altura media de la cuenca.

En cuanto al drenaje de la cuenca se identificó que la cuenca es de orden 3 y según su densidad de drenaje se puede decir que es alto ya que su valor es de 12.068, de acuerdo con la tabla 3

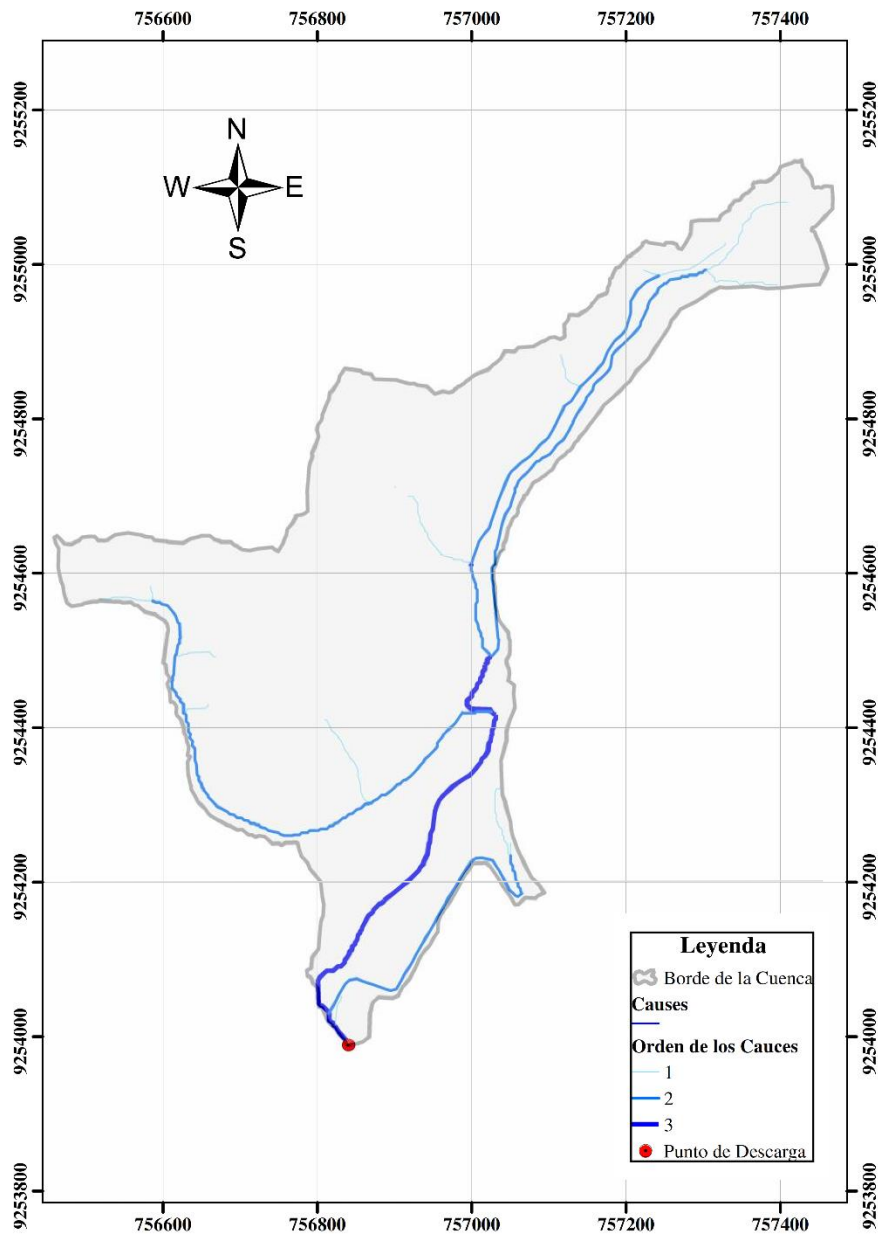


Figura 36: Red de drenaje de la cuenca.

b. Estudio hidrológico de la estación base para la transferencia de información

En este paso se recoge y trata la información hidrológica haciendo un análisis provistico de variable extrema. Tal es el caso de la estación base, cuyos valores del análisis se detallan a continuación.

La estación base es la estación A. Weberbauer la cual está ubicada dentro de las instalaciones de la Universidad Nacional de Cajamarca.

Ubicación:

Departamento: Cajamarca Provincia: Cajamarca Distrito: Cajamarca

Lat.: 07° 10' Long. 78° 30' Altitud: 2536 m.s.n.m.

Sea el registro de intensidades máximas el que se muestra a continuación.

Tabla 22: Registro de intensidades máximas desde 1973-2011

AÑO	5 min.	10 min.	30 min.	60 min.	120 min.
1973	101.00	71.00	24.00	14.00	11.00
1974	73.00	58.00	34.00	18.00	19.00
1975	90.00	50.00	24.00	16.00	10.00
1976	68.00	63.00	37.00	19.00	9.00
1977	65.00	53.00	37.00	21.00	11.00
1978	26.00	24.00	21.00	12.00	6.00
1979	60.00	60.00	38.00	23.00	14.00
1980	73.02	60.10	33.80	21.08	9.28
1981	67.20	54.80	29.13	15.54	13.02
1982	88.29	75.15	37.20	23.10	13.27
1983	75.30	50.40	31.40	23.71	13.99
1984	112.80	71.80	27.60	15.63	9.80
1985	59.31	54.40	25.56	14.70	8.05
1986	84.60	65.40	30.11	15.60	8.23
1987	76.00	49.20	21.60	13.20	7.95
1988	70.40	52.80	23.00	13.79	7.85
1989	73.60	47.80	28.00	16.00	9.60
1990	111.60	75.00	37.94	23.00	12.00
1991	83.00	73.00	41.00	26.00	14.00
1992	56.00	39.00	19.00	10.00	5.00
1993	58.00	51.00	28.00	18.00	10.00
1994	91.49	64.18	36.22	19.04	12.91
1995	71.11	56.25	28.66	16.72	9.32
1996	81.30	60.21	32.44	17.88	11.12
1997	82.20	68.10	35.04	17.86	8.94
1998	92.00	66.34	40.60	27.10	13.50
1999	89.10	65.08	45.05	26.03	12.01
2000	70.08	56.07	35.04	23.03	14.02
2001	56.07	50.06	30.03	18.02	6.01
2002	40.80	25.80	14.50	10.49	6.55
2003	68.00	40.40	15.70	8.40	4.60
2004	28.90	28.30	29.20	12.90	7.60
2005	78.00	44.00	22.00	14.60	9.40
2006	42.00	30.70	13.50	9.40	6.30
2007	38.40	29.28	17.24	10.57	6.02
2008	16.80	14.03	9.40	6.34	3.71
2009	68.00	49.20	32.04	22.00	4.05
2010	86.40	38.50	30.67	20.28	10.89
2011	62.40	36.60	26.80	16.60	10.00
Media (x)	70.133	51.845	28.781	17.169	9.718
Des. Est.(Sx)	21.520	15.305	8.303	5.150	3.333

Después de hacer el análisis de variable extrema por el método Gumbel se obtuvo la siguiente tabla.

Tabla 23: Período de retorno y duración de tormenta.

Tr	DURACIÓN EN MINUTOS				
	5	10	30	60	120
5	84.97	62.40	34.51	20.72	12.02
10	96.60	70.67	39.00	23.51	13.82
20	107.76	78.61	43.30	26.18	15.55
25	111.30	81.13	44.67	27.02	16.10
50	122.21	88.88	48.88	29.63	17.78
75	128.55	93.39	51.32	31.15	18.77
100	133.03	96.58	53.05	32.22	19.46
200	143.82	104.25	57.21	34.81	21.13

Tr, es el tiempo de retorno en años.

De la tabla anterior se pudo obtener las curvas IDF

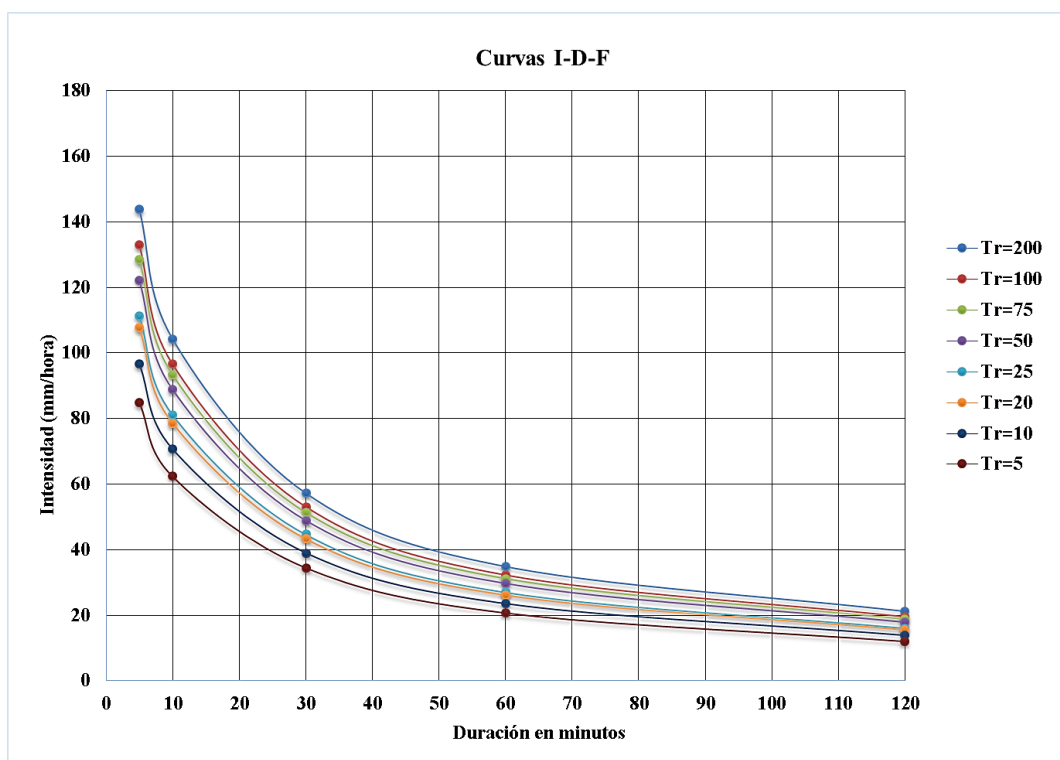


Figura 37: Curvas IDF obtenidas después de hacer el análisis de variable extrema.

Antes de calcular el caudal de diseño primero se tiene que realizar la transferencia de información hidrológica de la estación a la de destino.

Para poder realizar la transferencia de información de una cuenca hacia otra, fue necesario comparar los parámetros como son: el *índice de Gravelius*, *relación de confluencias* y *el coeficiente orográfico*.

Cabe resaltar que la cuenca en estudio es una subcuenca de la microcuenca del Río Llaucano, y por ende se hizo la comparación entre la cuenca del Río Mashcón con la cuenca del río Llaucano.

Tabla 24: Resumen de parámetros.

Microcuenca	Río Mashcón	Río Llaucán
Área km ²	667.440	622.670
Perímetro P (Km)	137.210	110.960
Altitud H(msnm)	3533	3484
Número de orden	3	4
Coeficiente Gravelius Kc	1.490	1.240
Relación de confluencias	3.670	4.010
Coeficiente orográfico	1.870	1.950
Cuenca	Crisnejas	Alato Marañón
Vertiente	Atlántico	Atlántico

Fuente: Ortiz Vera, O. (2015).

La información que fue transferida de la estación base a la zona de estudio fueron las tormentas máximas.

La estación base es la estación Augusto Webervawer, la cual se ubica a una altitud de 2536 m.s.n.m. y la zona de estudio se ubica a una altitud promedio de 3934 m.s.n.m.

Mediante la aplicación de la función de transferencia de la ecuación (12).

$$I_d = \left(\frac{3934}{2536}\right)(1)(I_0) \dots\dots\dots I$$

A través de la ecuación (I) y de la tabla (23) se genera las curvas IDF para la zona de estudio, tal como se muestra a continuación.

Tabla 25: Período de retorno y duración de tormenta con datos trasferidos a la zona de estudio.

Tr	DURACIÓN EN MINUTOS				
	5	10	30	60	120
5	131.81	96.79	53.53	32.14	18.64
10	149.86	109.63	60.49	36.46	21.44
20	167.17	121.94	67.17	40.61	24.12
25	172.66	125.85	69.29	41.92	24.97
50	189.58	137.88	75.82	45.97	27.59
75	199.41	144.87	79.61	48.32	29.11
100	206.37	149.82	82.30	49.99	30.19
200	223.10	161.72	88.75	53.99	32.78

De la tabla anterior se genera las curvas IDF para la zona de estudio.

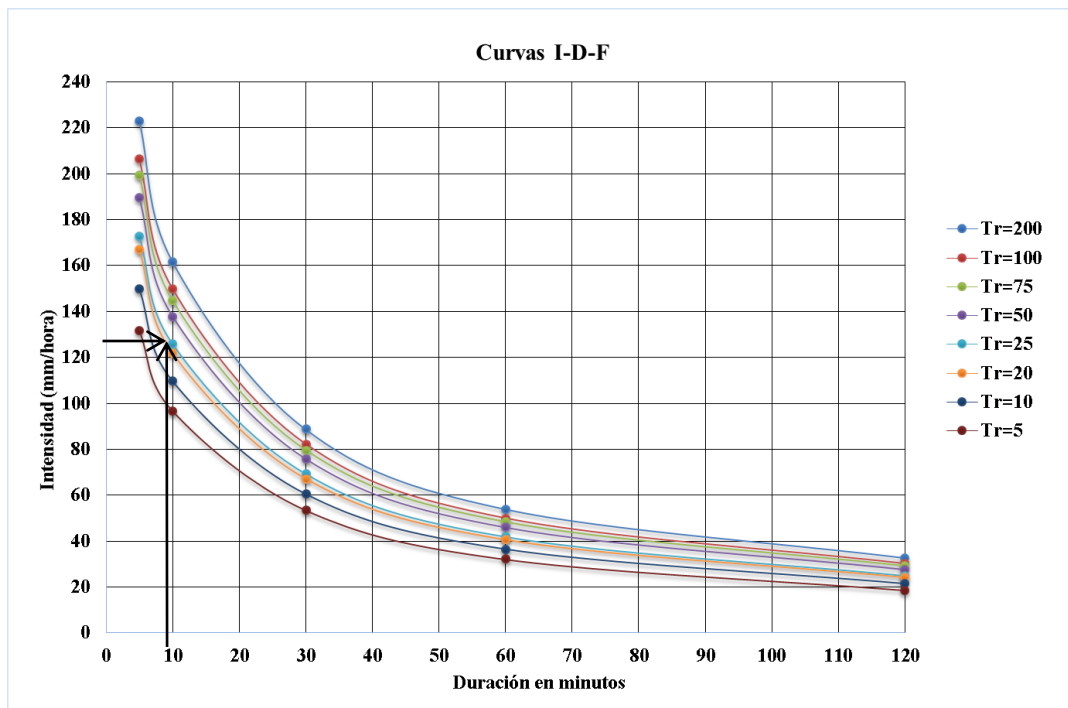


Figura 38: Curvas IDF obtenidas después de hacer la trasferencia de tormentas a la zona de estudio.

c. Obtención del caudal de diseño

En este paso se convierte la lluvia en escorrentía, para ello se usa el método racional por su sencillez de uso, antes de hacer uso de este método hay que haber estimado el coeficiente de escorrentía, la intensidad, el período de retorno y el tiempo de concentración.

Obtención de los factores del caudal de diseño

De la tabla 4 se tomó para este estudio un período de retorno $T = 25$ años, esto con el fin de evaluar el transporte de sedimentos considerando un caudal máximo para un período de retorno de 25 años.

De la tabla (6 se usó la siguiente fórmula (Kirpich) para calcular el tiempo de concentración.

$$T_c = (0.0195)(1470^{0.77})(0.2496^{-0.385})$$

$$T_c = D = 9.14 \text{ minutos} \dots \dots \dots \text{(II)}$$

A través de la figura 38 y el resultado (II), se estimó la intensidad para ese tiempo de duración.

$$I_x = 128 \text{ mm/h} \dots \dots \dots \text{(III)}$$

Antes de calcular el caudal de escorrentía o caudal de diseño primero se tuvo que determinar el coeficiente de escorrentía y para ello se hizo uso de la tabla 7.

En la zona de estudio se identificaron tres áreas con diferente tipo de cubierta vegetal, es por ello que para determinar el coeficiente de escorrentía total se tuvo que determinar mediante su promedio ponderado.

Área natural = 24.33 has, área remediada = 5.7 has y las vías de acceso = 2.49 has.

C área natural = 0.46; C área remediada = 0.42; C de las vías de acceso = 0.65

$$C = \frac{(24.33)(0.46) + (5.7)(0.42) + (2.49)(0.65)}{24.33 + 5.7 + 2.49} = 0.47$$

Obtención del caudal de diseño

De esta mera se procedió a calcular el caudal máximo para un $T = 25$ años y se calculó según la ecuación (40) por el método racional.

$$Q(\text{máximo}) = \frac{C I_x A}{360} = \frac{(0.47)(128)(32.53)}{360} = 5.436 \frac{m^3}{s}$$

d. Determinación de los factores de la USLE

La metodología para determinar los factores de la USLE se muestran continuación.

Determinación del Factor R (Factor de Erosividad)

Para la determinación de este factor existen muchos métodos como el propuesto Wischmeier, el cual se basa en determinar la energía cinética de la tormenta, e otras palabras trata sobre la cuantificación de la erosión en función de la intensidad de precipitación.

Debido a que en muchas zonas no existe registro de tormentas (intensidades), es por ello que muchos autores propusieron ecuaciones para determinar en función de las precipitaciones acumuladas.

Para el presente estudio se hicieron uso de las ecuaciones (33, 34, 35, 36 y 37) y de estaciones meteorológicas con registro de precipitaciones medias mensuales y anuales.

Cabe mencionar que en la zona de estudio existen dos estaciones meteorológicas (Estación M. Campamento Definitivo y Estación M. Mirador), estas cuentan con registro desde el 2007 y del 2013 hasta la actualidad respectivamente. Las cuales no son suficientes para realizar el análisis ya que por lo menos se necesitarían un registro de 20 años.

Para cubrir esta falta de información se hizo uso de las siguientes estaciones meteorológicas: Estación M. Chugur, Estación M. Quebrada Shugar – Bambamarca, Estación M. Carachugo, Estación M. Maqui – Maqui y la Estación M. La Llica. Este registro de información fue obtenido del Estudio de Factibilidad: Presa río Chonta - Proyecto de regulación de las aguas del río Chonta mediante la presa Chonta.

A dichos registros de precipitaciones se les ha hecho un análisis hidrológico y se les ha completado y extendido para contar con un registro desde 1970 al 2013.

En esta investigación no trataremos la completación ni la extensión del registro de precipitaciones ya que no es objeto de estudio.

La Estación Meteorológica Campamento Definitivo (Anexo 1) se encuentra ubicada por el Este: 757670.17, por el Norte: 9255043.53 (UTM-WGS84) y tiene una altitud: 3907 m.s.n.m. es la que posee menor distancia hacia la zona de estudio. A manera de ejemplo ilustraré la obtención del factor R.

Tabla 26: valores del factor R obtenidos usando las diferentes ecuaciones.

año	Precipitaciones medias (2007-2017)	Lombardi	IMF
Ene	157.5	103.0	21.7
Feb	140.1	83.8	17.2
Mar	195.6	150.7	33.5
Abr	119.5	63.3	12.5
May	80.6	31.7	5.7
Jun	24.3	3.8	0.5
Jul	19.9	2.7	0.3
Ago	22.5	3.3	0.4
Sep	46.6	12.1	1.9
Oct	121.7	65.4	12.9
Nov	102.9	48.6	9.2
Dic	112.5	57.0	11.1
Prec. Med. Anual	1143.8		127.0
R Foster	236.8		
R Lombardi	150.7		
R FAO - IMF	127.0		
R ICONA	147.4		
R PROMEDIO	165.5		

- **Ecuación de Foster:**

$$R = \frac{0.276 p I_{30}}{100} = \frac{(0.0276)(1143.8)(75)}{100} = \mathbf{236.8} \frac{\text{MJ mm}}{\text{ha hr año}}$$

El I_{30} se asume de 75 mm/h, es un valor que fue propuesto por Wischmeier y “p” es la precipitación media anual.

- **Ecuación de Lombardi:**

$$R = 6.866 \left(\frac{P_i^2}{P_t} \right)^{0.86} = 6.866 \left(\frac{195.6^2}{1143.8} \right)^{0.89} = \mathbf{150.7} \frac{\text{MJ mm}}{\text{ha hr año}}$$

Donde P_i es la máxima precipitación media mensual y P_t es la precipitación media anual.

- **Ecuación de la FAO- IMF:**

$$R = \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i^2}{P_t} = \frac{157.5^2}{1143.8} + \dots + \frac{112.5^2}{1143.8} = \mathbf{127.0} \frac{\text{MJ mm}}{\text{ha hr año}}$$

- **Ecuación ICONA:**

$$R = 2.56 F^{1.065} \quad y \quad F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{\text{máx}}^2}{P_t}$$

Donde n es el número de años evaluados, P máx. Es la precipitación máxima de cada año y Pt es la precipitación total de ese año.

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{m\acute{a}x}^2}{P_t} = \frac{1}{7} \left[\left(\frac{245.4^2}{1209.4} \right) + \dots + \left(\frac{236.5^2}{1101.6} \right) \right] = 44.9 \text{ mm.}$$

$$R = 2.56 F^{1.065} = (2.56)(44.9^{1.065}) = 147.9 \frac{\text{MJ mm}}{\text{ha hr a\~{n}o}}$$

Por último, se procede a sacar el promedio de todos los factores de erosividad obtenido para cada estación, posteriormente se continuo con la creación de un mapa de isoerodatas en ARCGIS, esto con la finalidad de hacer una interpolación y de identificar que zonas dentro del área de estudio es la que presenta mayor erosividad.

El procedimiento con el ARCGIS fue el siguiente, una vez encontrado los valores promedios de erosividad para cada estación esto se pasó a una hoja de Excel y cada valor con sus respectivas coordenadas y cota. Estos puntos se lo exportan para convertirlos en un *shapefile*, posteriormente se sigue la siguiente línea de comandos, *3D Analyst Tools/Raster Interpolation/Spline* y se genera el mapa.

Tabla 27: Resumen de valores de erosividad para cada estación.

Ec. Propuesta por	E.M. Camp. Definitivo	E.M. Mirador	E.M.Chugur	E.M. Shugar	E.M. Carachugo	E.M. Maqui - Maqui	E.M. La Llica
	Precipitaciones medias (2007-2017)	Precipitaciones medias (2013-2017)	Precipitaciones medias (1970-2013)	Precipitaciones medias (1970-2013)	Precipitaciones medias (1970-2013)	Precipitaciones medias (1970-2013)	Precipitaciones medias (1970-2013)
R - Foster	236.8	225.03	313.8	200.6	271.6	235.2	180.1
R - Lombardi	150.7	147.1	219.8	94.6	163.8	127.0	80.7
R - FAO - IMF	127.0	119.86	224.9	90.8	181.5	135.3	75.4
R - ICONA	147.4	170.71	249.3	123.4	176.5	142.4	103.3
R - PROMEDIO	165.5	165.7	252.0	127.3	198.4	160.0	109.9

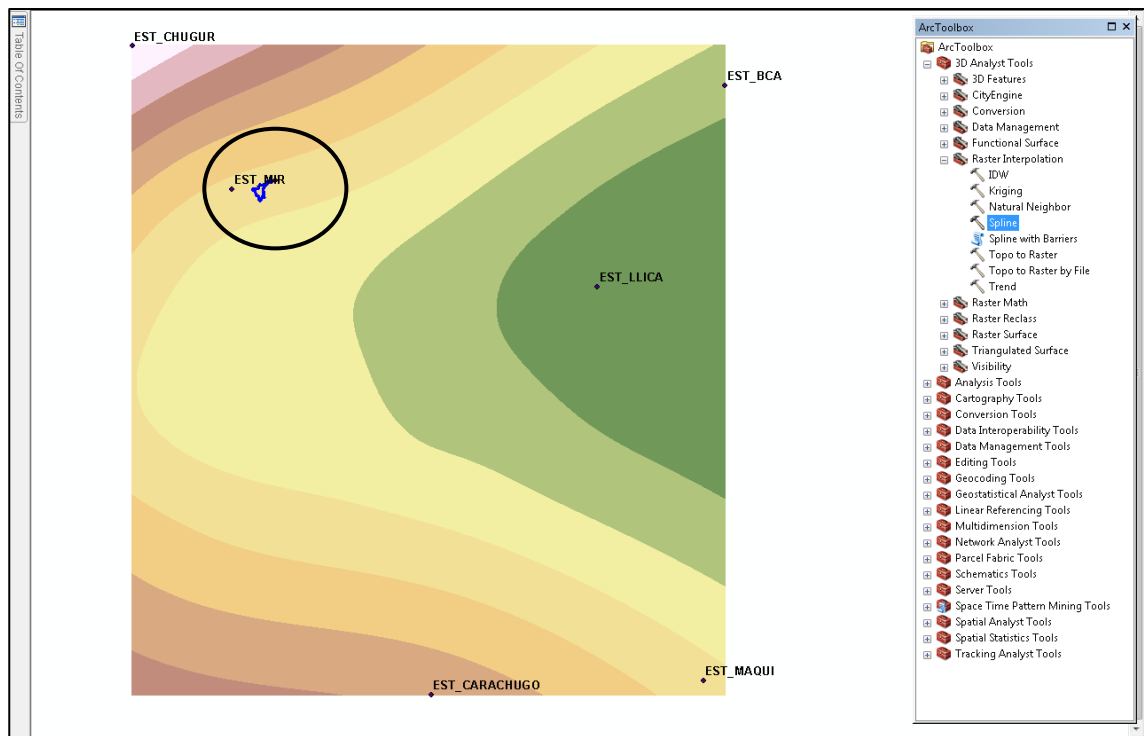


Figura 39: que resulta de unir puntos con igual valor de erosividad.

Determinación del Factor K (Factor de Erodabilidad)

Para determinar factor de erodabilidad se realizó mediante el nomograma propuesto por Wischmeier y a través de su ecuación, para lo cual se procedió a realizar cinco pasos los cuales se detallan a continuación.

Antes de eso tenemos el análisis granulométrico de las muestras de suelo.

Ubicación de la 1° muestra:

Vías de acceso 1 (suelo disturbado)

Este: 756842.70 m; Norte: 9254279.91 m; Altitud: 3892.50 m.s.n.m.

Parámetros de mecánica de suelos

Peso Húmedo (g.) = 1071.5; Peso Seco (g.) = 995.5; Humedad (%) = 7.63

Peso Específico seco (Pe (g. /cm³) = 2.3425

Tabla 28: Análisis granulométrico de la muestra N° 1.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso parcial retenido (g.)	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que pasa
1 1/2"	37.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
1"	25	0	0.0%	0.0%	100.0%
3/4"	19	0	0.0%	0.0%	100.0%
1/2"	12.5	4.4	0.4%	0.4%	99.6%
3/8"	9.5	7.8	0.8%	1.2%	98.8%
N° 4	4.75	31.6	3.2%	4.4%	95.6%
N° 8	2.36	125.9	12.6%	17.0%	83.0%
N° 12	1.7	103	10.3%	27.4%	72.6%
N° 20	0.85	250	25.1%	52.5%	47.5%
N° 50	0.3	205.8	20.7%	73.2%	26.8%
N° 100	0.15	86	8.6%	81.8%	18.2%
N° 200	0.075	78.9	7.9%	89.7%	10.3%
Platillo		102.1	10.3%	100.0%	0.0%
total		995.5	100%		

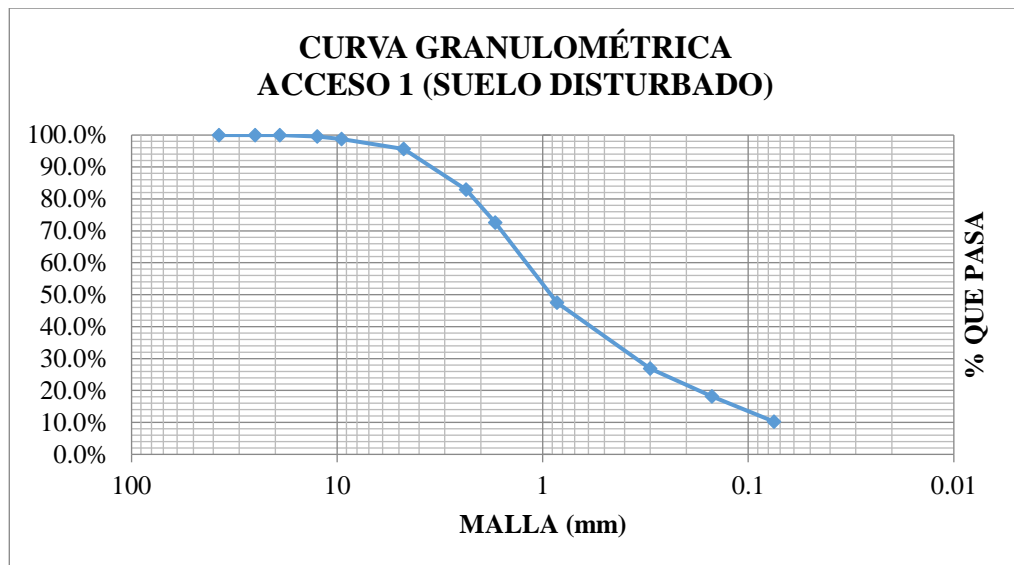


Figura 40: Curva granulométrica de la muestra N° 1.

Estimación del D10, D30 y D60:

Se realizó por medio de una interpolación.

$$D_{10} [\text{mm}] = 0.073; \quad D_{30} [\text{mm}] = 0.352; \quad D_{60} [\text{mm}] = 1.200$$

Coefficiente de uniformidad y Coeficiente de curvatura:

$$C_u = 16.37$$

$$C_v = 1.41$$

Ubicación de la 2° muestra:

Vías de acceso 2 (suelo disturbado)

Este: 757125.84 m; Norte: 9254766.43 m; Altitud: 3918.5 m.s.n.m.

Parámetros de mecánica de suelos

Peso Húmedo (g.)= 2183.7; Peso Seco (g.)= 2015.6; Humedad (%)= 8.34

Peso Específico seco (Pe (g. /cm³) = 2.5128

Tabla 29: Análisis granulométrico de la muestra N° 2.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso parcial retenido (g.)	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que pasa
1 1/2"	37.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
1"	25	48.8	2.4%	2.4%	97.6%
3/4"	19	57.2	2.8%	5.3%	94.7%
1/2"	12.5	26.6	1.3%	6.6%	93.4%
3/8"	9.5	50.6	2.5%	9.1%	90.9%
N° 4	4.75	248.8	12.3%	21.4%	78.6%
N° 8	2.36	511.6	25.4%	46.8%	53.2%
N° 12	1.7	269.6	13.4%	60.2%	39.8%
N° 20	0.85	254.6	12.6%	72.8%	27.2%
N° 50	0.3	207.4	10.3%	83.1%	16.9%
N° 100	0.15	100	5.0%	88.1%	11.9%
N° 200	0.075	88.6	4.4%	92.5%	7.5%
Platillo		151.8	7.5%	100.0%	0.0%
total		2015.6	100%		

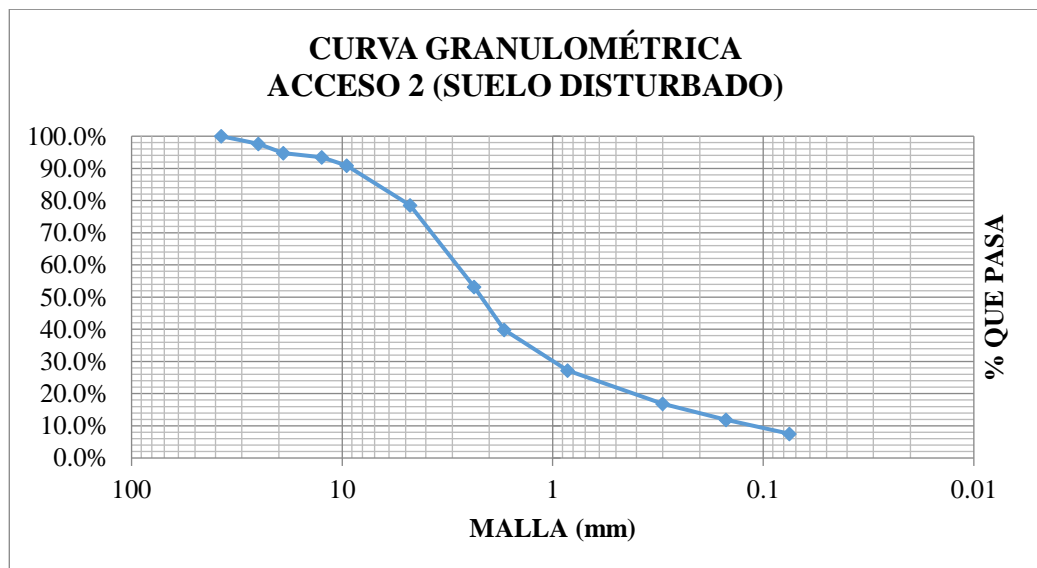


Figura 41: Curva granulométrica de la muestra N° 2.

Estimación del D₁₀, D₃₀ y D₆₀:

Se realizó por medio de una interpolación.

D_{10} [mm] = 0.111; D_{30} [mm] = 0.992; D_{60} [mm] = 2.848

Coefficiente de uniformidad y Coeficiente de curvatura:

$C_u = 25.72$

$C_v = 3.12$

Ubicación de la 3° muestra:

Suelo Remediado

Este: 756987.42 m; Norte: 9254249.19 m; Altitud: 3850.0m.s.n.m.

Parámetros de mecánica de suelos

Peso Húmedo (g.) = 2465.6; Peso Seco (g.)= 1948.2; Humedad (%)= 26.56

Peso Específico seco (P_e (g./cm³) = 1.6214

Tabla 30: Análisis granulométrico de la muestra N° 3

Tamiz	Abertura (mm)	Peso parcial retenido (g.)	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que pasa
1 1/2"	37.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
1"	25	49.5	2.5%	2.5%	97.5%
3/4"	19	78.9	4.0%	6.6%	93.4%
1/2"	12.5	156.6	8.0%	14.6%	85.4%
3/8"	9.5	201.3	10.3%	25.0%	75.0%
N° 4	4.75	416.4	21.4%	46.3%	53.7%
N° 8	2.36	476.1	24.4%	70.8%	29.2%
N° 12	1.7	192.3	9.9%	80.6%	19.4%
N° 20	0.85	119.7	6.1%	86.8%	13.2%
N° 50	0.3	136.8	7.0%	93.8%	6.2%
N° 100	0.15	75.6	3.9%	97.7%	2.3%
N° 200	0.075	34.5	1.8%	99.5%	0.5%
Platillo		10.5	0.5%	100.0%	0.0%
total		1948.2	100%		

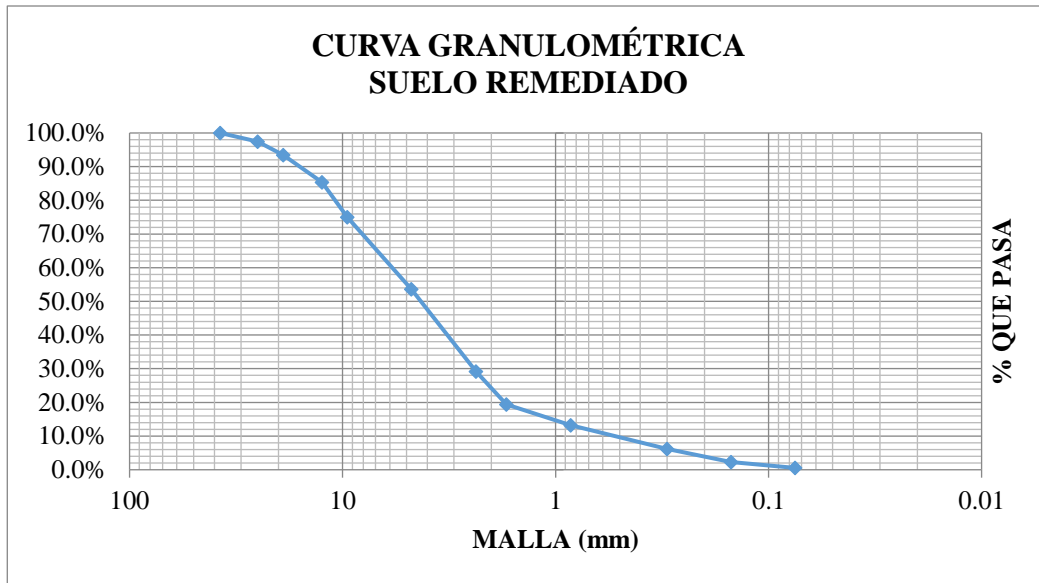


Figura 42: Curva granulométrica de la muestra N° 3.

Estimación del D_{10} , D_{30} y D_{60} :

Se realizó por medio de una interpolación.

D_{10} [mm] = 0.528; D_{30} [mm] = 2.413; D_{60} [mm] = 5.833

Coefficiente de uniformidad y Coeficiente de curvatura:

$C_u = 11.05$

$C_v = 1.89$

Luego de esto procedemos con los 5 pasos antes mencionado.

1. Porcentaje de limos y arenas muy finas, diámetro de 0.002mm-0.10mm.

Empecemos analizando la **Vía de Acceso 1**.

El porcentaje de limos y arenas muy finas está comprendido entre los diámetros 0.002 – 0.1 mm. Lo que viene a ser el porcentaje de suelo que hay entre esto dos diámetros. Pero como no se tuvo ningún tamiz que se ajustara exactamente a estos diámetros se hizo una interpolación.

Tamiz	diámetro	Porcentaje Retenido
N° 100	0.15	8.6%
N° X	0.1	X%

N° 200	0.075	7.9%
N° Y	0.002	Y%

$$\frac{0.15 - 0.1}{0.15 - 0.075} = \frac{8.6 - X}{8.6 - 7.9}$$

$$X = 8.13\%$$

$$\frac{0.15 - 0.075}{0.15 - 0.02} = \frac{8.6 - 7.9}{8.6 - Y}$$

$$Y = 7.38\%$$

Por lo tanto, el contenido limos y arenas muy finas serian la suma de X y Y, esto es igual a **15.52%**.

Nota: se está asumiendo que el contenido de arcilla está incluido en este paso.

Ahora para la **Vía de Acceso 2**

Tamiz	diámetro	Porcentaje Retenido
N° 100	0.15	5%
N° X	0.1	X%
N° 200	0.075	4.4%
N° Y	0.002	Y%

$$\frac{0.15 - 0.1}{0.15 - 0.075} = \frac{5 - X}{5 - 4.4}$$

$$X = 4.6\%$$

$$\frac{0.15 - 0.075}{0.15 - 0.02} = \frac{5 - 4.4}{5 - Y}$$

$$Y = 3.96\%$$

El contenido limos y arenas muy finas serian de **8.56%**

Ahora para el **Área Remediada**

Tamiz	diámetro	Porcentaje Retenido
N° 100	0.15	3.9%
N° X	0.1	X%
N° 200	0.075	1.8%
N° Y	0.002	Y%

$$\frac{0.15 - 0.1}{0.15 - 0.075} = \frac{3.9 - X}{3.9 - 1.8}$$

$$X = 2.5\%$$

$$\frac{0.15 - 0.075}{0.15 - 0.02} = \frac{3.9 - 1.8}{3.9 - Y}$$

$$Y = 0.26\%$$

El contenido limos y arenas muy finas serian de **2.76%**

2. Porcentaje de arena, partículas de diámetro 0.10-2.0mm.

El porcentaje de arena se determinará siguiendo la misma metodología antes mencionada.

Empecemos analizando la **Vía de Acceso 1.**

Tamiz	diámetro	Porcentaje Retenido
N° 8	2.36	12.6%
N° x	2.0	x%
N° 12	1.7	10.3%
N° 20	0.85	25.1%
N° 50	0.3	20.7%
N° 100	0.15	8.6%
N° X	0.1	8.13 %

$$\frac{2.36 - 2.0}{2.36 - 1.7} = \frac{12.6 - x}{12.6 - 10.3}$$

$$x = 11.51\%$$

Por lo tanto, el contenido de arena es de

$$8.13\% + 8.6\% + 20.7\% + 25.1\% + 10.35\% + 11.51 = 84.39 \%$$

La Vía de Acceso 2.

Tamiz	diámetro	Porcentaje Retenido
N° 8	2.36	25.4%
N° x	2.0	x%
N° 12	1.7	13.4%
N° 20	0.85	12.6%
N° 50	0.3	10.3%
N° 100	0.15	5.0%
N° X	0.1	4.6%

$$\frac{2.36 - 2.0}{2.36 - 1.7} = \frac{25.4 - x}{25.4 - 13.4}$$

$$x = 18.85\%$$

Por lo tanto, el contenido de arena es de **4.6% + 5% + 10.3% + 12.6% + 13.4% + 18.85% = 64.75%**

Empecemos analizando la **Área Remediada**.

Tamiz	diámetro	Porcentaje Retenido
N° 8	2.36	24.4%
N° x	2.0	x%
N° 12	1.7	9.9%
N° 20	0.85	6.1%
N° 50	0.3	7.0%
N° 100	0.15	3.9%
N° X	0.1	2.5%

$$\frac{2.36 - 2.0}{2.36 - 1.7} = \frac{24.4 - x}{24.4 - 9.9}$$

$$x = 16.49\%$$




Por lo tanto, el contenido de arena es de **2.5% + 3.9% + 7% + 6.1% + 9.9% + 16.49% = 45.89%**

3. Porcentaje de materia orgánica.

El contenido de materia orgánica en las muestras de suelo natural y suelo remediado se asumió un valor mayor al 4 % y para las muestras de la vía de acceso 1 y 2 un valor menor al 1 %.

4. Estructura del suelo.

Tabla 31: codificación según el tipo de estructura del suelo.

lugar/Tipo de estructura	Código USLE
<p data-bbox="550 405 724 439">Suelo natural</p>  <p data-bbox="550 779 724 813">Granular fina</p>	<p data-bbox="1110 595 1129 629">2</p>
<p data-bbox="536 860 738 893">Vía de acceso 1</p>  <p data-bbox="517 1263 758 1296">Granular muy fina</p>	<p data-bbox="1110 1200 1129 1234">1</p>
<p data-bbox="528 1346 746 1379">Suelo remediado</p>  <p data-bbox="480 1749 794 1783">Granular media a gruesa</p>	<p data-bbox="1110 1547 1129 1581">3</p>



Para la determinación de las texturas de los diferentes tipos de suelos se realizó mediante el método visual propuesto por la FAO y a través de la tabla (31).

Según lo citado en la tabla anterior y los porcentajes que se obtuvieron, se dedujo que la muestra de la *vía de acceso 1* es un suelo franco arenoso mientras que la *vía de acceso 2 es arenoso franco* y el *suelo natural* con el *suelo remediado* son franco arcillo arenosos.

Luego se procedió a comparar cada tipo de suelo según su textura con la tasa de infiltración, como se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 32: Tasa de infiltración según textura de suelo.

Textura	Tasas de infiltración (cm/h)
Arcilloso	< 0.5
Franco arcilloso	0.5 - 1
Franco	1 - 2
Franco arenoso	2 - 3
Arenoso	> 3

Fuente: Cabrejos Valdivia, MN. 2016

Tabla 33: Codificación USLE según clase textural.

Suelo	Clase de textura	Código USLE de permeabilidad
Suelo Natural	Franco arcilloso	4
Vía de Acceso 1	Areno francoso	2
Vía de Acceso 2	Franco arcillo arenosos	3
Suelo Remediado	Arcilla arenosa	4

Tabla 34: clase textural y su valor de erodabilidad.

Suelo	Clase de textura	FACTOR K
Suelo Natural	Franco arcilloso	K =0.160
Vía de Acceso 1	Areno francoso	K =0.080
Vía de Acceso 2	Franco arcillo arenosos	K =0.070
Suelo Remediado	Arcilla arenosa	K =0.110

Nota: para el suelo natural no se realizó el análisis granulométrico, pero si se realizó el análisis visual para determinar su textura, y a partir del triángulo de texturas se obtuvieron los siguientes valores 25% de arenas muy fina y limo, 37% de arenas y 38% de arcilla para determinar su factor K.

Vía de acceso 1: 15.5% de arena fina y limo (sedimentos), 84.39% de arena y 0.11 % de arcilla.

Vía de acceso 2: 8.56% de arena fina y limo (sedimentos), 64.75% de arena y 26.69% de arcilla.

Suelo remediado: 2.76% de arena fina y limo (sedimentos), 45.89% de arena y 51.35% de arcilla.

El factor K también se determinó a través de la ecuación propuesta por Wischmeier, (1974).

$$K = \frac{(1.313)(10^{-4})(2.1)(M^{1.14})(12 - a) + (3.25)(b - 2) + (2.5)(c - 3)}{100}$$

Tabla 35: cálculo del factor K a través de la ecuación anterior

Suelo	a (%)	b	c	Limo + arena muy fina (%)	Arena (%)	Arcilla (%)	M	K
Suelo Natural	4	2	4	25	37	38	1550	0.128
Vía de Acceso 1	1	1	2	15.5	84.39	0.11	1548.29	0.056
Vía de Acceso 2	1	2	3	8.56	64.75	26.69	627.53	0.047
Suelo Remediado	4	3	4	2.76	45.89	51.35	134.27	0.081

Dónde: a, b y c son el contenido de materia orgánica, la estructura del suelo y la permeabilidad.

De acá podemos decir que hay una diferencia entre el valor hallado mediante el nomograma y el calcula mediante la ecuación, esto es así porque hay un grado de error al introducir los decimales en el nomograma, por lo que se trabajara con el calculado.

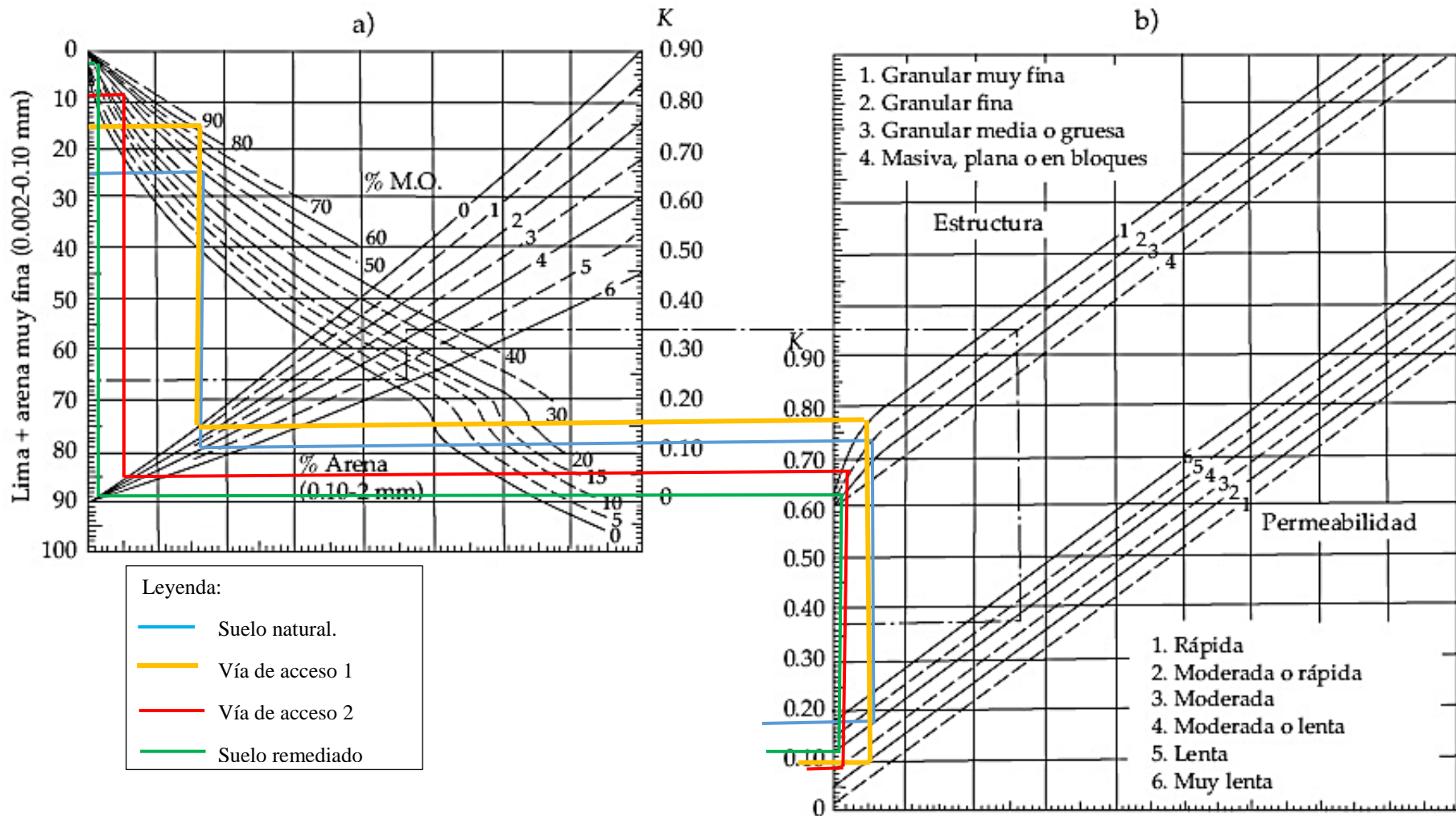


Tabla 36: obtención del factor K de cada tipo de suelo.

Determinación del Factor LS (Factor topográfico)

A continuación, se presenta la secuencia de pasos para determinar este factor.

1. Primero se determinó el mapa de pendientes del área a estudiar.

Para lo cual se partió del DEM (mapa de elevación digital) inicial luego se procedió a recortar el raster de la forma de la cuenca, para lo cual se hace uso de la herramienta *clip* la cual está dentro de las herramientas *Geoprocessing*.

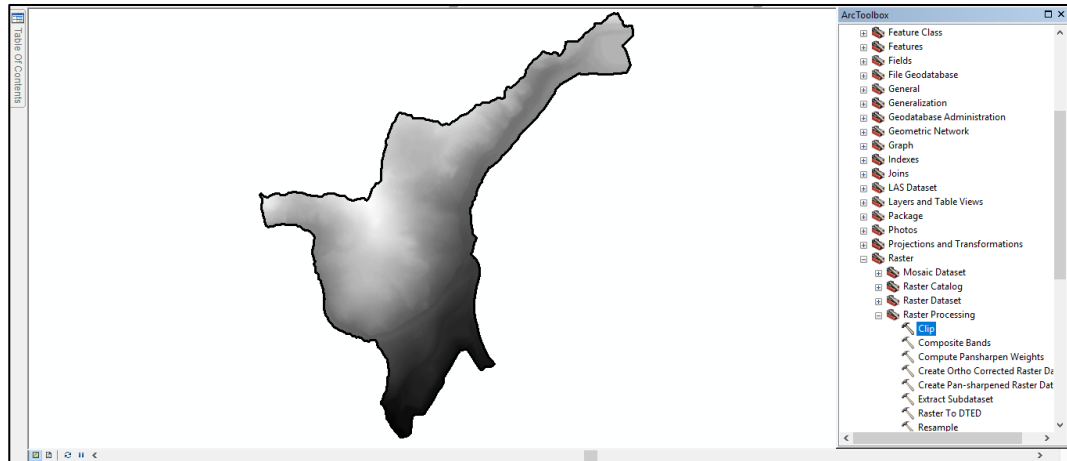


Figura 43: Generación del DEM, *Data Management Tools/Raster/Clip*

A partir del DEM generamos el mapa de pendientes y en unidades elegimos grados o *DEEGRES*.

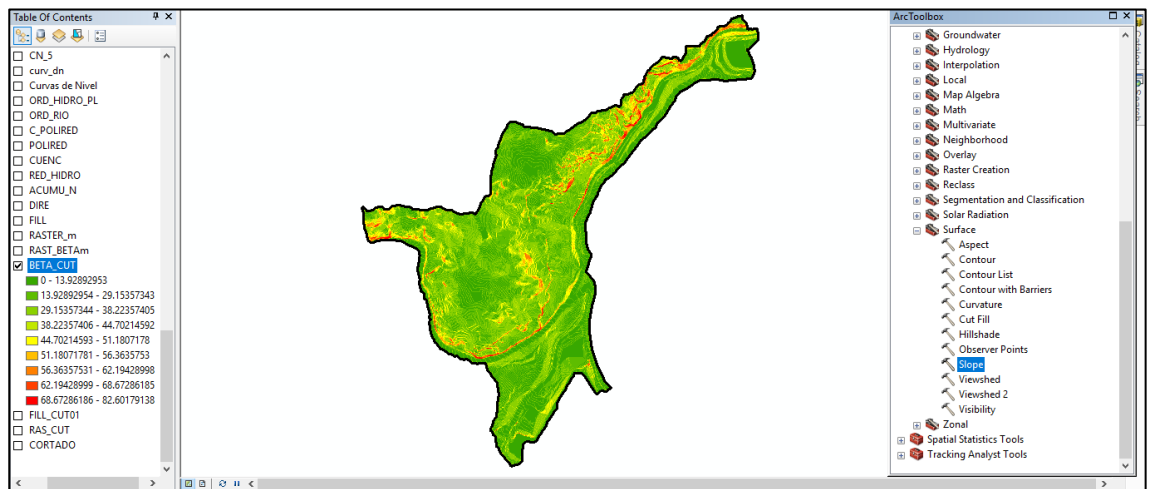


Figura 44: Generación del mapa de pendientes, *Spatial Analyst Tools/Surface/Slope*.

2. Convertimos los grados sexagesimales a radianes.

Se realiza la conversión porque ARCGIS no interpreta grados sexagesimales, para convertir los grados sexagesimales a radianes solo basta con multiplicar a estos por 0.01745 y haciendo uso de la ecuación (44). se obtuvo el valor de (β), en forma de raster.

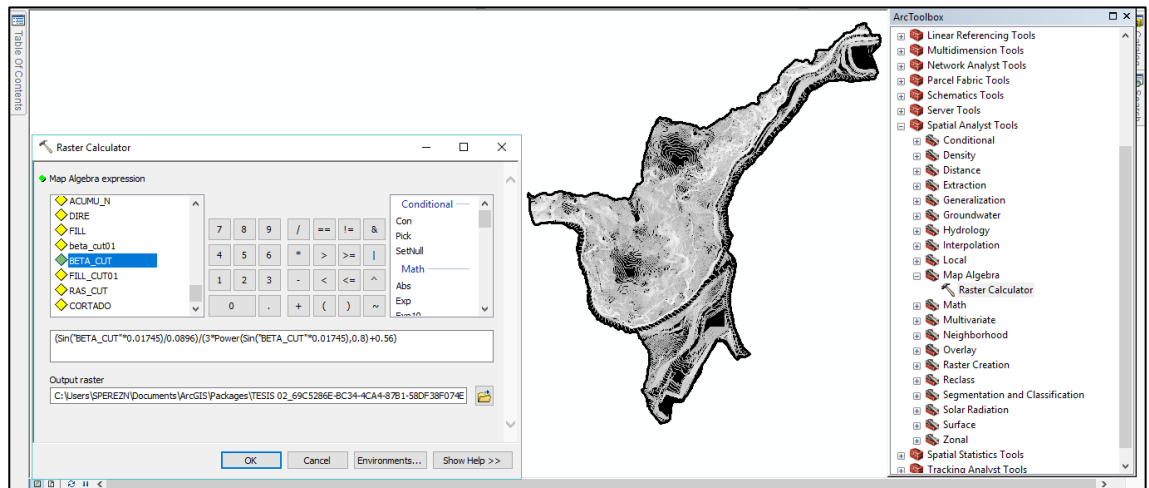


Figura 45: Generación del raster con el valor de θ en radianes, *Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator*.

Luego se ingresó el siguiente comando:

$$(\text{Sin}("BETA_CUT"*0.01745)/0.0896)/(3*\text{Power}(\text{Sin}("BETA_CUT"*0.01745),0.8)+0.56)$$

3. Obtención del “m”

Para la obtención de este valor se hizo a través de la herramienta *Raster Calculator* y haciendo uso de la ecuación (40) se ingresó el siguiente comando: *"RAST_BETA"/("RAST_BETA"+1)*, y esto genera otro raster llamado *"RASTER_m"*

4. Obtención del factor “L”

Para la obtención de este valor se hizo uso de la ecuación (39), (40), (41) y (42). Se procedió primero a determinar el valor de “D” el cual viene a ser la resolución del pixel (1x1 metros); para esto primero se determinó la dirección del flujo y luego el flujo acumulado.

Con todos estos requisitos e ingresando la siguiente operación en el *Raster Calculator*.

$$(\text{Power}("FLOW_ACUMU" + 1, "RASTER_m" + 1) - \text{Power}("FLOW_ACUMU", "RASTER_m" + 1)) / (1*1*\text{Power}(22.13, "RASTER_m"))$$

Se generó el raster del factor L.

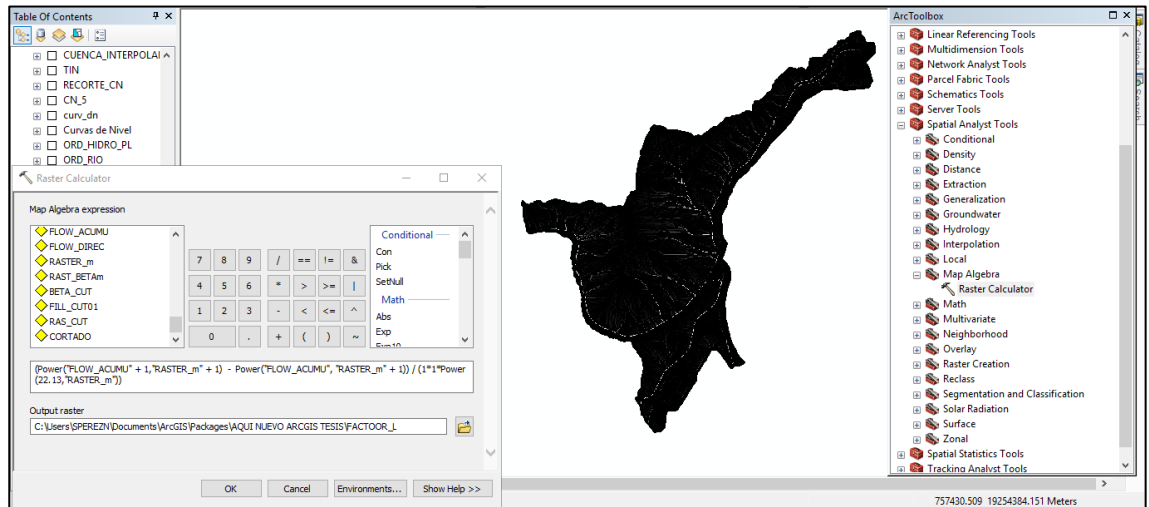


Figura 46: Generación del raster del factor L.

5. Obtención del factor “S”

Para determinar el factor S hay una condición que se tiene que cumplir.

Si $\tan\beta(i,j) < 0.09$ entonces $S(i,j) = 10.8\text{seno}(\beta(i,j)) + 0.03$; Caso contrario

SI $\tan\beta(i,j) \geq 0.09$ entonces $S(i,j) = 16.8\text{seno}(\beta(i,j)) - 0.5$

Esta condición se escribió en el *Raster Calculator*:

Con $(\text{Tan}("BETA_CUT" * 0.01745) < 0.09, 10.8 * \text{Sin}("BETA_CUT" * 0.01745) + 0.03, 16.8 * \text{Sin}("BETA_CUT" * 0.01745) - 0.5)$

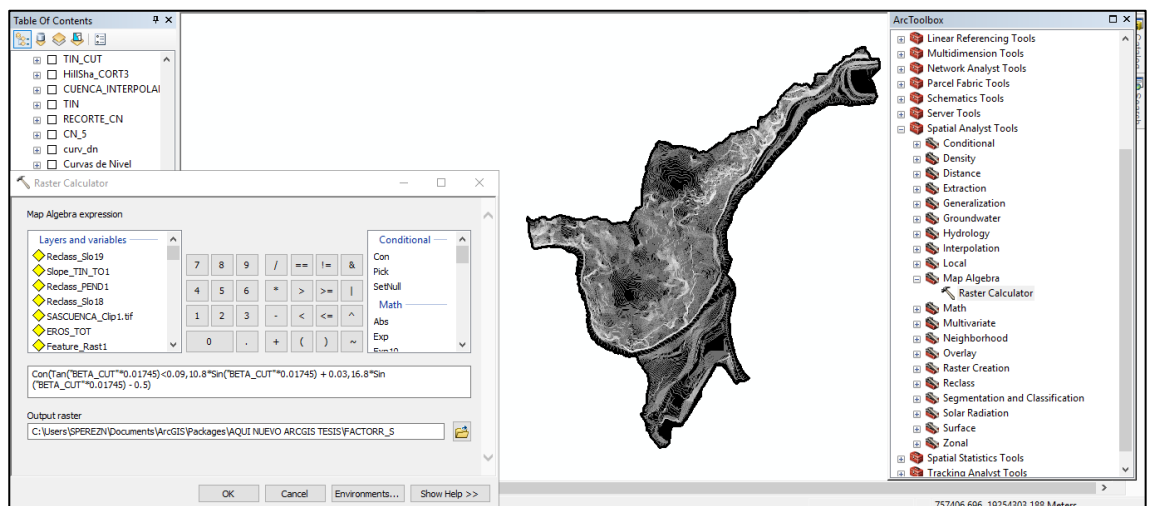


Figura 47: Generación del raster S.

6. Obtención del factor “LS”

Para la determinación de este factor solo bastó multiplicar los dos raster anteriores en *Raster Calculator*: "FACTOR_L" * "FACTOR_S"

De esta manera se obtuvo el raster LS

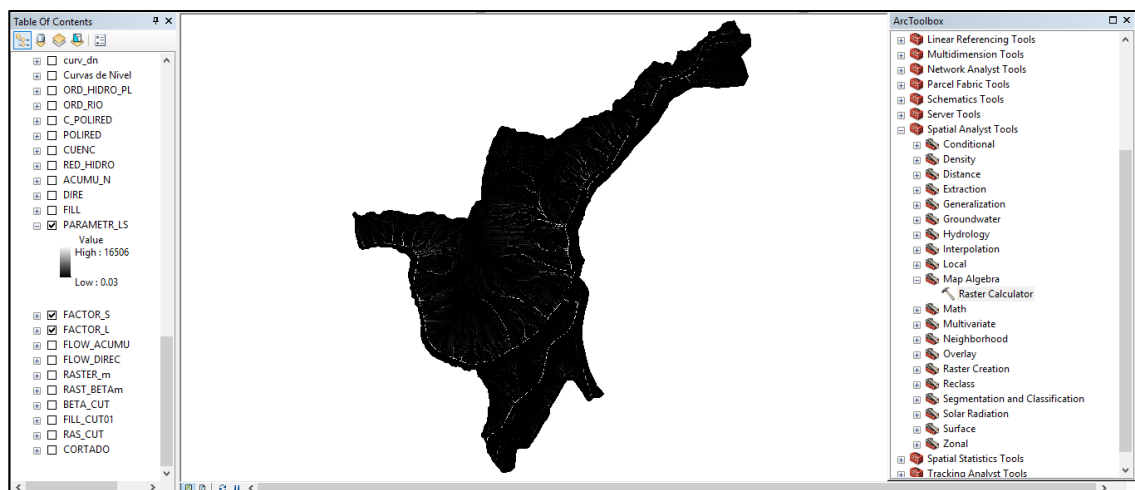


Figura 48: Generación del raster LS.

Determinación del factor “C”

La de terminación de este factor se realizó mediante la tabla 11, cabe mencionar que la vegetación típica en la zona donde se realizó la investigación, se clasificaron cuatro tipos de áreas, como son el área natural con un marcado predominio de pajonal andino o icho, el área que esta remediada presenta una cubierta vegetal variable, con predominio de ichu, ray grass y plantas pequeñas de pino. Por otro lado, tenemos la presencia de suelo disturbado el cual viene representado por las dos vías de acceso.

Para el caso de las vías de acceso, las cuales representan alrededor del 2.5 has. Es decir, un 7% del área total; se determinó un $C = 1$. Mientras que para el área natural se determinó un $C = 0.020$, ya que este valor es similar a las praderas herbácea según la tabla 11, por último, tenemos al área remediada al cual se le determinó un $C = 0.035$ en promedio.

Tabla 37: valores de C según el tipo de cobertura vegetal.

Cubierta vegetal	Área (has)	Porcentaje	Valor de C (adim.)
Área natural	24.33	75%	0.020
Área remediada	5.7	18%	0.035
Área disturbada 1	1.43	4%	1.000
Área disturbada 2	1.06	3%	1.000

Con estos valores de C se generó el raster de cobertura vegetal.

Determinación del factor “P”

El factor P o factor de prácticas de conservación de suelos está ligado a estrechamente a la pendiente. Y su valor se determinó en base a la tabla 13.

Para la generación del mapa del factor P se realizó a partir del DEM de la cuenca, luego se generó el mapa de pendientes en porcentajes, luego se hizo la reclasificación de los valores de la pendiente en función a los valores propuestos en la tabla 13, en seguida a este raster creado se lo convierte a polígono y en este se obtiene el valor de “P” multiplicando las áreas que están en el rango de pendiente.

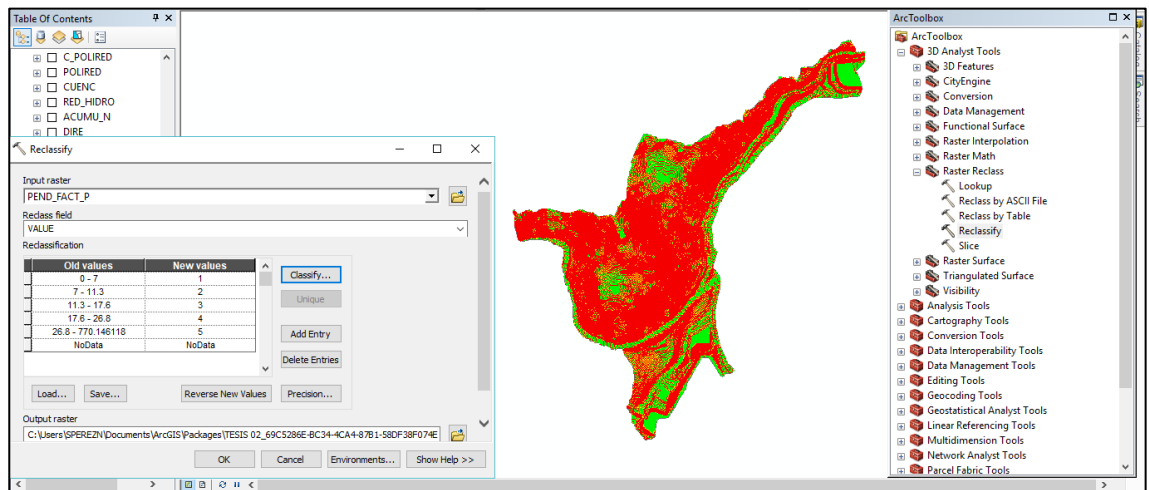


Figura 49: Reclasificando el mapa de pendientes.

e. Estimación de la producción de sedimentos a través del SDR

Para poder estimar la producción de sedimentos se evaluó mediante el coeficiente de entrega de sedimento, a través de las ecuaciones (48, 49, 50, 51 y 52) así como se muestra a continuación.

Steward et al,1975

$$SDR = -0.043 \ln(A) + 0.3342 = -0.043 \ln(0.325) + 0.3342 = 0.383$$

Williams y Berndt:

$$DR = 0.627 (SLP)^{0.403} = (0.627)(11.625\%^{0.406}) = 0.263$$

Vanoni, 1975.

$$DR = 0.47(A)^{-0.125} = (0.47)(0.325)^{-0.125} = 0.541$$

USDA SCS, 1979:

$$DR = 0.566(A)^{-0.11} = (0.566)(0.325)^{-0.11} = 0.640$$

Roehl, 1962:

$$DR = 0.36(A)^{-0.2} = (0.36)(0.325)^{-0.2} = 0.451$$

f. Estimación del transporte de sedimentos (GS)

Se estimó el transporte de sedimento en suspensión por medio de la ecuación (57), (58) y (59). Para ello se necesitaron datos físicos del material sedimentado y datos hidráulicos del canal.

Antes de dar a conocer el caudal en suspensión veamos el análisis granulométrico de las muestras que se sacaron del material sedimentado, el mapa de ubicación de las muestras se encuentra en el anexo 3.

Ubicación de la 4° muestra:

Canal perimetral antes de ingresar al desarenador

Este: 756823.39 m; Norte: 9254031.32 m; Altitud: 3833 m.s.n.m.

Parámetros de mecánica de suelos

Peso Húmedo (g.) = 725.4; Peso Seco (g.)=530.7; Humedad (%) =36.69

Peso Específico seco (P_e (g./cm³) = 1.8833

Tabla 38: Análisis granulométrico de la muestra N° 4

Tamiz	Abertura (mm)	Peso parcial retenido (g.)	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que pasa
1 1/2"	37.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
1"	25	0	0.0%	0.0%	100.0%
3/4"	19	0	0.0%	0.0%	100.0%
1/2"	12.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
3/8"	9.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
N° 4	4.75	6.7	1.3%	1.3%	98.7%
N° 8	2.36	26.5	5.0%	6.3%	93.7%
N° 12	1.7	39.2	7.4%	13.6%	86.4%
N° 20	0.85	66.3	12.5%	26.1%	73.9%
N° 50	0.3	142.2	26.8%	52.9%	47.1%
N° 100	0.15	164.4	31.0%	83.9%	16.1%
N° 200	0.075	62.3	11.7%	95.6%	4.4%
Platillo		23.1	4.4%	100.0%	0.0%
Total		530.7	100%		

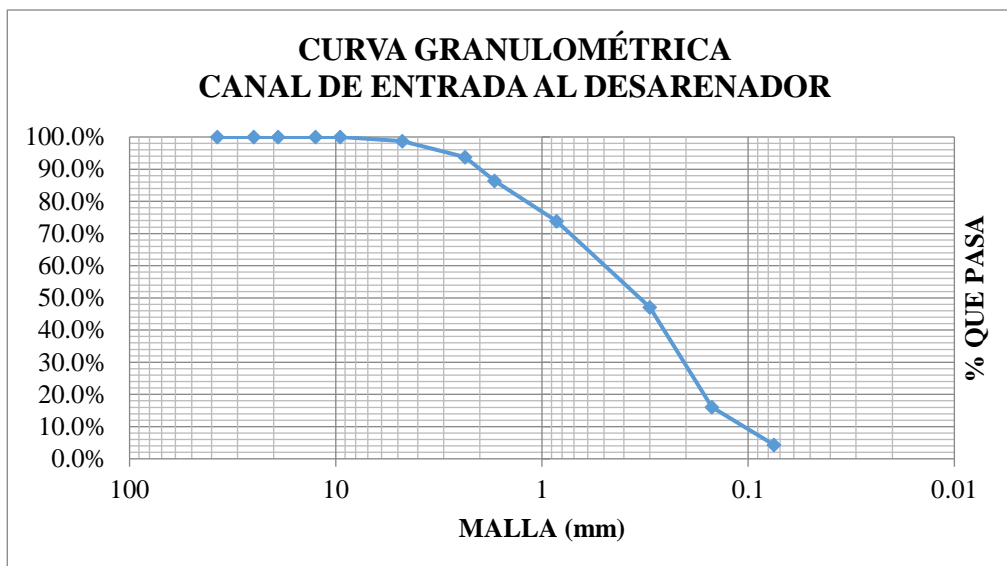


Figura 50: Curva granulométrica de la muestra N° 4.

Ubicación de la 5° muestra:

Desarenador

Este: 756840.41 m; Norte: 9253988.13 m.; Altitud: 3826.5 m.s.n.m.

Parámetros de mecánica de suelos

Peso Húmedo (g.) = 614.5; Peso Seco (g.) = 486.4; Humedad (%) = 26.34

Peso Específico seco (P_e (g./cm³) = 1.8925

Tabla 39: Análisis granulométrico de la muestra N° 5.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso parcial retenido (g.)	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que pasa
1 1/2"	37.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
1"	25	0	0.0%	0.0%	100.0%
3/4"	19	0	0.0%	0.0%	100.0%
1/2"	12.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
3/8"	9.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
N° 4	4.75	1.3	0.3%	0.3%	99.7%
N° 8	2.36	3.7	0.8%	1.0%	99.0%
N° 12	1.7	11.3	2.3%	3.4%	96.6%
N° 20	0.85	28.4	5.8%	9.2%	90.8%
N° 50	0.3	100.1	20.6%	29.8%	70.2%
N° 100	0.15	184.3	37.9%	67.7%	32.3%
N° 200	0.075	114.4	23.5%	91.2%	8.8%
Platillo		42.9	8.8%	100.0%	0.0%
total		486.4	100%		

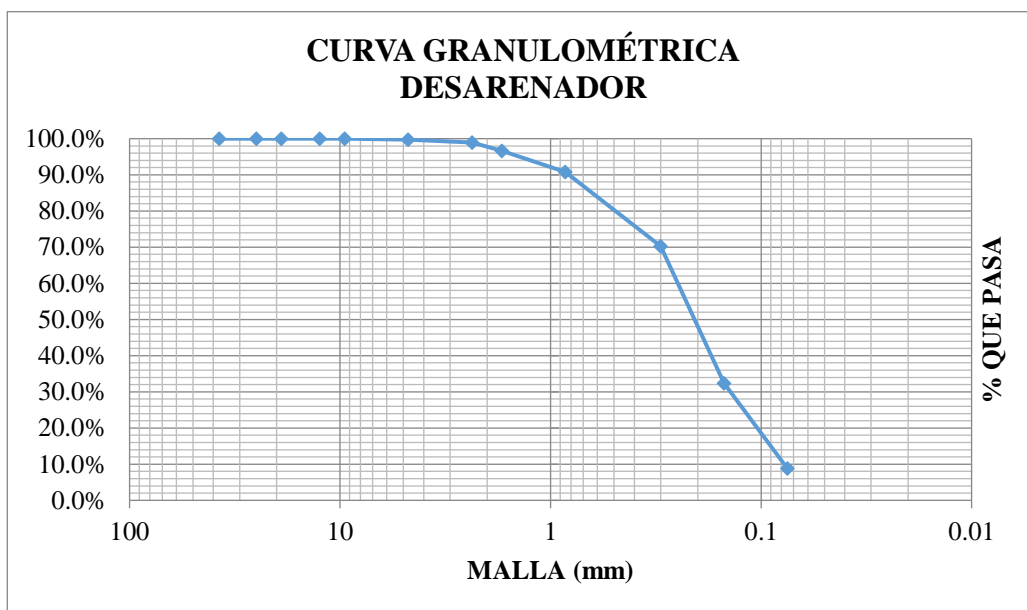


Figura 51: Curva granulométrica de la muestra N° 5.

Ubicación de la 6° muestra:

Canal de limpia

Este: 756843.84 m.; Norte : 9253971.69 m.; Altitud: 3826.0 m.s.n.m.

Parámetros de mecánica de suelos

Peso Húmedo (g.) = 830.5; Peso Seco (g.) = 607.2; Humedad (%) = 36.78

Peso Específico seco (Pe (g./cm³) = 1.8845

Tabla 40: Análisis granulométrico de la muestra N° 6

Tamiz	Abertura (mm)	Peso parcial retenido (g.)	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que pasa
1 1/2"	37.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
1"	25	0	0.0%	0.0%	100.0%
3/4"	19	0	0.0%	0.0%	100.0%
1/2"	12.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
3/8"	9.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
N° 4	4.75	0	0.0%	0.0%	100.0%
N° 8	2.36	15.8	2.6%	2.6%	97.4%
N° 12	1.7	31.8	5.2%	7.8%	92.2%
N° 20	0.85	79.0	13.0%	20.8%	79.2%
N° 50	0.3	151.0	24.9%	45.7%	54.3%
N° 100	0.15	170.0	28.0%	73.7%	26.3%
N° 200	0.075	110.2	18.1%	91.9%	8.1%
Platillo		49.4	8.1%	100.0%	0.0%
total		607.2	100%		

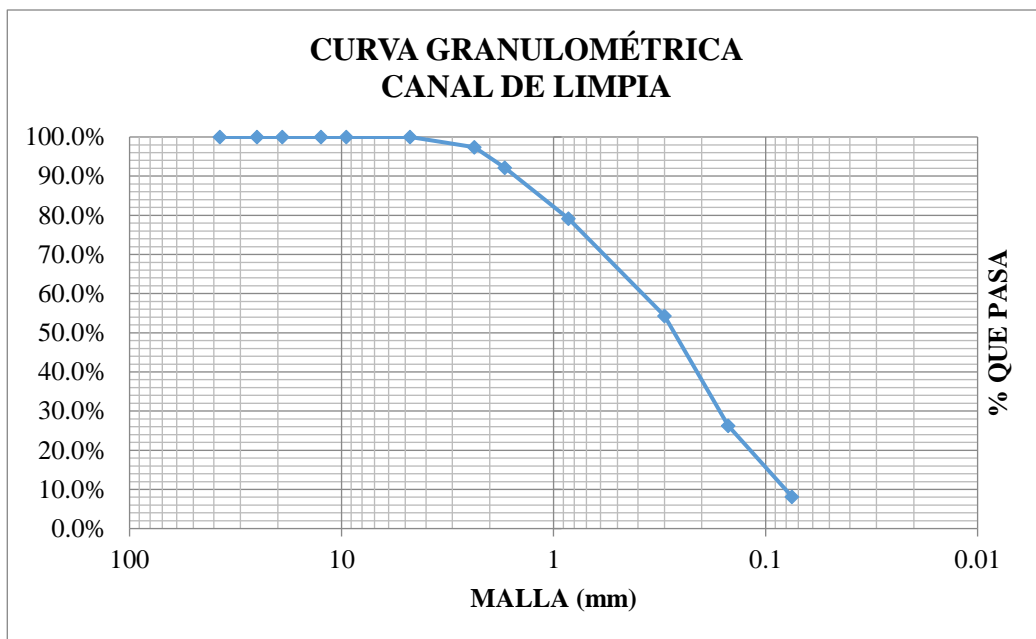


Figura 52: Curva granulométrica de la muestra N° 6.

Ubicación de la 7° muestra:

Poza de sedimentación

Este: 756857.47 m.; Norte : 9253949.06 m.; Altitud: 3824.0 m.s.n.m.

Parámetros de mecánica de suelos

Peso Húmedo (g.) = 1443.2; Peso Seco (g.)= 1013.9; Humedad (%)= 42.34

Peso Específico seco (Pe (g./cm³) = 1.8963

Tabla 41: Análisis granulométrico de la muestra N° 7.

Tamiz	Abertura (mm)	Peso parcial retenido (g.)	% Parcial Retenido	% Acumulado Retenido	% Acumulado que pasa
1 1/2"	37.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
1"	25	0	0.0%	0.0%	100.0%
3/4"	19	0	0.0%	0.0%	100.0%
1/2"	12.5	0	0.0%	0.0%	100.0%
3/8"	9.5	5.3	0.5%	0.5%	99.5%
N° 4	4.75	16.4	1.6%	2.1%	97.9%
N° 8	2.36	41.5	4.1%	6.2%	93.8%
N° 12	1.7	52.6	5.2%	11.4%	88.6%
N° 20	0.85	44.6	4.4%	15.8%	84.2%
N° 50	0.3	229.2	22.6%	38.4%	61.6%
N° 100	0.15	348.9	34.4%	72.8%	27.2%
N° 200	0.075	176.6	17.4%	90.3%	9.7%
Platillo		98.8	9.7%	100.0%	0.0%
total		1013.9	100%		

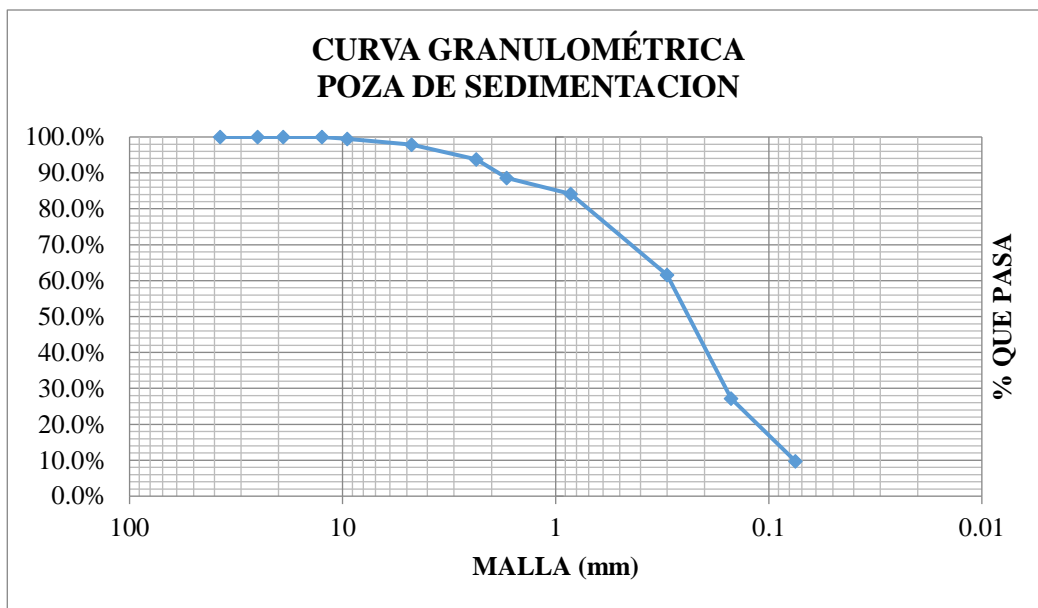


Figura 53: Curva granulométrica de la muestra N° 7.

De lo anterior se desprende ciertas características que se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 42: datos físicos del material sedimentado.

	Canal Perimetral	Desarenador	Canal De Limpia	Poza De Sedimentación	Promedio
Peso esp. Seco γ_s (kg/m ³)	1883.3	1892.5	1884.5	1896.3	1889.15
Peso esp. Agua γ (kg/m ³)	999.5	999.5	999.5	999.5	999.5
Viscosidad del agua ν (m ² /s)	1.24E-06	1.24E-06	1.24E-06	1.24E-06	1.24E-06
Aceleración de la gravedad g (m/s ²)	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Diámetro medio D_m (m.)	0.00057	0.00028	0.00043	0.00053	0.00045

El agua que circula por el canal tiene alrededor de 12°C en promedio.

Tabla 43: Resultados de los ensayos de filtración tomados durante eventos de precipitación

Fecha de registro	Lectura del tirante del canal (cm)	Caudal (m ³ /s)	Volumen de la muestra de agua (Vol(mml))	Peso de la muestra de agua (g.)	Peso del filtro (wi(g.))	Peso del filtro más la muestra (wf(g.))	Concentración (g/l)	Concentración (ppm)
01/02/2018	5.24	0.1206	100	100.3628	0.1254	0.4885	3.6310	3631
04/02/2018	5.98	0.1503	100	100.7114	0.1301	0.8412	7.1110	7111
05/02/2018	10.09	0.3594	100	101.1259	0.1219	1.2478	11.2587	11259
03/02/2018	13.17	0.5616	100	101.7367	0.1234	1.8601	17.3669	17367
18/02/2018	23.67	1.5181	100	103.2393	0.1298	3.3692	32.3935	32394

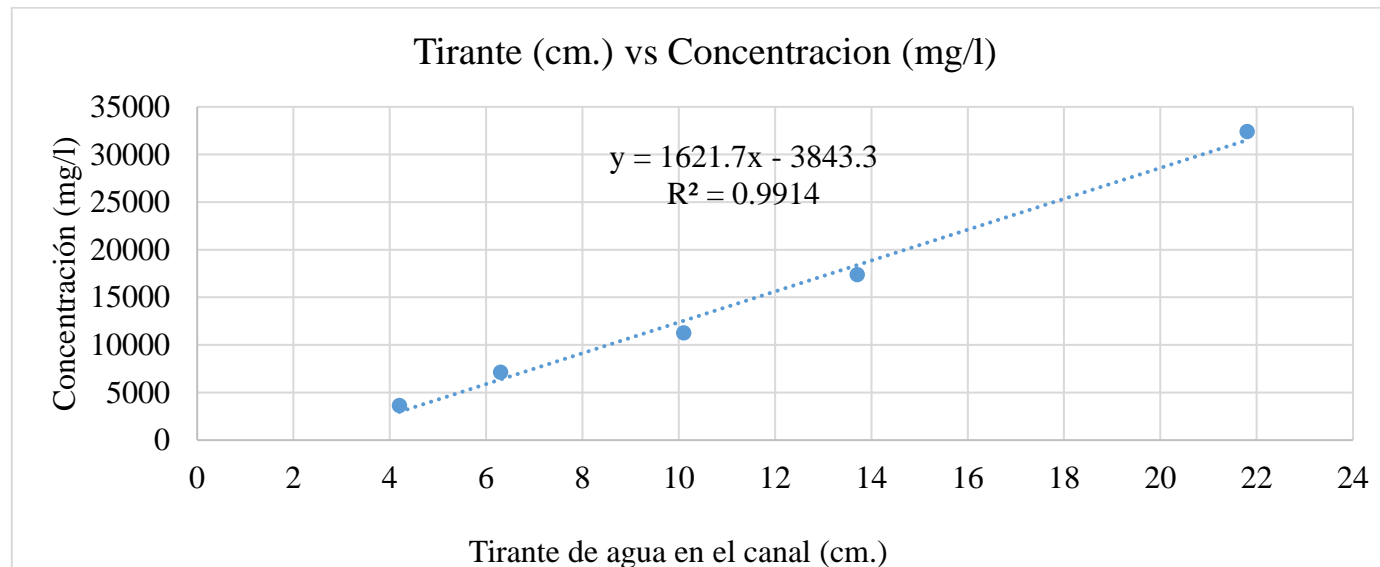


Figura 54: línea de tendencia y ecuación que representa la variación que presenta el tirante con su concentración.

Características hidráulicas del canal.

El canal principal es un canal de sección trapezoidal, así como se muestra a continuación.

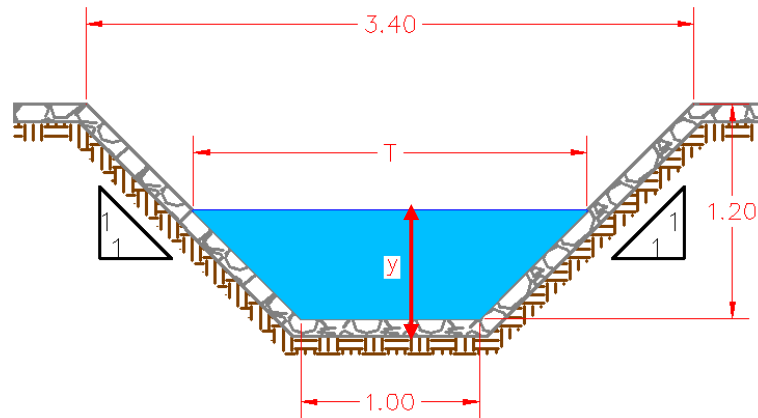


Figura 55: sección del canal principal.

Los parámetros hidráulicos del canal se determinaron con el Hcanales v3.0. se consideró un caudal máximo con un tiempo de retorno de 25 años.

La pendiente del canal es de 7.92% y la rugosidad es de 0.017 (mampostería)

Cálculo de tirante normal secciones: trapezoidal, rectangular, triangular

Lugar: **finera Coimolache - Procesos** Proyecto: **TESIS**
Tramo: **Final del canal principal** Revestimiento: **Mamposteria**

Datos:

Caudal (Q):	5.436 m ³ /s
Ancho de solera (b):	1 m
Talud (Z):	1
Rugosidad (n):	0.017
Pendiente (S):	0.0792 m/m

Resultados:

Tirante normal (y):	0.4874 m	Perímetro (p):	2.3787 m
Área hidráulica (A):	0.7250 m ²	Radio hidráulico (R):	0.3048 m
Espejo de agua (T):	1.9749 m	Velocidad (v):	7.4977 m/s
Número de Froude (F):	3.9508	Energía específica (E):	3.3526 m-Kg/Kg
Tipo de flujo:	Supercrítico		

Realiza la impresión de la pantalla 11:18 05/09/2018

Figura 56: parámetros hidráulicos para un caudal máximo de 5.436 m³/s.

Con estos datos se procedió a calcular el transporte de sedimentos en suspensión, cabe mencionar que solo se está considerando el transporte en suspensión ya que el de fondo, no se aprecia, debido a factores como: el canal es revestido, de fondo fijo e inamovible, el material transportado en su mayoría proviene de la erosión hídrica que ocurren principalmente en las áreas disturbadas como es el caso de las vías de acceso, del cual se desprenden material fino como arenas, limos y arcillas, según lo evidenciado en el análisis granulométrico del material sedimentado y además que presenta alta pendiente, es por ello que se desprecia el transporte de fondo.

A continuación, se describe los resultados del transporte haciendo uso de las fórmulas descritas en las ecuaciones (54 y 55).

Fórmula de Garde y Pande

$$\frac{GS}{q \gamma} = 0.000051 \left(\frac{V_c}{\omega} \right)^4$$

Antes de calcular la expresión anterior primero se tiene que hallar el factor “q” el cual viene a ser el caudal por unidad de ancho.

Ahora se calcula el ancho medio, el cual se obtiene a través de del grafico 55, como se muestra a continuación

$$Am = \frac{(T + b)}{2} = \frac{1.9749 + 1}{2} = 1.487 \text{ m.}$$

Donde Am es el ancho medio.

Ahora se calcula el caudal unitario para el ancho medio antes hallado.

$$q = \frac{Q}{Am} = \frac{5.436}{1.487} = 3.654 \frac{m^3}{s} \cdot m$$

El valor de $\gamma = 999.5 \text{ kg/m}^3$ viene a ser el peso específico del agua tal como se indica en la tabla 42.

Ahora se calcula la velocidad de corte.

$$V_c = \sqrt{g R s} = \sqrt{(9.81)(0.305)(0.0792)} = 0.487 \text{ m/s}$$

Finalmente, de la fórmula de Garde solo queda como incógnita “ ω ” el cual se obtiene de manera indirecta de la gráfica de Yalin de la figura 18.

Para hallar la velocidad de caída (ω) se hace uso de las ecuaciones (68), (69) y de la tabla 42.

$$\frac{(\gamma_s - \gamma) D^3 g}{\gamma v^2} = \frac{(1889.15 - 995.5) (4.5E - 04)^3 9.81}{995.5 (1.24E - 06)^2} = 521.902$$

El valor que se obtuvo se interpola en el gráfico de la figura 18 y da como resultado 50.

$$50 = \frac{\omega D}{v} = \frac{\omega(4.5E - 04)}{1.24E - 06}$$

Despejando se tiene

$$\omega = 0.137 \text{ m/s}$$

Finalmente se reemplaza todos los resultados anteriores en la fórmula de Garde y Pande.

$$GS = 0.000051 \left(\frac{V_c}{\omega} \right)^4 q \gamma = 0.000051 \left(\frac{0.496}{0.137} \right)^4 (3.654)(999.5) = 32.001 \frac{\text{kg}}{\text{s}} m$$

$$GS = (32.001)(1.487) = 47.586 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Lo anterior se calculó para el caudal máximo de 5.436 m³/s

A continuación, se muestra una tabla de resumen del transporte en suspensión para los valores que se muestran en la tabla 43.

Tabla 44: Resumen de los valores de transporte en suspensión por la fórmula de Garde y Pande

Fecha de registro	Lectura del tirante del canal (cm)	Caudal (m ³ /s)	velocidad de corte (Vc(m/s))	GS (kg/s)	GS(Tn/día)
01/02/2018	5.24	0.1206	0.1931	1.0562	91.2554
04/02/2018	5.98	0.1503	0.2052	1.3163	113.7287
05/02/2018	10.09	0.3594	0.2591	3.1476	271.9501
03/02/2018	13.17	0.5616	0.2905	4.9184	424.9504
18/02/2018	23.67	1.5181	0.3691	13.2953	1148.7130

Fórmula de Benedict y Vanuni

$$GS = 0.0027(QCs)$$

$$Q = 35.314 Q_{m^3/s}$$

De las ecuaciones anteriores se aprecia que la incógnita es la concentración del agua y para ello se realizó la filtración del agua durante eventos de precipitación.

A través de las fórmulas de Benedict y Vanuni y usando los resultados de la tabla 43, se tiene lo siguiente

$$Q = 35.314 Q_{\frac{m^3}{s}} = (35.314)(5.436) = \frac{191.967 \text{ pies}^3}{s}$$

$$GS = 0.0027(QCs)$$

A través de la ecuación de la gráfica 54 y de la figura 56 se estima la concentración para ese caudal máximo, conociendo su tirante se tiene:

$$Cs = 1621.7(48.74) - 3843.3 = 79593.165 \frac{mg}{l}$$

Por último, se tiene que el transporte en suspensión para ese caudal es de:

$$GS = 0.0027(QCs) = (0.0027)(191.967)(79593.165) = 41254.005 \frac{Tn}{día}$$

Tabla 45: Resumen de los valores de transporte en suspensión por la fórmula de Benedict y Vanuni para los datos medidos.

Q(pies ³ /s)	GS(Tn/día)	GS (kg/s)
4.26	41.76	0.483
5.31	101.90	1.179
12.69	385.83	4.466
19.83	929.93	10.763
53.61	4688.98	54.271
191.97	41254.01	477.477

transporte de sedimentos en suspensión según datos de campo y laboratorio

Para este caso basta con calcular el caudal que circula por el canal en ese momento de la medición del tirante, con su concentración hallada en el laboratorio, tal como se muestra a continuación:

Para esto hacemos uso de las concentraciones de la tabla 43.

$$GS = Q Cs$$

Tabla 46: resultados del transporte en suspensión para diferentes tirantes.

Fecha de registro	Lectura del tirante del canal (cm)	Caudal (m ³ /s)	Concentración (ppm)	Transporte en suspensión (GS (kg/s))
01/02/2018	5.24	0.1206	3631	0.438
04/02/2018	5.98	0.1503	7111	1.069
05/02/2018	10.09	0.3594	11259	4.046
03/02/2018	13.17	0.5616	17367	9.753
18/02/2018	23.67	1.5181	32394	49.177

De la tabla 46 se puede generar una ecuación que relacione el tirante con la cantidad transportada, para ello hacemos uso del Excel.

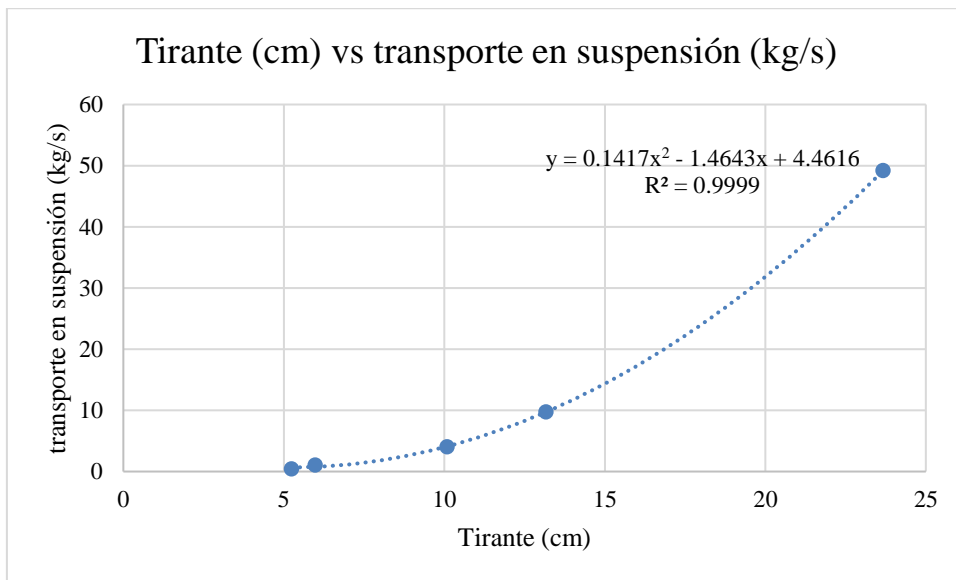


Figura 57: Grafica que relaciona al tirante y al transporte en suspensión.

Con la gráfica anterior se calcula el transporte para el caudal de diseño.

$$GS = (0.1417)(48.74^2) - (1.4643)(48.74) + 4.4616 = 269.712 \frac{kg}{s}$$

g. Control de sedimentos a través de su tratamiento

En este paso del estudio se propone una nueva dosificación para reducir el sedimento en suspensión que ingresa a través del canal, hacia la poza de sedimentación.

Antes de empezar con la metodología desarrollada presentaré la situación actual de la infraestructura con la que se cuenta y sobre la dosificación que se le está dando.

La infraestructura es un canal de mampostería de sección trapezoidal.



Figura 58: vista general de los tanques de dosificación.

Para el tratamiento de agua de escorrentía superficial el canal cuenta con 4 tanques de capacidad de 1100 litros cada uno, lo cuales están sobre la berma de dicho canal, dos de ellos están con coagulante y los otros dos con floculante dispuestos en dirección de la corriente respectivamente.

Los tanques tanto coagulante y floculante han sido preparados de la siguiente manera: Para un kilogramo de coagulante se le disuelve en 1000 litros de agua y a 1 litro de coagulante se le diluye en 1000 litros de agua.

Los 4 tanques tienen conectado una tubería de 2" de diámetro cada uno con sus respectivas válvulas para que el personal que este encargado vaya dosificando de manera manual al canal según la cantidad de agua que va ingresando.

Aquí radica el problema de la investigación, ya que muchas veces la persona que está encargada en ese lugar no sabe la cantidad ni la concentración de reactivos químicos que se debe de preparar ante un determinado nivel de agua que circula

por el canal, por experiencia propia muchas veces la cantidad de reactivo preparado que se le adicionaba al agua de escorrentía que circulaba por el canal era en exceso y en otras ocasiones era insuficiente.



Figura 59: agua de escorrentía que circula por el canal.



Figura 60: agua de escorrentía en el desarenador.

Acá se muestra cómo está el desarenador en un día típico de lluvia. Esta estructura hidráulica sirve para aumentar el tiempo de permanencia del agua cargada de sedimento, luego de su dosificación.



Figura 61: material sedimentado en el desarenador.

En esta imagen se aprecia cómo está el desarenador después de unos días de ausencia de precipitación es un flujo base.



Figura 62: vista de la colmatación de la poza de sedimentación.

Esta poza tiene una capacidad de 600 m³ (PZ-14A)

Una vez descrito la situación actual del problema de sedimentos pasaré a explicar la metodología para encontrar la dosificación óptima en el tratamiento del agua de escorrentía superficial.

El muestreo:

- Se inició tomando muestras de agua de escorrentía en un balde de 20 litros.

- Se midieron los valores iniciales correspondientes de Turbiedad (NTU), pH y Temperatura.
- Se colocó un litro de la muestra previamente agitado, en un beaker de un litro.

Preparación de reactivos para el ensayo

- Se preparó coagulante a una concentración de 1000 ppm.
- Se preparó floculante a una concentración de 1000 ppm

Prueba de jarras

A continuación, se muestra el procedimiento descrito para la prueba de jarras de manera secuencial.

- Se colocó la muestra en 04 beakers de un litro cada uno.
- Se llevó las muestras al equipo Jar - Test.
- Se agitaron las muestras a 20 RPM.
- Se cambiaron las velocidades de agitación a 200 RPM
- Inmediatamente se adicionó el coagulante en dosis variables al mismo tiempo a las cuatro muestras.
- se dejó agitando las muestras durante 2 minutos.
- se adicionó el coagulante en dosis variables al mismo tiempo a las cuatro muestras.
- se agitaron las muestras por un lapso de 15 minutos a una velocidad 20 RPM
- se observó cuidadosamente el tiempo que demora en formarse los flóculos en cada muestra y se anota las observaciones para cada muestra.
- Se apaga el equipo Jar Test.
- Se dejó reposar las muestras por el lapso de 20 a 30 minutos.
- Se tomaron muestras de agua tratada de cada beaker de la parte superior y se procedió a medir los parámetros que inicialmente se habían mediado.
- Se elaboraron curvas de dosificación de coagulante, floculante vs turbiedad.

Según el Decreto Supremo N° 004-2017-Minam, mencionan que la turbiedad para cuerpos de agua que son destinados para actividades recreacionales y de pesca (subcategoría B1 – Contacto primario), el rango máximo de turbidez será de 100 NTU.

Quedando como base lo antes mencionado se procedió a realizar el ensayo.

Los reactivos usados son:

- Policloruro de aluminio en solución acuosa (coagulante P-189).
pH = ~ 4.5, densidad 1.3 g. /cm³ a 20° C.
- Copolímero de amida acrílica y acrilato de sodio. (floculante AR-8491)
pH = 7.0 – 9.0, densidad ~0.675 g. /cm³ a 20° C.

Características de las muestras de agua.

Tabla 47: características iniciales de las muestras de agua, tomadas del canal.

Muestras	Tirante de agua (cm)	caudal (m3/s)	Turbidez inicial (NTU)	Temperatura
M3	4.2	0.121	907.2	12.5
M1	6.3	0.150	1319.6	9
M	10.1	0.359	3640.2	11
M2	13.7	0.562	6566.8	11.5
M	21.8	1.518	13766.8	12.3

De la tabla anterior cabe mencionar que las muestras que aparecen con la letra m no se consideraron la prueba de jarras.

Tabla 48: secuencia de la prueba de jarras para el primer ensayo, el cual fue para un agua con tendencia básica.

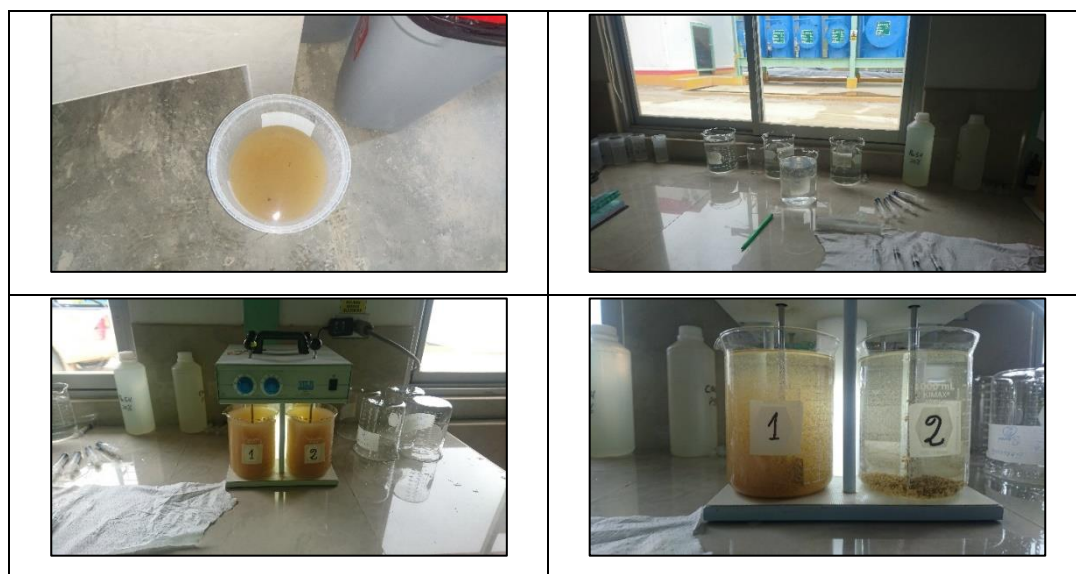
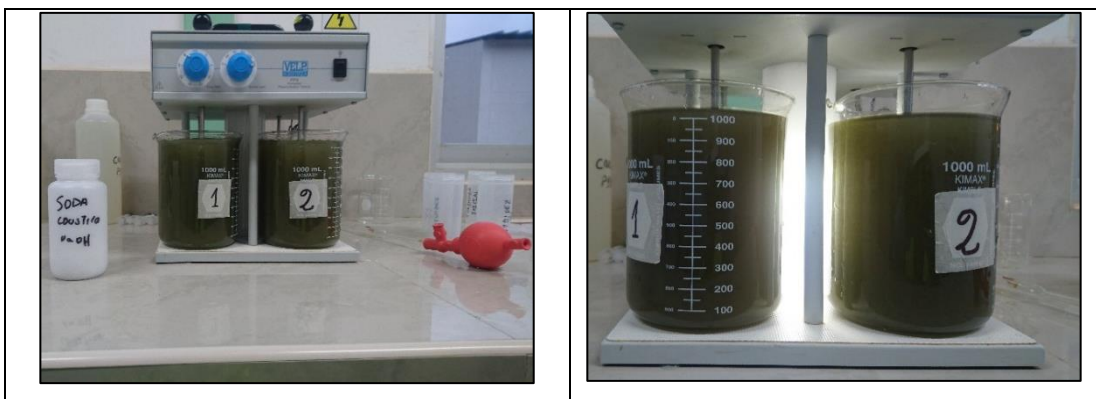
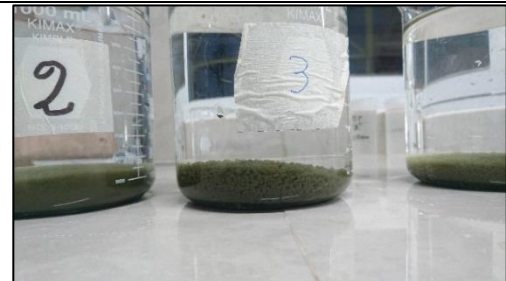
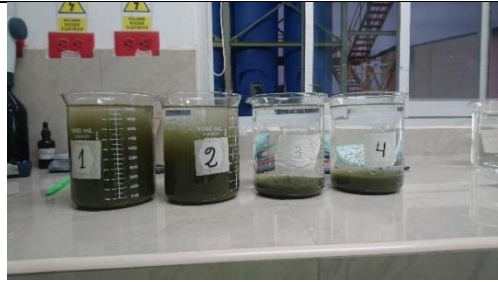
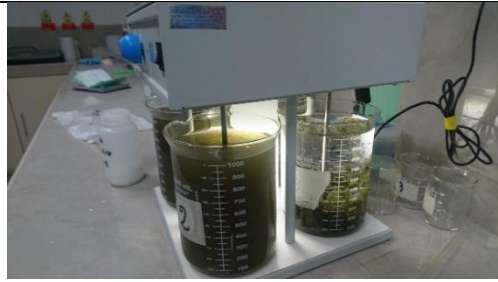




Tabla 49: prueba de jarras para el tercer ensayo, agua con tendencia acida, el color verde petróleo es porque se le agregó soda caustica para subirle el pH.





Lectura inicial del pH.

Tabla 50: turbidez final y eficiencia del uso de cada dosificación.

Muestra N°:	Jarra N°:	Dosificación (mg/l)		Turbidez Inicial (NTU)	Turbidez final (NTU)	Eficiencia (%)
		Coagulante	Floculante			
1	1	1	1	1319.6	4.98	99.62%
	2	1	2	1319.6	4.10	99.69%
	3	1	3	1319.6	2.80	99.79%
	4	1	4	1319.6	3.50	99.73%
	1	0.5	0.5	1319.6	16.10	98.78%
	2	0.5	1	1319.6	14.43	98.91%
	3	0.5	1.5	1319.6	3.47	99.74%
	4	0.5	2	1319.6	4.63	99.65%
	1	1.5	0.5	1319.6	11.30	99.14%
	2	1.5	1	1319.6	9.21	99.30%
	3	1.5	1.5	1319.6	4.75	99.64%
	4	1.5	2	1319.6	3.43	99.74%
2	1	2	1	6566.8	13.80	99.79%
	2	2	2	6566.8	12.26	99.81%
	3	2	3	6566.8	6.63	99.90%
	4	2	4	6566.8	6.58	99.90%
	1	1	1	6566.8	49.66	99.24%
	2	1	2	6566.8	30.18	99.54%
	3	1	3	6566.8	19.55	99.70%
	4	1	4	6566.8	13.07	99.80%
	1	1.5	0.5	6566.8	101.27	98.46%
	2	1.5	1	6566.8	78.84	98.80%
	3	1.5	1.5	6566.8	63.16	99.04%
	4	1.5	2	6566.8	35.89	99.45%
	1	0.5	0.5	6566.8	126.55	98.07%
	2	0.5	1	6566.8	81.41	98.76%
	3	0.5	1.5	6566.8	77.13	98.83%
	4	0.5	2	6566.8	66.77	98.98%
3	1	0.5	0.5	907.2	9.71	98.93%
	2	0.5	1	907.2	8.48	99.07%
	3	0.5	1.5	907.2	2.16	99.76%
	4	0.5	2	907.2	2.86	99.68%
	1	1	1	907.2	4.51	99.50%
	2	1	2	907.2	3.52	99.61%
	3	1	3	907.2	2.70	99.70%
	4	1	4	907.2	2.79	99.69%
	1	1.5	0.5	907.2	7.46	99.18%
	2	1.5	1	907.2	5.76	99.36%
	3	1.5	1.5	907.2	2.94	99.68%
	4	1.5	2	907.2	2.03	99.78%

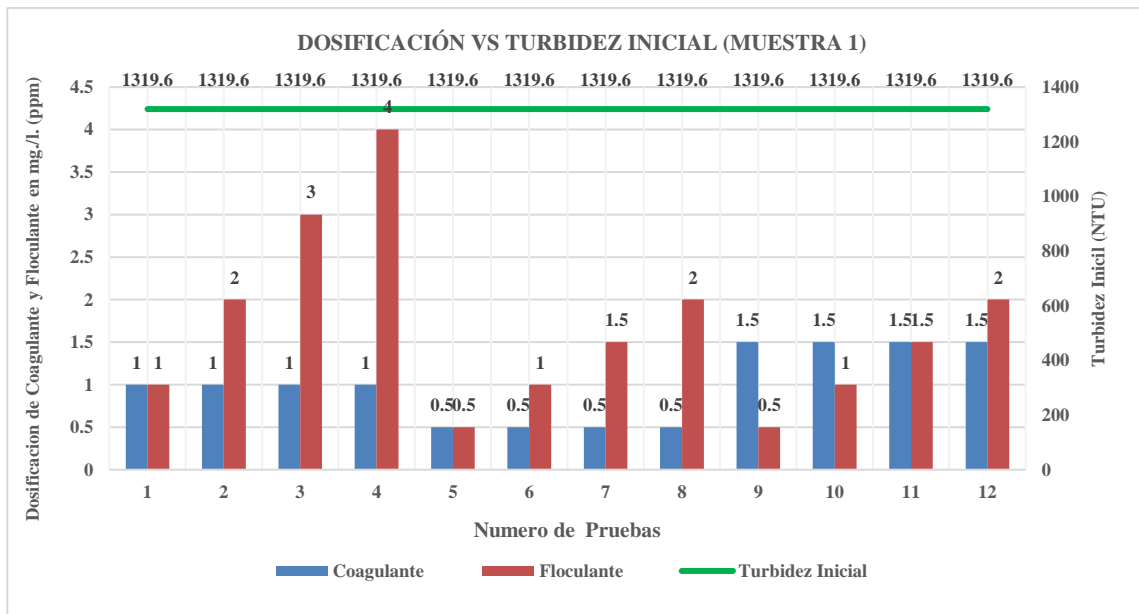


Figura 63: Relación entre la dosificación y la turbidez Inicial.

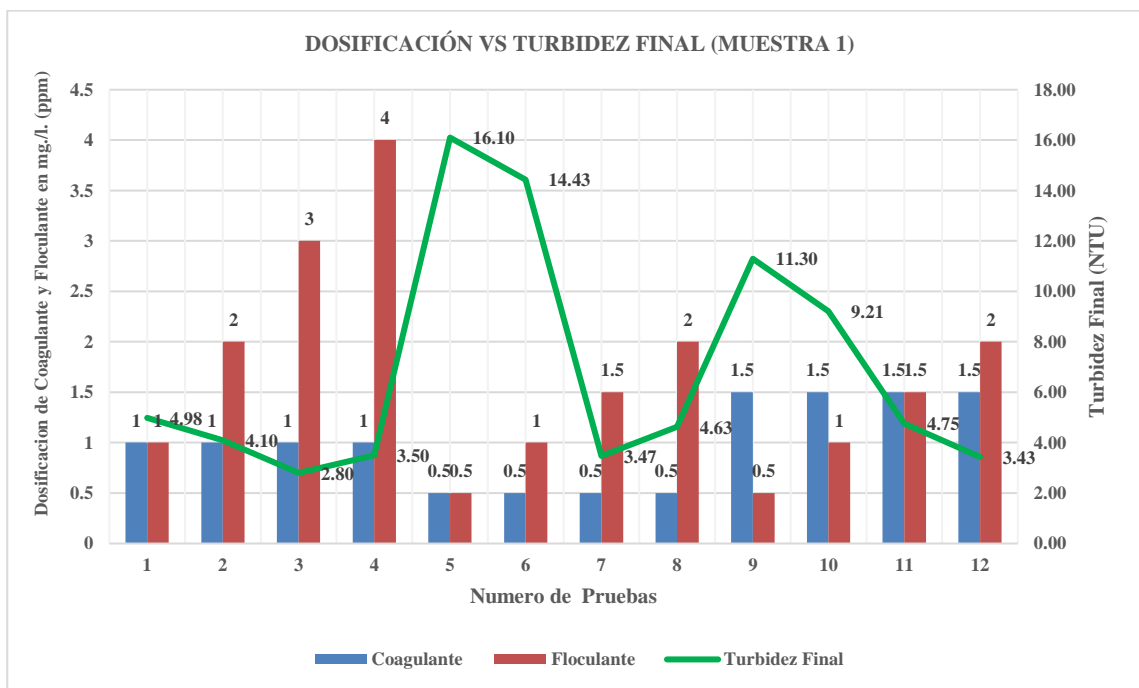


Figura 64: Relación entre la dosificación y la turbidez final.

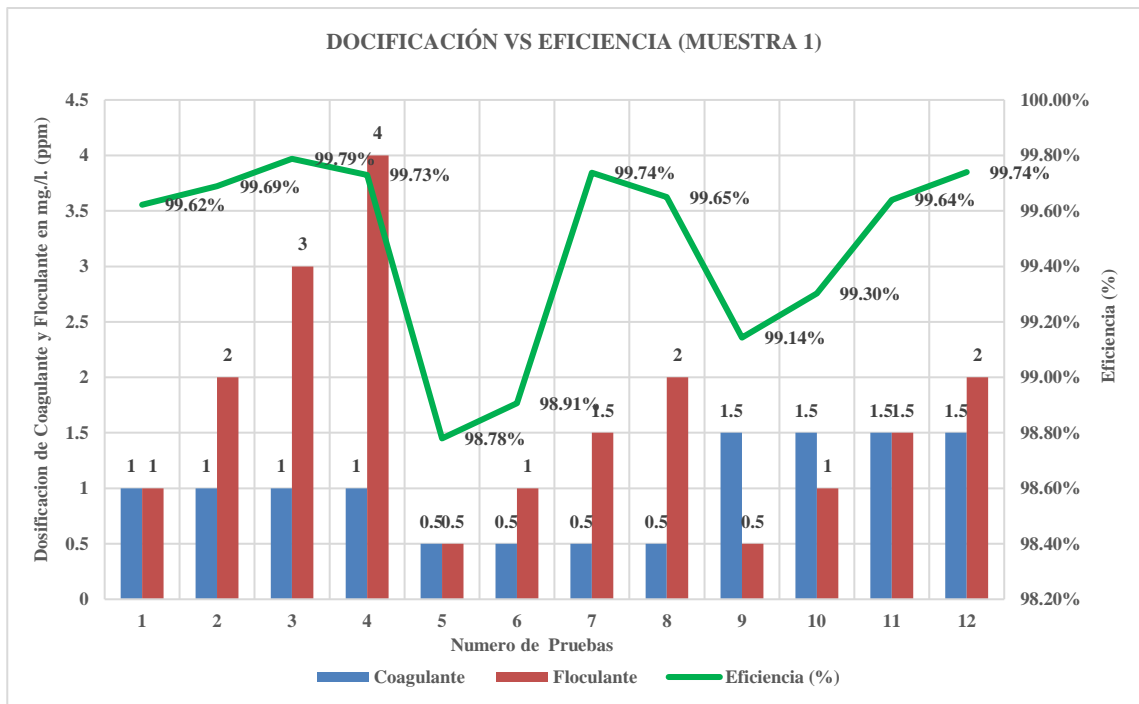


Figura 65: Relación entre la dosificación y la eficiencia.

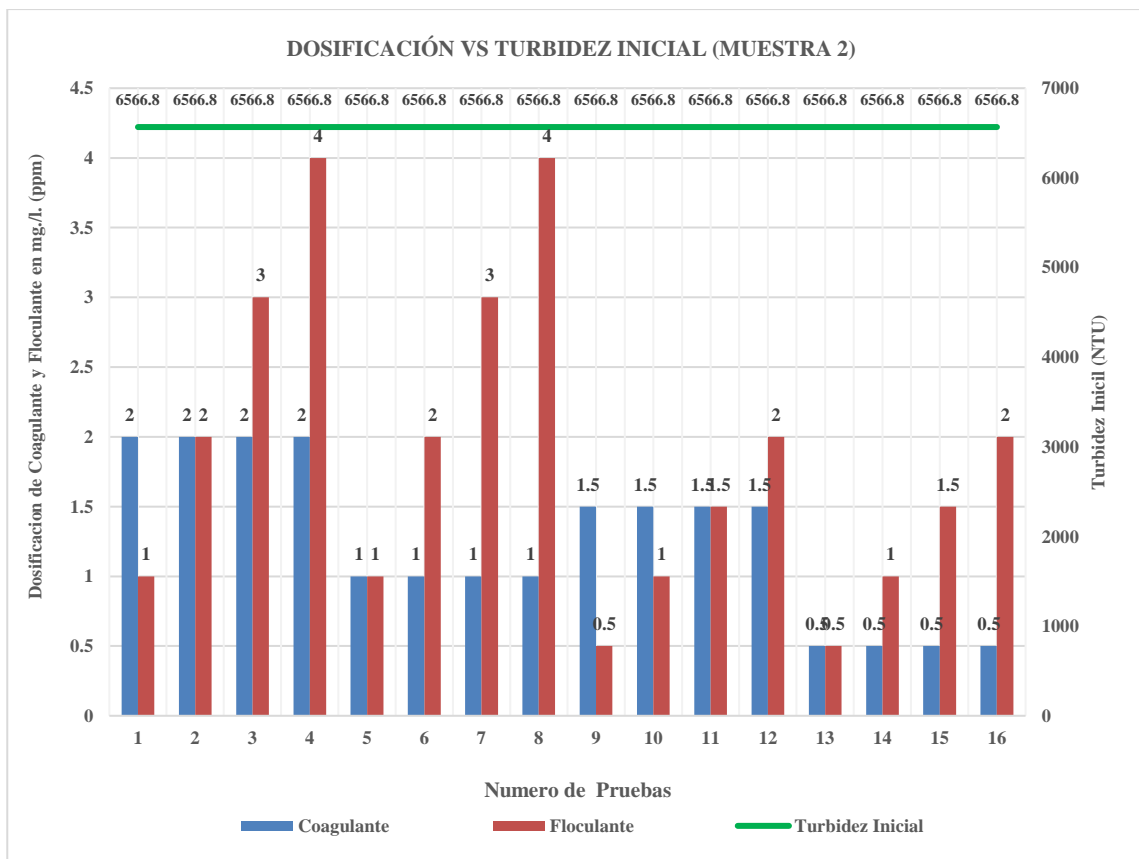


Figura 66: Relación entre la dosificación y la turbidez Inicial.

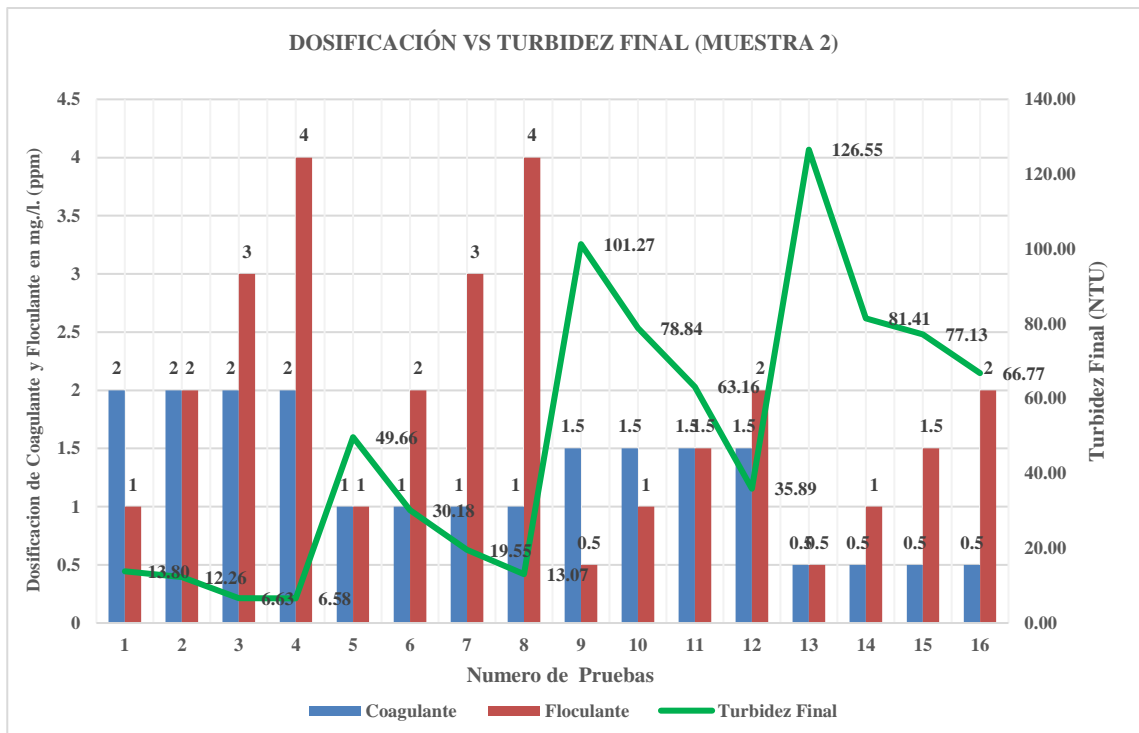


Figura 67: Relación entre la dosificación y la turbidez final.

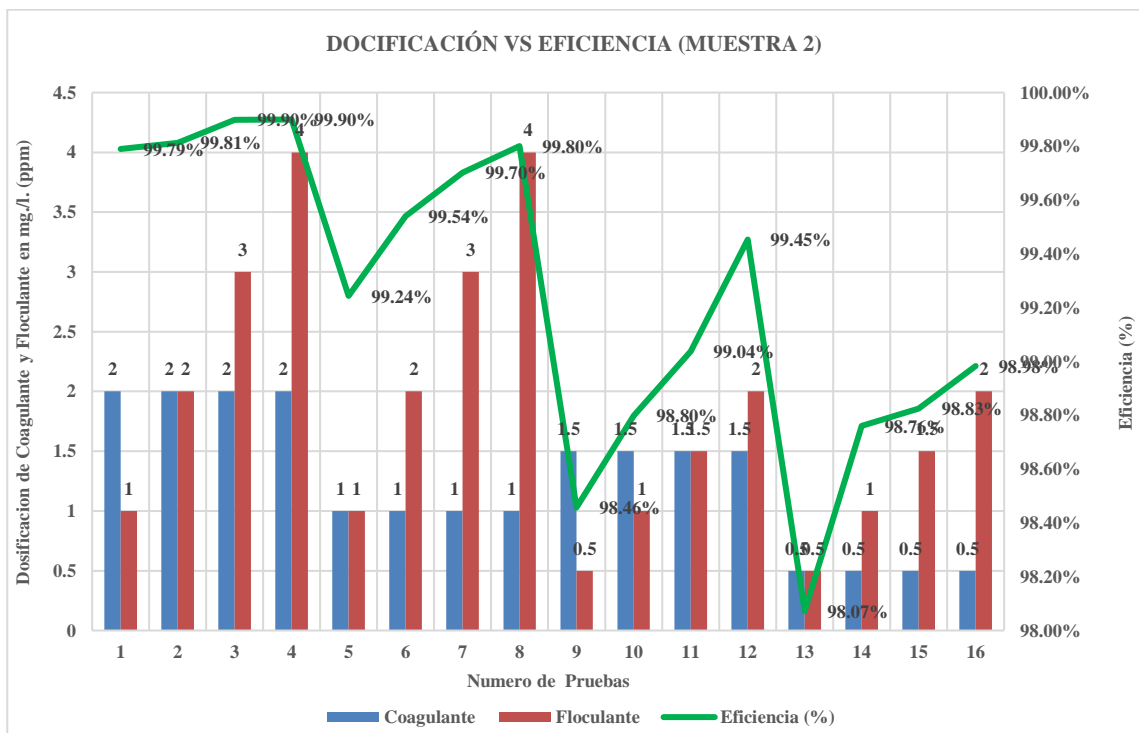


Figura 68: Relación entre la dosificación y la eficiencia.

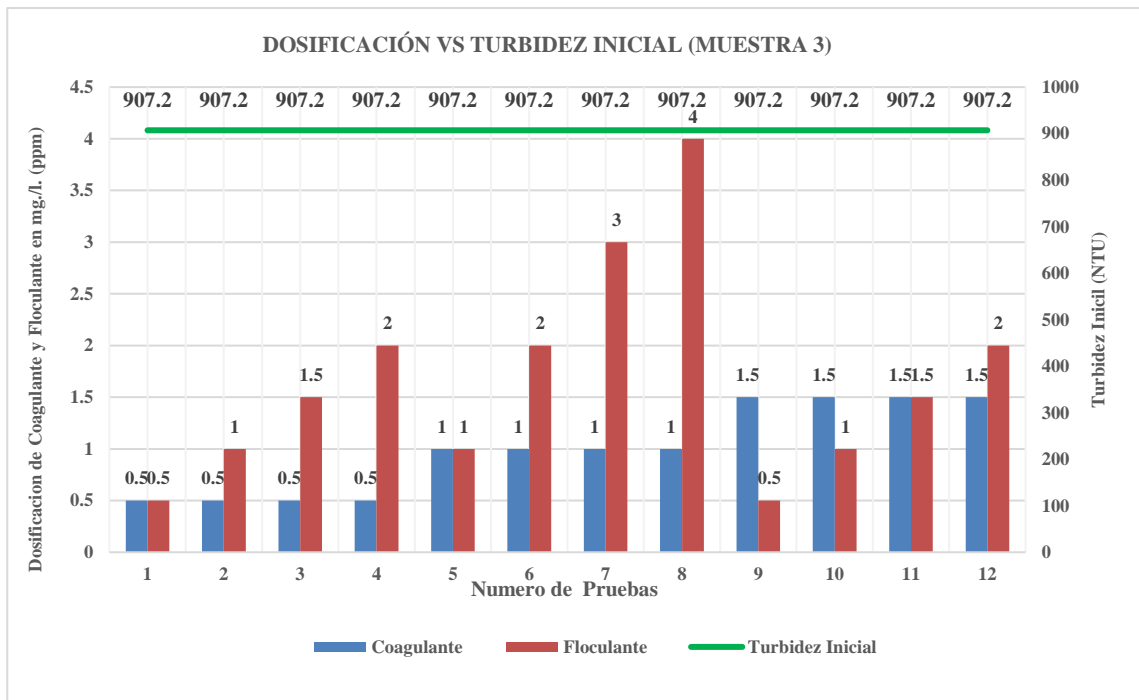


Figura 69: Relación entre la dosificación y la turbidez Inicial.

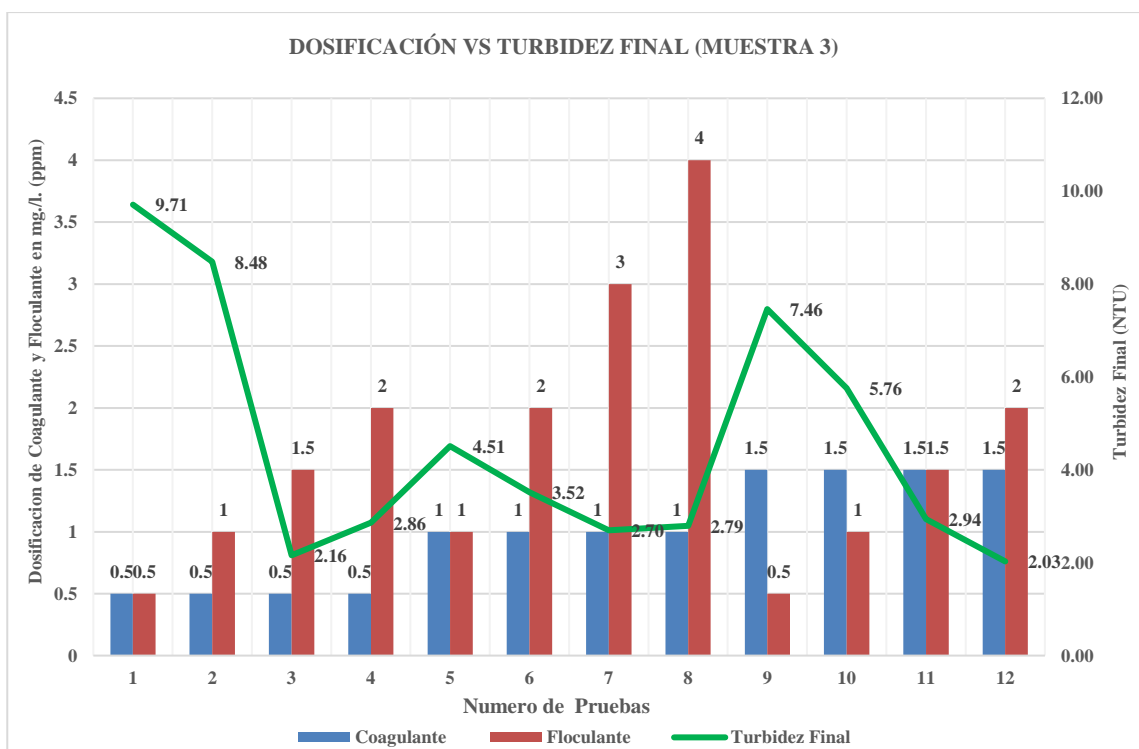


Figura 70: Relación entre la dosificación y la turbidez final.

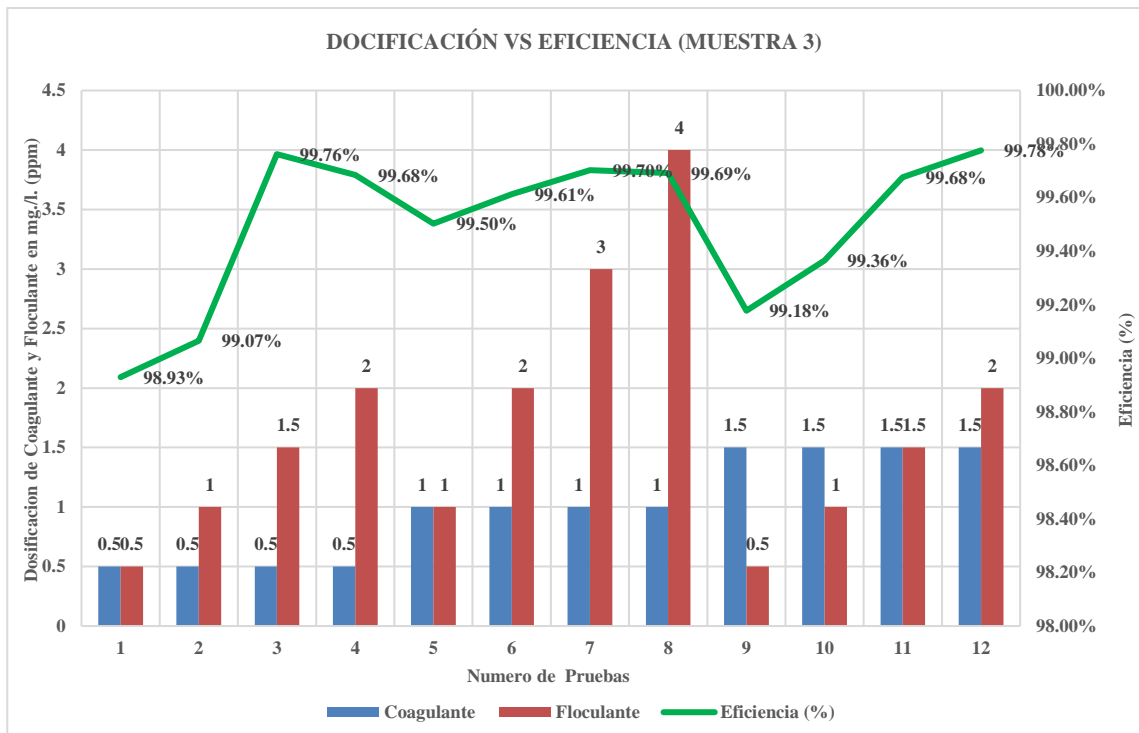


Figura 71: Relación entre la dosificación y la eficiencia.

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Parámetros geomorfológicos de la cuenca.

De los resultados que se obtuvieron de la cuenca de estudio se puede apreciar que por su superficie es una microcuenca ya que su área es de 0.325 km²., esto según la tabla 1. Por otro lado, según su forma la cuenca tiene es del tipo oblonga alargada irregular, según la tabla 2.

En cuanto a su relieve la cuenca tiene una pendiente media de 24.959% o su equivalente en grados sexagesimales de 14.01°, según el diagrama de frecuencia y su curva hipsométrica, de esta última por ser cóncava hacia arriba presenta cumbres escarpadas y valles cortos, además la altura media de la cuenca es de 3934 m.s.n.m.

4.2. Hidrología y análisis de tormentas

De los datos obtenidos del análisis de variable extrema usado el método probabilístico de Gumbel, se obtuvo la tabla 23 y la gráfica 37, la cual muestra las curvas IDF, posteriormente con la ecuación de transferencia de tormentas se generó una nueva grafica la cual contiene las nuevas curvas IDF, con información de tormentas trasferidas tal como se muestra en la figura 38.

4.3. Caudal de diseño

Con respecto al cálculo del caudal de diseño, se tuvo que hacer una transferencia de información hidrometeorológica de la estación base (microcuenca del río Mashcón) a la zona de estudio (sub cuenca de la microcuenca del río Llaucano).

De estos sistemas hidrológicos se puede decir que para el caso del río Mashcón por tener un índice de Gravelius = 1.49, su cuenca presenta una forma del tipo *oval oblonga*, mientras que para el caso del río Llaucano presenta una forma *oval redonda*.

El rango de clase de la microcuenca del río Mashcón $1.25 \leq K_c \leq 1.50$ y el rango del río Llaucano es $1.00 \leq K_c \leq 1.25$, por lo que se puede apreciar ambos se encuentran en grupos diferentes, pero hay que mencionar que el índice de Gravelius del río Llaucano está muy próximo al rango de valores de la microcuenca del río Mashcón. Es por ello que se consideró sistemas hidrológicos con similitud hidráulica. Además, el autor menciona un margen de error para cada parámetro de

0.05 – 0.30 de la tabla anterior se puede apreciar que para el índice de Gravelius la diferencia está dentro del margen de error, mientras que para la relación de confluencia se tiene un margen de 0.34, que con fines prácticos sería aceptable por último el coeficiente orográfico con una diferencia de 0.08.

De esta manera se pudo decir que los dos sistemas son hidráulicamente semejantes y por lo tanto se procedió con su cálculo obteniéndose un caudal máximo para un tiempo de retorno de 25 años.

$$Q(\text{máximo}) = 5.436 \frac{m^3}{s}$$

4.4. Cuantificación de la erosión hídrica y de la producción de sedimentos

a. Mapa de pendientes

La erosión está íntimamente ligada con la pendiente, es por ello que primero se debía de hallar un mapa de pendientes con la finalidad de identificar las áreas con mayor pendiente y determinar sus respectivos porcentajes respecto del área total. A continuación se muestra el rango de pendiente en porcentaje y sus respectivas áreas como sus porcentajes respecto del área total.

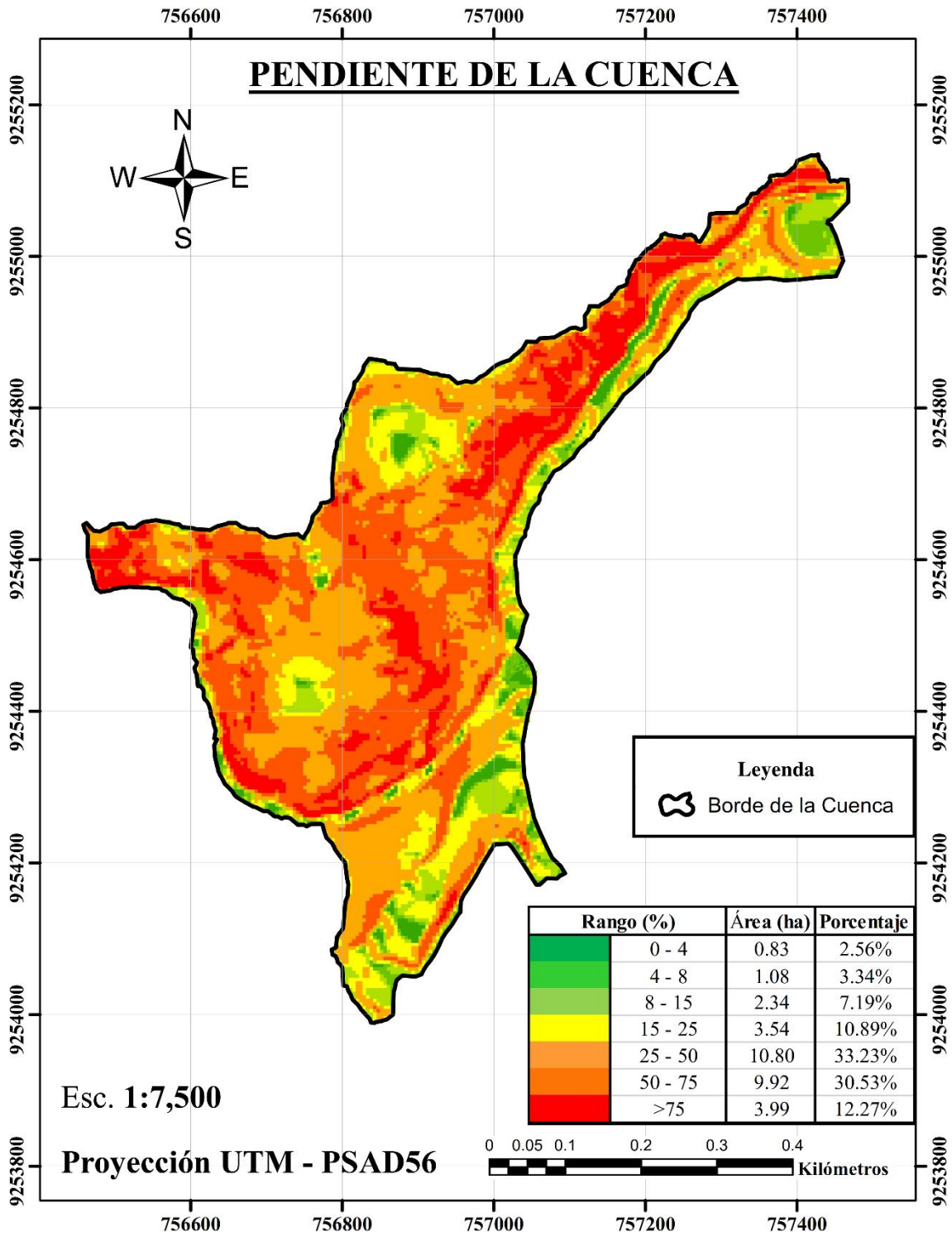


Figura 72: Mapa de pendientes.

b. Mapa de suelos

Con respecto al mapa de suelos en el área de estudio se identificaron 4 tipos de suelos, el suelo natural, el remediado y dos vías de acceso 1 y 2 respectivamente.

A continuación, se muestra los de talles de lo antes mencionado.

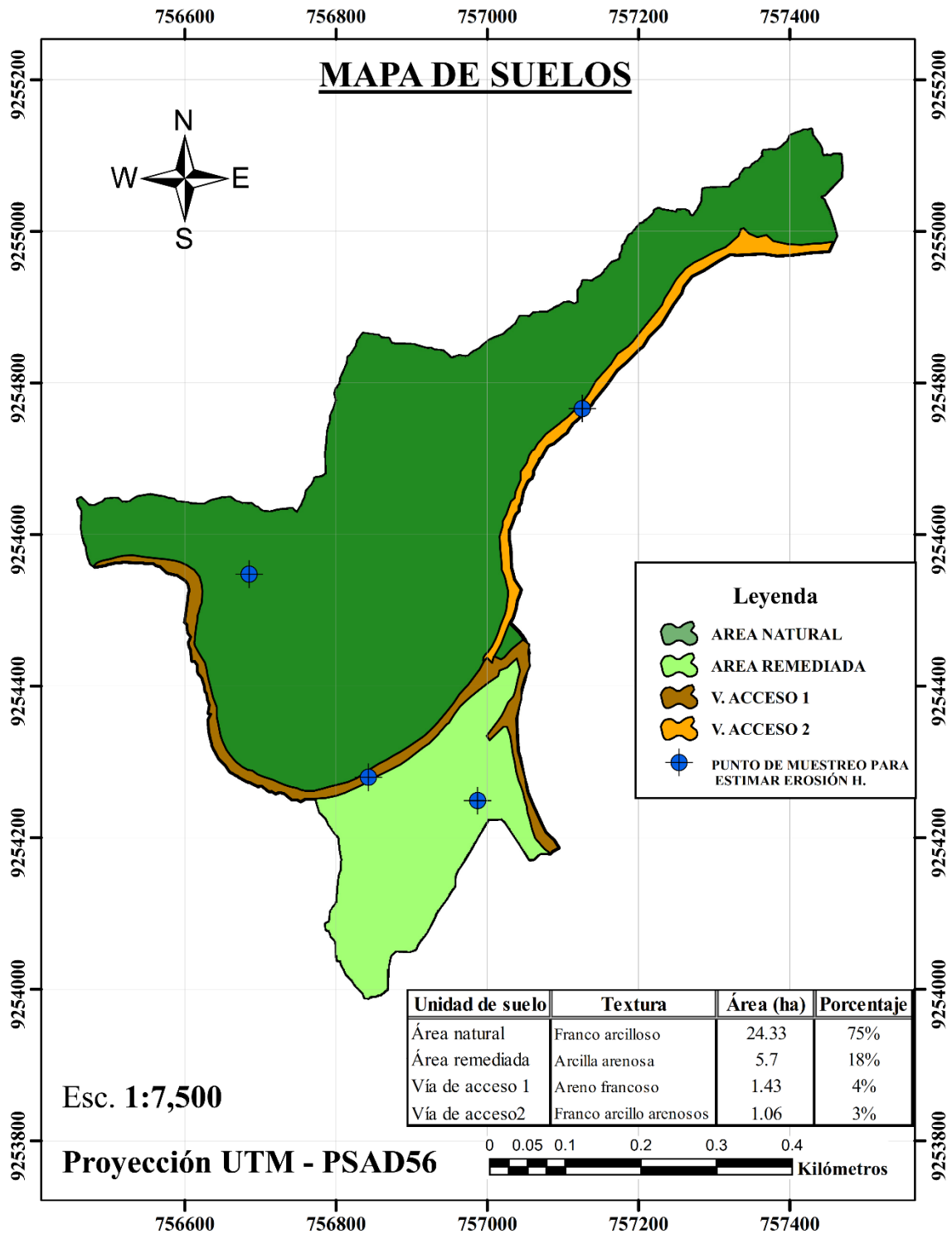


Figura 73: mapa de suelos del área de estudio.

c. Mapa del factor de erosividad (R)

Después de hacer un análisis de información, (registro de precipitaciones), con la que se cuenta en el área de estudio se determinó que no eran lo suficiente para determinar este factor, ya que según la bibliografía revisada recomiendan que por lo menos tener un registro de 20 años o más.

Para salvar este error se hicieron uso de estaciones cercanas y otras que poseen las mismas características fisiográficas.

Tabla 51: valores de erosividad que se obtuvieron del mapa.

Rango de valores de "R"	Área (ha)	Porcentaje
159.09 - 160.56	4.34	13%
160.57 - 161.63	6.55	20%
161.64 - 162.62	6.94	21%
162.63 - 163.60	8.25	25%
163.61 - 164.93	6.44	20%

Luego el factor R promedio es:

$$(\text{promedio}) = 162.29 \left(\text{MJ} - \frac{\text{cm}}{\text{ha h}} \right)$$

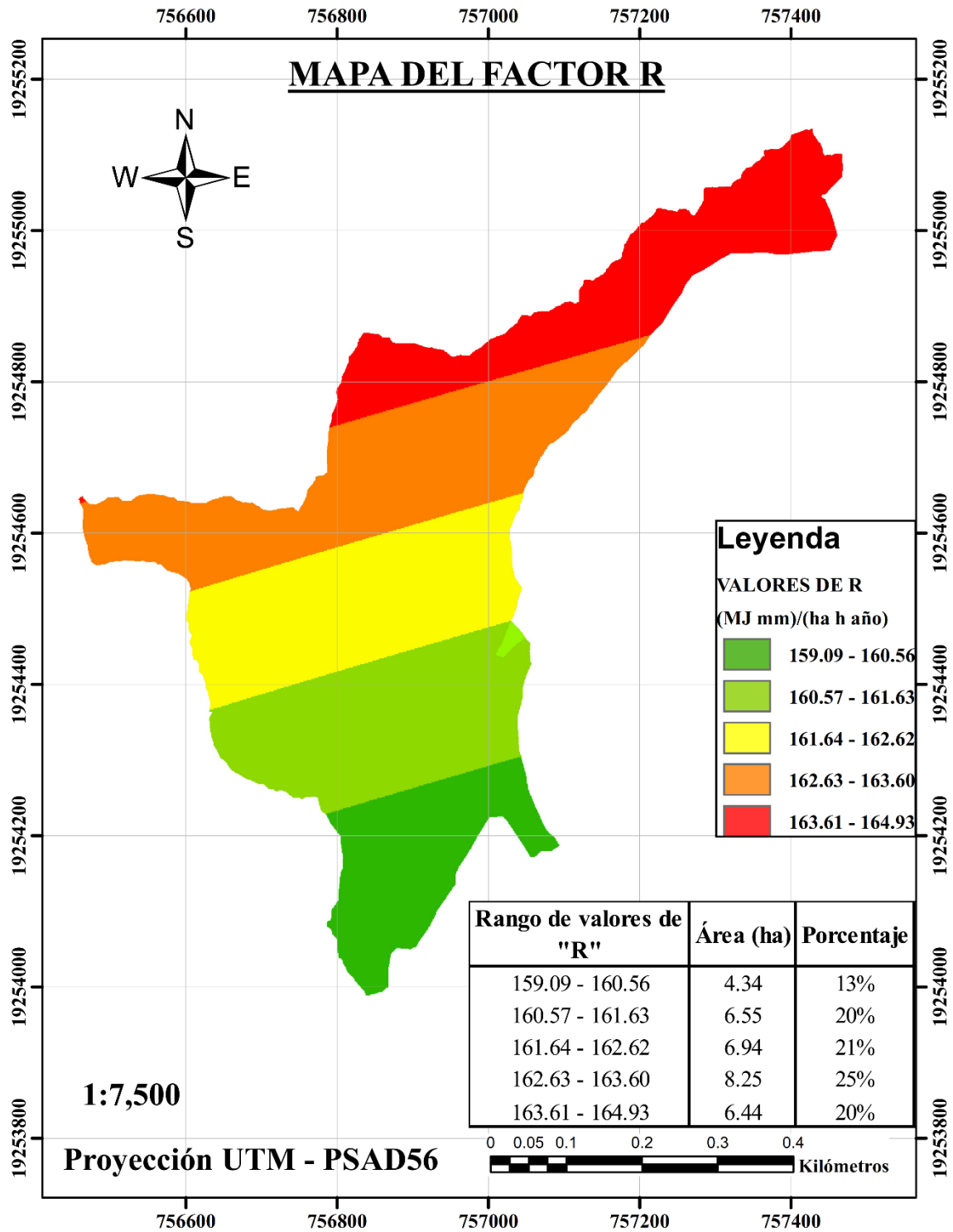


Figura 74: Mapa del factor R.

d. Mapa del factor de Erodabilidad (K)

El factor de erodabilidad está ligado al tipo de suelo y sus características que poseen, para la zona de estudio, con los 4 tipos de suelo que se han identificado y después de hacerles sus análisis granulométricos y determinar sus texturas se obtuvo la siguiente tabla.

Tabla 52: cuadro de resumen de valores del factor K

Unidad de Suelo (Ton-(ha) (h)/(MJ)(ha) (cm)	Clase de textura	Área (ha)	Porcentaje	FACTOR K
Suelo Natural	Franco arcilloso	24.33	75%	0.128
Suelo Remediado	Arcilla arenosa	5.7	18%	0.056
Vía de Acceso 1	Areno francoso	1.43	4%	0.047
Vía de Acceso 2	Franco arcillo arenosos	1.06	3%	0.081

Luego el factor K promedio es:

$$K(\text{promedio} = 0.11 \text{ (Ton} - \text{ha} \frac{h}{\text{MJ ha cm}})$$

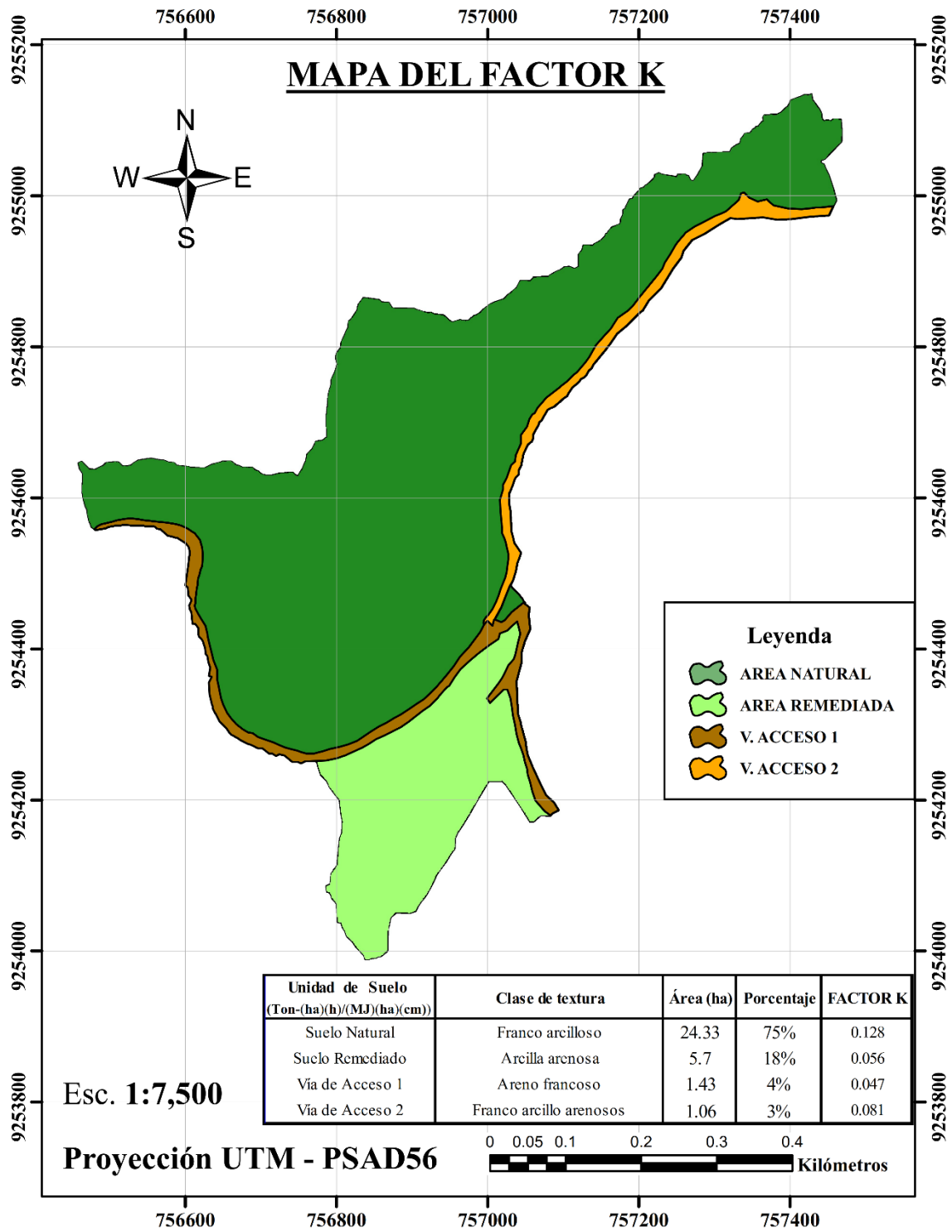


Figura 75: Mapa del factor K.

e. Mapa del factor Topográfico (LS)

Este mapa resulta del producto del factor L y del factor S. es decir el primero indica a la longitud de la pendiente y el segundo a su pendiente respectivamente, del mapa se ha hecho una clasificación en 10 rangos que van desde 0.03 hasta los 819.08.

Los detalles se muestran en la siguiente tabla

Tabla 53: Resumen de los resultados del mapa del factor LS

Rango	Área (ha)	Porcentaje
0.03 - 1.48	27.43	84.31%
1.49 - 5.50	3.96	12.17%
5.51 - 14.11	0.71	2.19%
14.12 - 29.91	0.21	0.64%
29.92 - 55.35	0.09	0.26%
55.36 - 99.73	0.04	0.11%
99.74 - 165.66	0.04	0.12%
165.67 - 277.21	0.03	0.10%
277.22 - 435.44	0.01	0.04%
435.45 - 819.08	0.02	0.06%

Luego el factor LS promedio es:

$$LS(\text{promedio}) = 2.50$$

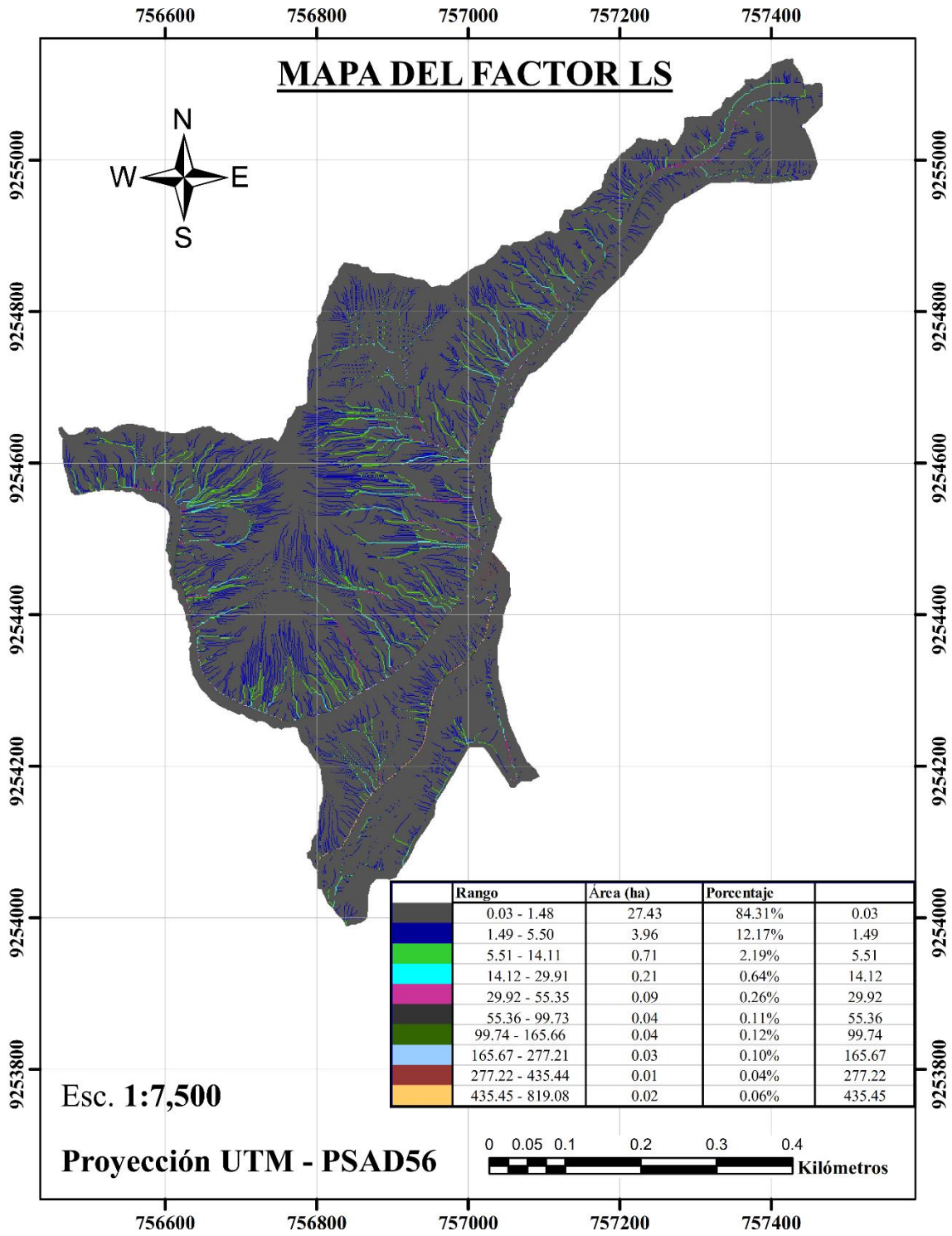


Figura 76: Mapa del factor LS.

f. Determinación del factor de cobertura

Para el valor de cobertura C se determinaron de manera visual y en base tablas, y se ha clasificado en 4 tipos de cubierta vegetal, obteniéndose valores de 0.02 para el área natural y de 1 para las áreas disturbadas.

La clasificación de la cubierta vegetal se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 54: valores estimados de cobertura (C).

Cubierta vegetal	Área (ha)	Porcentaje	Valor de C (adim.)
Área natural	24.33	75%	0.02
Área remediada	5.7	18%	0.035
Área disturbada 1 (vía de acceso 1)	1.43	4%	1
Área disturbada 2 (vía de acceso 2)	1.06	3%	1

Luego el valor de C promedio es:

$$C(\text{promedio}) = 0.09$$

g. Mapa del factor P

Este mapa está ligado a las prácticas de conservación es decir a la conservación que se les da a los suelos.

Del mapa del factor P se extrajo la siguiente tabla.

Tabla 55: resumen de valores del factor P.

Rango de P	Área (ha)	Porcentaje
0.00 - 0.55	5.65	17.38%
0.56 - 0.77	2.32	7.12%
0.78 - 1.00	24.56	75.50%

Luego el factor P promedio es:

$$P(\text{promedio}) = 0.77$$

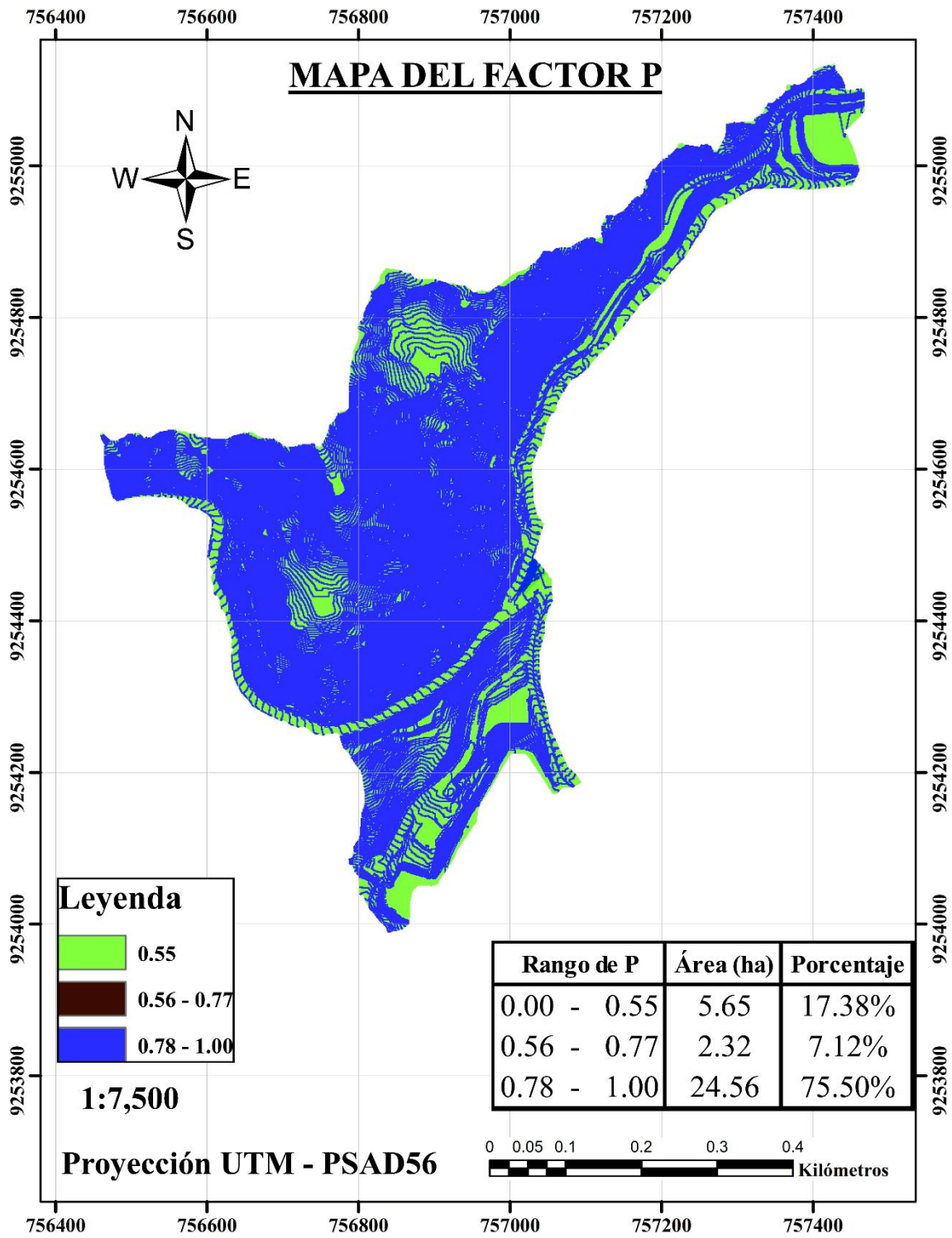


Figura 77: Mapa del factor P.

h. Erosión hídrica

Por último, se realizó la generación del mapa de erosión hídrica, el cual se tuvo que hacer la multiplicación de los parámetros anteriormente obtenidos.

De este mapa se pudo deducir que la erosión hídrica tiene una relación estrecha con la pendiente y con el tipo de cobertura principalmente, además se puede decir que en las vías de acceso hay un mayor rango del valor de la erosión, esto con respecto al área natural y remediada respectivamente.

La erosión hídrica o erosión hídrica media unitaria, en términos de números es:

$$E = (162.29)(0.11)(2.50)(0.09)(0.77)$$

$$E = 3.093 \text{ Tn /Ha/Año}$$

Luego la erosión hídrica media total es:

$$E = 100.517 \text{ Tn /Año}$$

De lo anterior se puede decir que este resultado es de una erosión hídrica promedio de toda la cuenca en estudio ya que según el mapa que se obtuvo de erosión este arroja mayores valores a la zona que está compuesta por las vías de acceso.

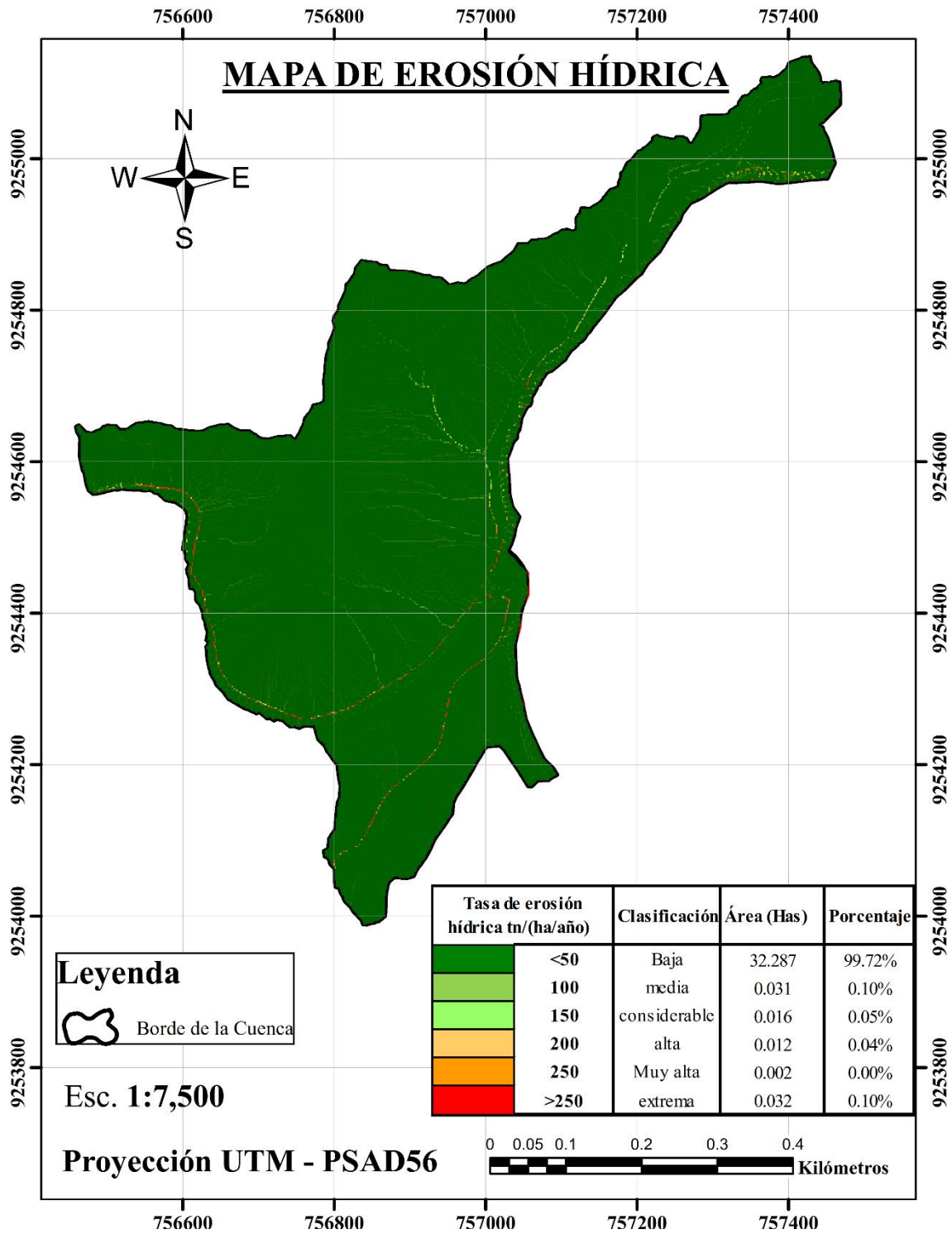


Figura 78: Mapa de la erosión hídrica.

i. Producción de sedimentos in situ

Para la cuantificación de la producción de sedimentos se estimó mediante la tasa de descarga de sedimentos.

Tabla 56: valores de la producción de sedimento, según diferentes autores.

AUTOR(ES)	SDR	Erosión Hídrica (tn/ha/año)	Ys (tn/ha/año)
Steward et al,1975	0.383	3.093	1.185
Williams y Berndt	0.263	3.093	0.815
Vanoni	0.541	3.093	1.673
USDA SCS	0.64	3.093	1.981
Roehl	0.451	3.093	1.394

De lo anterior se tomó el valor del SDR de 0.64 ya que este es el valor más alto, porque para determinar la producción de sedimento en función del SDR se debe de tener en cuenta la pendiente de la cuenca, la cercanía de las zonas más propensas a erosión hídrica, tal como lo es la cuenca de este estudio, es por ello que se adopta el valor dado por la USDA SCS.

$$Y_s = 1.981 \text{ tn/ha/año}$$

Luego el aporte de sedimentos en la cuenca es de:

$$Y_s = (1.981 \frac{\text{tn}}{\text{ha}}) (32.5 \text{ ha}) = 64.382 \frac{\text{tn}}{\text{año}}$$

Cabe mencionar que este aporte de sedimento de la cuenca es en promedio, dadas para las condiciones iniciales de precipitación para el cual fue calculado la erosión hídrica.

Además, la poza de sedimentación tiene un volumen de **600 m³**

La densidad promedio del material sedimentado es de **1889.15 kg/m³**

Según el diseño de la poza esta puede albergar sedimentos a una capacidad máxima de 35% de su volumen, antes de su mantenimiento y limpieza, es decir:

$$\text{Vol. máx. sed} = \frac{35}{100} * 600 = 210 \text{ m}^3$$

Ahora convirtamos este volumen en peso de sedimento.

$$\text{Peso. sed.} = (210)(1889.15) = 396.72 \text{ tn}$$

Por último, se comparó el valor de la producción media anual de sedimento con respecto a la capacidad máxima de almacenamiento en peso de la poza sedimentadora.

$$\frac{64.382 \frac{\text{tn}}{\text{año}}}{396.72 \text{ tn}} = \frac{0.1623}{\text{año}}$$

Lo anterior quiere decir que la producción de sedimento en promedio para un año solo llega al **16.22%**.

j. Transporte de sedimentos

Con respecto al transporte de sedimentos se ha determinado su valor en base a tres metodologías, dos de ellas a través de ecuaciones y la otra por medio de medición directa.

De la fórmula de Garde y Pande, de la cual se obtiene caudal solido en suspensión, esta, se obtuvo a través de características físicas, del material sedimentado, tales como diámetro medio de la partícula, su peso específico, características del agua, como su viscosidad, peso específico y de las características del canal como radio hidráulico, y su pendiente. Mientras que la fórmula de Benedict y Vanuni esta está en función de la concentración medida, así como el caso del método de medición, a continuación, se presenta una tabla con los resultados obtenidos por los tres métodos aplicados.

Tabla 57: comparativa de las tres metodologías aplicadas para calcular el transporte en suspensión de sedimentos.

Fecha de registro	Lectura del tirante del canal (cm)	Caudal (m ³ /s)	Fórmula de Garde y Pande GS (kg/s)	Fórmula de Benedict y Vanuni GS (kg/s)	Por medición GS (kg/s)
01/02/2018	5.24	0.1206	1.0562	0.483	0.438
04/02/2018	5.98	0.1503	1.3163	1.179	1.069
05/02/2018	10.09	0.3594	3.1476	4.466	4.046
03/02/2018	13.17	0.5616	4.9184	10.763	9.753
18/02/2018	23.67	1.5181	13.2953	54.271	49.177

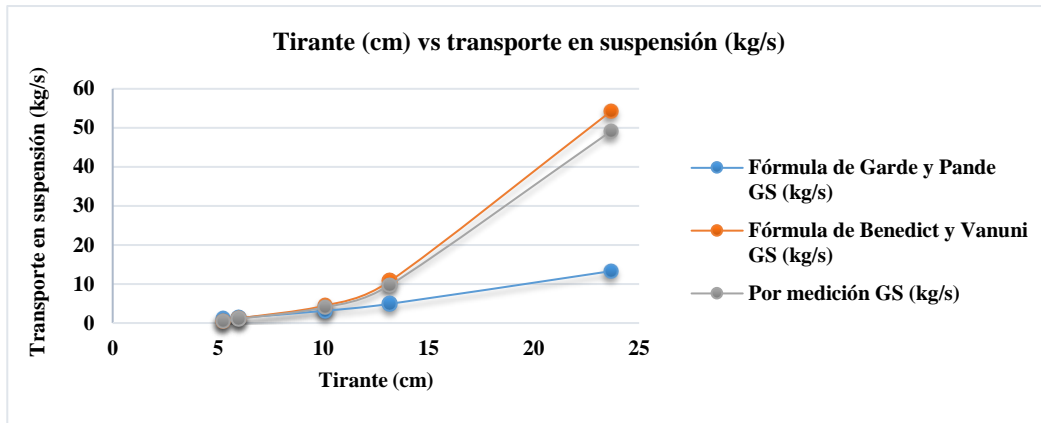


Figura 79: comparación de las tres metodologías para determinar el transporte de sedimentos.

La grafica anterior no considera el caudal de diseño.

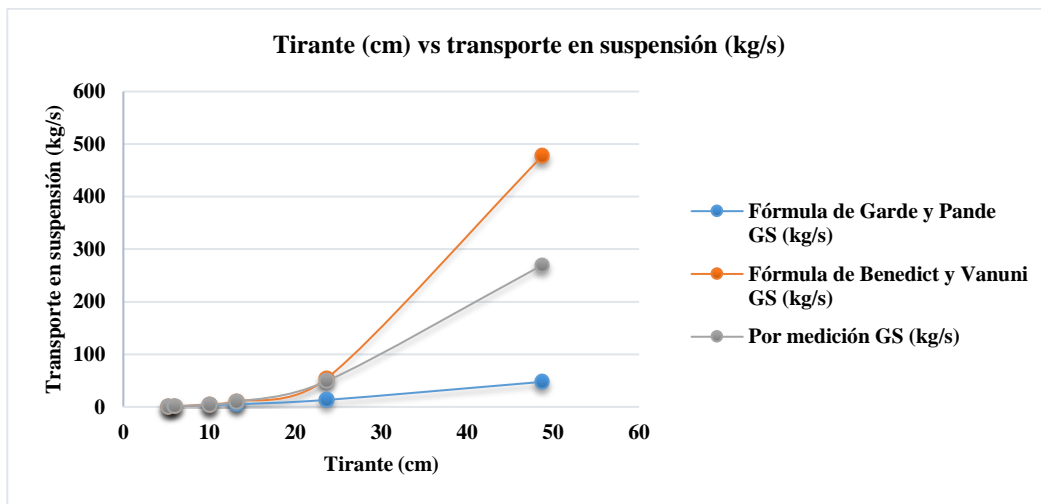


Figura 80: comparación de las tres metodologías para determinar el transporte de sedimentos.

De las dos graficas anteriores se aprecia que a medida que aumenta el tirante el gasto solido en suspensión diverge, y se aprecia que la fórmula de Garde y Pande hace una subestimación del caudal de sedimentos en suspensión, mientras que la de Benedict y Vanuni para tirantes pequeños presenta gran similitud para resultados de del caudal de sedimentos en suspensión.

Luego se calibra la curva de Benedict en función de la curva del método de medición.

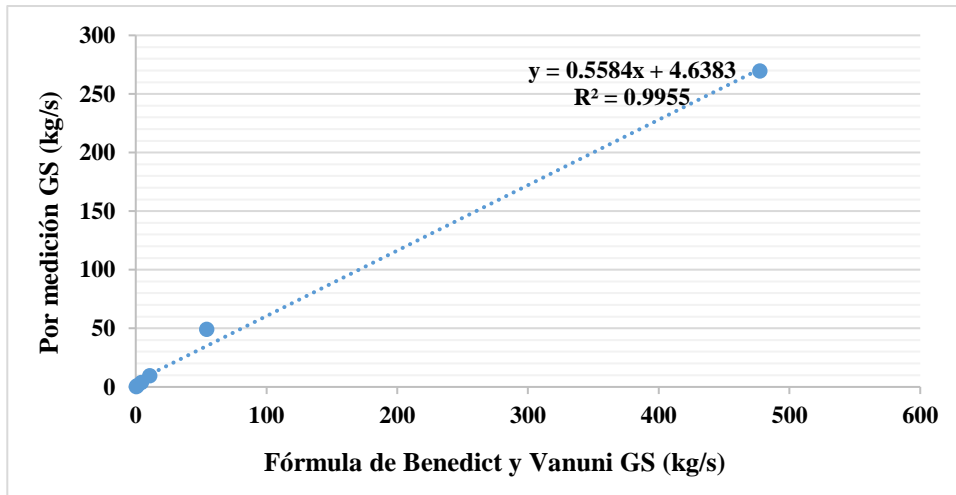


Figura 81: regresión de la fórmula de Benedict y Vanuni en función de lo medido.

De la figura anterior se aprecia que el coeficiente de correlación tiene valor de $r^2 = 0.9955$ eso quiere decir que es aceptable el resultado que se obtiene por el método de Benedict y Vanuni.

Por último, se realiza la calibración del transporte de sedimentos en función del caudal máximo.

- Garde y Pande:

$$GS = 47.586 \text{ kg/s}$$

- Benedict y Vanuni:

$$GS = 477.477 \text{ kg/s}$$

- Extensión de lo medido:

$$GS = 269.712 \text{ kg/s}$$

El ultimo resultado que se muestra es una extensión que se ha realizado a través de la ecuación de la figura 54.

Luego a través de la ecuación que aparece en la figura 81 se realiza el ajuste de la ecuación de Benedict y Vanuni con respecto a lo medido.

$$GS = 0.5584 GS_{(Benedict \text{ y } Vanuni)} + 4.6383$$

$$GS(\text{calibrado}) = (0.5584)(477.477) + 4.6383 = 271.261 \frac{k}{s}$$

Lo anterior representa una aproximación al 99.55% con respecto a lo medido.

k. Control de sedimentos

Con respecto al tratamiento del agua de escorrentía superficial de la tabla (50) se puede ver que la mínima dosificación y a la vez la que da mejores resultados con respecto a la eficiencia en clarificar el agua es de 0.5 ml y 1.5 ml de coagulante y floculante respectivamente. Esta dosificación se realizó para un volumen unitario de un litro.

Para la aplicación de estos valores en la práctica se recomienda hacerlo de la siguiente manera: por cada 0.5 litros de coagulante diluidos se adicionará 1.5 litros de floculante diluidos, estos se prepararán en tanques de 1100 litros, así como se muestra a continuación.

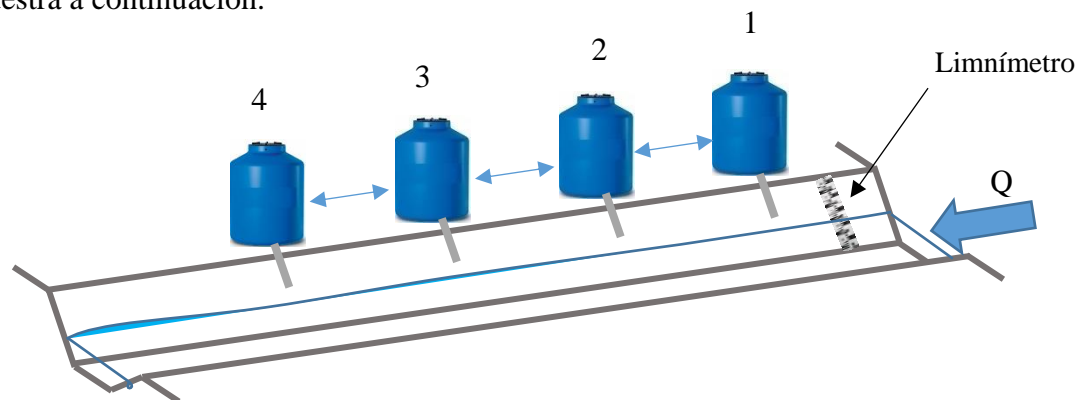


Figura 82: Esquema de dosificación al canal principal

Lo anterior quiere decir que 0.5 litros. De coagulante y 1.5 litros. De floculante son suficiente para tratar 1000. de agua cargada de sedimento con un límite de 6500 NTU aproximadamente.

La dosificación inicia abriendo la válvula del tanque **1** el cual contiene coagulante, esto por el lapso de 1 minutos. Posteriormente se abre el tanque **3** al triple del volumen de vertimiento del tanque **1**.

La rutina anterior se repite para el tanque **2** (coagulante) y el tanque **4** (floculante).

A continuación, se enlaza la dosificación con la concentración que ha sido extendida de los resultados medidos en campo y laboratorio, con la turbidez.

Tabla 58: dosificación de coagulante y floculante en (l/s) según las lecturas del Limnómetro lateral.

Tirante (cm.)	Limnómetro lateral (cm.)	Caudal de escorrentía (l/s)	Concentración (mg/l)	Turbidez NTU	Caudal de dosificación (l/s). Coag.	Caudal de dosificación (l/s). Floc
1.00	1.41	7.700	-	-	0.004	0.012
2.00	2.83	24.300	-	-	0.012	0.036
3.00	4.24	47.700	1021.800	193.254	0.024	0.072
4.00	5.66	77.000	2643.500	582.976	0.039	0.116
5.00	7.07	111.600	4265.200	1010.350	0.056	0.167
6.00	8.49	151.100	5886.900	1475.376	0.076	0.227
7.00	9.90	195.300	7508.600	1978.054	0.098	0.293
8.00	11.31	244.000	9130.300	2518.384	0.122	0.366
9.00	12.73	297.000	10752.000	3096.366	0.149	0.446
10.00	14.14	354.100	12373.700	3712.000	0.177	0.531
11.00	15.56	415.300	13995.400	4365.286	0.208	0.623
12.00	16.97	480.400	15617.100	5056.224	0.240	0.721
13.00	18.38	549.500	17238.800	5784.814	0.275	0.824
14.00	19.80	622.400	18860.500	6551.056	0.311	0.934
15.00	21.21	699.000	20482.200	7354.950	0.350	1.049
16.00	22.63	779.500	22103.900	8196.496	0.390	1.169
17.00	24.04	863.600	23725.600	9075.694	0.432	1.295
18.00	25.46	951.400	25347.300	9992.544	0.476	1.427
19.00	26.87	1042.900	26969.000	10947.046	0.521	1.564
20.00	28.28	1138.000	28590.700	11939.200	0.569	1.707
21.00	29.70	1236.700	30212.400	12969.006	0.618	1.855
22.00	31.11	1339.100	31834.100	14036.464	0.670	2.009
23.00	32.53	1445.100	33455.800	15141.574	0.723	2.168
24.00	33.94	1554.600	35077.500	16284.336	0.777	2.332
25.00	35.36	1667.800	36699.200	17464.750	0.834	2.502
26.00	36.77	1784.700	38320.900	18682.816	0.892	2.677
27.00	38.18	1905.100	39942.600	19938.534	0.953	2.858
28.00	39.60	2029.100	41564.300	21231.904	1.015	3.044
29.00	41.01	2156.800	43186.000	22562.926	1.078	3.235
30.00	42.43	2288.100	44807.700	23931.600	1.144	3.432
31.00	43.84	2432.540	46429.400	25337.926	1.216	3.649
32.00	45.25	2573.851	48051.100	26781.904	1.287	3.861
33.00	46.67	2719.032	49672.800	28263.534	1.360	4.079
34.00	48.08	2868.082	51294.500	29782.816	1.434	4.302
35.00	49.50	3021.002	52916.200	31339.750	1.511	4.532
36.00	50.91	3177.791	54537.900	32934.336	1.589	4.767
37.00	52.33	3338.450	56159.600	34566.574	1.669	5.008
38.00	53.74	3502.979	57781.300	36236.464	1.751	5.254
39.00	55.15	3671.377	59403.000	37944.006	1.836	5.507
40.00	56.57	3843.645	61024.700	39689.200	1.922	5.765

41.00	57.98	4019.782	62646.400	41472.046	2.010	6.030
42.00	59.40	4199.789	64268.100	43292.544	2.100	6.300
43.00	60.81	4383.666	65889.800	45150.694	2.192	6.575
44.00	62.23	4571.412	67511.500	47046.496	2.286	6.857
45.00	63.64	4763.028	69133.200	48979.950	2.382	7.145
46.00	65.05	4958.513	70754.900	50951.056	2.479	7.438
47.00	66.47	5157.868	72376.600	52959.814	2.579	7.737
48.00	67.88	5361.093	73998.300	55006.224	2.681	8.042
49.00	69.30	5568.187	75620.000	57090.286	2.784	8.352

La tabla anterior ha sido extendida hasta el tirante que posee el caudal máximo.

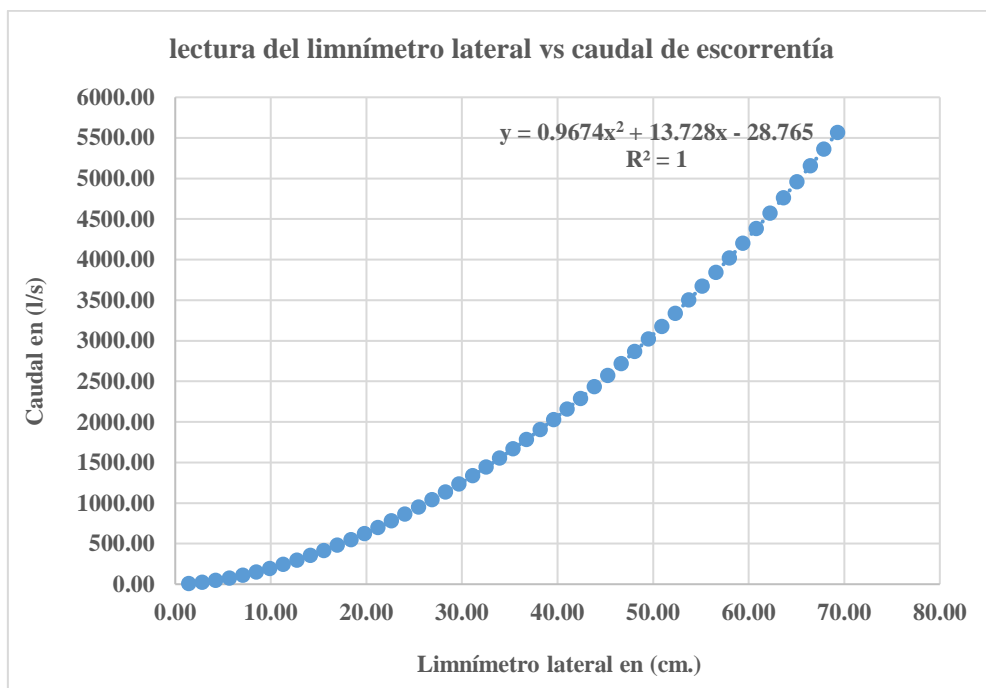


Figura 83: la gráfica muestra la relación de la lectura del Limnómetro respecto del caudal.

La ecuación anterior resultaría útil si se quiere extender la tabla anterior.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El cálculo de los parámetros geomorfológicos de la cuenca de estudio nos permitió determinar ciertas características tales como su área de 0.325 km^2 , su altitud media de 3934 m.s.n.m. y su pendiente de 24.959%, de los datos estos son los más resaltantes dentro de este estudio ya que la pendiente alta indica que existe una mayor erosión hídrica y gran capacidad de traslado de material erosionado hacia las partes bajas, por otra parte la cuenca de estudio está en presencia de grandes precipitaciones debido a su altitud.
- El análisis de variable extrema de las intensidades de precipitación de la estación base se obtuvo por medio del método de Gumbel, el cual se usa para predecir magnitudes máximas de variables hidrológicas, como las intensidades de precipitación, de este análisis se generó las curvas IDF para periodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 50, 75, 100 y 200 años y para tiempos de duración de 5 a 120 minutos.
- la transferencia de información hidrológica, fue posible ya que existió similitud entre las tres condiciones que menciona el autor como los son el coeficiente orográfico 1.87/1.95, relación de confluencias 3.67/4.01 y el coeficiente de Gravelius 1.49/1.24, siendo este último el más crítico, ya que de ello depende la forma de la cuenca y para nuestros dos sistemas hidrológicos, uno conformado por la microcuenca del río Mashcón y la otra por la microcuenca del río llaucano, esta última presenta una forma oval redonda y mientras que la microcuenca del río Mashcón presenta una forma oval oblonga, con coeficiente de Gravelius $K_c = 1.49$, y la microcuenca del río llaucano $K_c = 1.24$, se pudo realizar la transferencia ya que el rango de clase del río Mashcón es de $1.25 \leq K_c \leq 1.50$. y el valor de la microcuenca de río llauca esta próxima al valor del límite inferior de este rango de clase, por lo tanto, se pudo realizar la transferencia.
Cabe precisar que la microcuenca de estudio es una subcuenca de la microcuenca del río llaucano.
- Para determinar el caudal de diseño, el cual se obtuvo a través del método racional, y sus factores se determinaron así, el coeficiente de escorrentía se determinó a través de un promedio ponderado, de la diferenciación de

tres áreas, 24.33 ha es área natural con un C de 0.46, 5.7 ha es área remediada con un C de 0.42 y 2.49 ha con un C de 0.65, de ello obtuvimos un C ponderado de 0.47, el otro factor es la intensidad y esta se obtuvo por medio de la transferencia de información de intensidades y se obtuvo un valor de 128 mm/h. y por último el área a través de los parámetros geomorfológicos de la cuenca, con todo esto se determinó un caudal máximo de 5.436 m³/s y fue calculado para un periodo de retorno de 25 años según diseño de vías de drenaje, de lo anterior se concluye que este caudal representa un caudal tope en esta investigación.

- Con respecto a la erosión hídrica la cual se obtuvo por medio de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) y el procesamiento de sus factores mediante el sistema de información geográfica, nos permitió poder estimar la pérdida de suelo en la cuenca de estudio para un rango de clasificación según FAO. De las 32.5 ha 32.287 ha presentan erosión baja, es decir menor a 50 tn/ha/año, 0.031 ha presentan erosión media de valor de 100 tn/ha/año, 0.016 ha erosión considerable de valor 150 tn/ha/año, 0.012 ha erosión alta de valor 200 tn/ha/año, 0.002 ha erosión muy alta de valor 250 tn/ha/año y 0.032 ha presentan erosión extrema con valores por encima de las 250 tn/ha/año, de lo anterior se concluye que la mayor parte del territorio de la cuenca en estudio presenta erosión baja con un valor medio de 3.093 tn/ha/año.
- la estimación de la producción de sedimentos se realizó a través del coeficiente de entrega de sedimentos o SDR y se adoptó el criterio propuesto la USDA SCS, dando un porcentaje de 64%, este valor se adoptó por ser el más alto y por las características que posee la cuenca las cuales son el alta pendiente y la cercanía de las zonas erosionadas al punto de descarga. Lo anterior da un valor promedio de producción de sedimentos de 1.981 tn/ha/año y con respecto al transporte de sedimentos se adoptó el criterio de Benedict y Vanuni con un valor dado para el caudal máximo de previa calibración dando un valor de 271.261 kg/s, se concluye que la producción de sedimentos es en promedio es decir que hay zonas donde su valor aumenta y hay otras en las que va a decrecer, y con respecto la transporte de sedimentos hay una gran capacidad para transportar

sedimentos por el canal esto es debido a la pendiente de 7.92% que presenta el canal.

- Acerca del tratamiento químico del agua de escorrentía, se encontró una dosificación mínima y a la vez la que posee mejor eficiencia en reducir la turbidez es de 0.5 litros por 1.5 litros de coagulante y floculante respectivamente son suficientes para reducir el valor de la una turbidez a una eficiencia del 99.74%.

En contraste con la hipótesis para reducir la colmatación en las pozas de sedimentación la cantidad de sedimento que ingresa al año es de 64.382 tn/año y según el análisis de la prueba de jarras el porcentaje de remoción de sedimentos es del 99.74% con lo antes mencionado y haciendo uso de la tabla 58, se estaría dando un mejor control al agua cargada de sedimento, logrando evitar de esta manera que el sedimento entre sin un tratamiento correcto hacia la poza de sedimentación, por lo que se esta manera se estaría dando un adecuado manejo.

5.2.Recomendaciones

- En base a la presente investigación se hace la recomendación que, con respecto a la erosión hídrica, tomar acciones como prácticas de conservación de suelo para frenar de alguna manera la perdida de suelo, ya que son conocidas las zonas más propensas a erosión.
- Se recomienda usar la tecnología como la teledetección para caracterizar cuencas, además que estas presentan gran bondad de ajuste.
- con respecto al control de la sedimentación se demostró que la dosificación 0.5 kg/m^3 y 1.0 l/m^3 es suficiente para retener más del 99% de sedimentos, por lo que se recomienda hacer uso de la tabla 58.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- APARICIO MIJARES, FJ. 1997. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa, S.A. Balderas 95, México, D.F.
- ARMIJOS CÁRDENAS, EN. 2010. Cuantificación de Flujos Sedimentarios de las Cuencas Amazónicas de Perú. Tesis MSc. en Ingeniería de Recursos Hídricos. Ciudad de Lima, Perú, UNALM. 81 p.
- ARNOLDUS, H. 1980. An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In M.De Boodt and D. Gabriels.(eds.). Assessment of soil erosion. John Wiley and Sons, Chichester, Gran Bretaña. P.127-132.
- BASCUÑÁN CHAPARRO, SM. 2010. Relación entre la erosión producida por un flujo superficial en suelos finos y algunas propiedades de estos. Tesis Titulo Ing. Civil, Santiago de Chile, Chile, Universidad de Chile. 222 p.
- BELTRAME, AV. 1994. Diagnóstico do meio ambiente físico de bacias hidrográficas: modelo de aplicação. Florianópolis: UFSC, 112 p.
- BUBENZER G.D. & JONES B.A. 1971. Drop size and impact velocity effects on the detachment of soils under simulated rainfall. Trans. of the ASAE.
- CABREJOS VALDIVIA, MN. 2016. Modelamiento Geoespacial en la Determinación del Riesgo, Vulnerabilidad y de la Cuantificación de la Erosión Hídrica en la Microcuenca del Río Atuén – Amazonas. Tesis Ingeniería Agrícola. Ciudad de Lima, Perú, UNALM. 145 p.
- CAHUANA ANDIA, A; YUGAR MORALES, W. 2009. Material de Apoyo Didáctico para La Enseñanza y Aprendizaje de la Asignatura de Hidrología CIV-233. Tesis Lic. En ing. civil. Cochabamba, Bolivia, UNMSS. 414 P.
- CASTRO MENDOZA, I. 2013. Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 34(2): 3-16.
- CAYO, L. 2001. “Modelamiento Ambiental para Análisis de Susceptibilidad Erosiva en la cuenca media y alta del Río Cañete y determinación del Mapa De Erosión”. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- CHOW, 1994 VT; MAIDEMENT, DR; MAYS, LW. 1994, Hidrología Aplicada. Primera edición. McGraw-Hill. Interamericana S.A. Bogotá, Colombia.
- CHOW, V.; D.R. MAIDMENT y L.W. MAYS (1994). - Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill, 580 pp.
- FIGUEROA, B.; CORTÉS, HG.; PIMENTEL, J.; OSUNA, ES.; RODRÍGUEZ, JM. Y MORALES, FJ. 1991. Manual de Predicción de Pérdidas de Suelo por Erosión Hídrica. Colegio de Posgraduados, SAHR, México.
- FLORES ISLAS, E. 2016. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres cuencas de la república mexicana, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo. Tesis, Titulo, Ing. Civil, Cd. México, UNAM. 146 p.

GARDE R. J. RANGA RAJU K.(1985).”Mecánica de Transporte de Sedimentos y problemas en Cauces Aluviales”. Jhon Wiley and Sons.

HERNÁNDEZ MUÑOZ, A. 2001. Depuración y desinfección de aguas residuales. 5ª ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1151 p. Colección Senior nº 9. ISBN: 84-380-0190-4

HUDSON, N. 1981. Soil conservation, Ithaca, New York, Cornell University Press, 324 p. Instituto Caribeño de Recursos Naturales. 2008, Cambio climático y reducción de riesgos de desastres. Reporte técnico N° 386. Consultado el 15 Oct 2013.

IBÁÑEZ SARA., ET ALL. 2011. Morfología de las cuencas hidrográficas. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universidad Técnica de Valencia.

ICONA (1988). Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo. Servicio de publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ed. Ariel, S.A. Barcelona, Madrid. 292 p.

Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA). 1988a. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo. Instituto para la Conservación de la Naturaleza. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.

LÓPEZ JIMENO CARLOS, 2002, Manual de estabilización de taludes, 2ª Edición, Publicado por U.D. Proyectos, E.T.S.I. Minas – U.P.M., Madrid, España, pp287 – 386.

LÓPEZ CÁRDENAS, F. La ingeniería en los procesos de desertificación. Grupo TRAGSA, Ediciones Mundi- Prensa. 2003

MANCILLA, G. 2008. Uso de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en el Campo Forestal.

MARÍN MARTÍN, MD; CASTILLO ELSITDIÉ, LG. 2011. Análisis Hidrológico e Hidráulico y de Transporte de Sedimentos en Cauces Efímeros. Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT. ISSN 1888-8356. 4: 30-32.

MARTONNE, E. 1940. traité de géographie physique. Armand Colin. Paris.

MCCOOL, D.K.; FOSTER, G.R. Y YODER, D.C. 2004 The Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2. ISCO - 13th International Soil Conservation Organisation Conference – Brisbane, July.

MENDOZA LÓPEZ, FA. 2014. Modelación del transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente, aplicación al río Las Cruces, Calimaya, Estado de México. Tesis Ing. Toluca México, México, UAEM. 188 P.

MENDOZA LÓPEZ, FA; GARCÍA ARAGÓN, JA; SALINAS TAPIA, H. 2015. Relación entre Erosión Media y Transporte de Sedimentos en una Cuenca de Alta Pendiente In Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología (1,

Querétaro, México), Toluca, México, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México, 8 p.

Ministerio de transportes y comunicaciones, 2008. Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje. Lima, Perú. 209 p.

MORGAN, RPC; RICKSON R.J., 1995, Slope stabilization and erosion control. A bioengineering approach. 1ª Edición, Publicado por E & F N Spon, United Kingdom, Capítulo 5, 133 – 190.

MORGAN, R. 1997. Erosión y conservación de suelo. Madrid, España, Ediciones Mundi-Prensa.343p.

NANÍA, LS. 2003. Apuntes de clase La Cuenca y Los Procesos Hidrológicos. Hidrología Superficial y Subterránea. Ingeniería Hidráulica. Universidad de Granada. Granada, España. 62 p.

NRCS (2004). - National Engineering Handbook. Part 630: Hydrology, chapter 10. National Resources Conservation Service.

NÚÑEZ J. 2001. Manejo y conservación de suelos. Costa Rica. EUNED.

ORDOÑEZ GÁLVEZ, JJ. 2011 ¿Qué es una cuenca hidrológica?: Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Lima, Perú. Sociedad geográfica de lima. 44 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia.

ORTIZ VERA, O. 2015. Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica. Tecnología y Ciencias del Agua, 6(4): 25-44

PAULET, I. M. 1974. Guía para el planeamiento del uso de las tierras agrícolas en las zonas de lluvia del Perú. Universidad Agraria La Molina. Depto. De Recursos de Agua y Tierra. Publicación N°5, 55 p.

PÉREZ DE LA CRUZ, FJ; URREA MALLEBRERA, MA. 2011. abastecimiento de agua: coagulación y floculación. Cartagena, Murcia, España. UPCT. Consultado el 03 jun. 2018. disponible en:

RAMAKRISHNA, B. 1997. Estrategia de Extensión para el Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas: Conceptos y Experiencias. San José, IICA/ GTZ.

RAMÍREZ LEÓN, JM. 2009. Producción de sedimentos en cuencas: revisión de criterios y aplicabilidad a la cuenca del río Apulco. Tesis MSc. UNAM, México. 205 P.

RAMOS TAIPE, CAYO. 2001. Modelamiento ambiental para el análisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca media y alta del río Cañete y determinación del mapa de erosión.

- RÁZURI RAMÍREZ, L.; 1984. Estructura de conservación de suelos y aguas (p. 7 – 33). Serie Riego y Drenaje, 32 (RD-32). Centro Interamericano de Desarrollo de Agua y Tierras. Mérida. Venezuela
- RIVERA TREJO, F.; GUTIÉRREZ LÓPEZ, A.; VAL SEGURA, R.; MEJÍA Z. ERMEÑO, R.; SÁNCHEZ RUIZ, P.A.; APARICIO, J; DÍAZ FLORES, L.L. La medición de sedimentos en México. IMTA, UJAT y UNESCO. 2006.
- SHIN, G. J. 1999. “The analysis of soil erosion analysis in watershed using GIS”, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Gang-won National University.
- SINGH, V.P 1992. Elementary Hydrology. Prentice Hall, 973 pp.
- TIRADO BULNES, K. 2014. Sedimentación y Colmatación en el Embalse Gallito Ciego, Distrito de Yonán - Cajamarca. Tesis Ingeniería Agrícola. Ciudad de Lambayeque, Perú, UNPRG. 214 p.
- VANONI, V.A. Sedimentation Engineering. Manuals and reports on engineering practice, No. 54. ASCE. pp. 1-15, 1977.
- VÁSQUEZ y TAPIA 2011, Cuantificación de la Erosión Hídrica Superficial en las laderas Semiáridas de la Sierra Peruana
- VÁSQUEZ VILLANUEVA, A; MEJÍA MARCACUZCO, A; FAUSTINO MANCO, J; TERÁN ADRIAZOLA, R; VÁSQUEZ ROMERO, I; DÍAZ RIMARACHIN, J; VÁSQUEZ ROMERO, C; CASTRO ABANTO, A; TAPIA MUÑOZ, M; ALCÁNTARA RAMOS J. 2016. Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas. Lima, Perú. Fondo Editorial-UNALM. 646 p.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. 1975. Hidrología Aplicada. São Paulo, Brazil. Ed. McGraw-Hill, 245p.
- VILLÓN B, M. 2011. Hidrología. Tercera Edición. Lima, Perú. Ed. Villón. 437 p.
- WILLIAMS, J. y H. BERNDT. 1977a. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Trans. ASAE. Vol. 20 (6):1100-1104.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC

LINKOGRAFÍA

<http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf>

http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm#74a

<https://es.scribd.com/doc/87838860/HIDROLOGIA>

<https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/aprueban-estandares-de-calidad-ambiental-eca-para-agua-y-e-decreto-supremo-n-004-2017-minam-1529835-2/>

<http://www.canari.org/documents/TechDocno386-Spn.pdf>

<http://es.slideshare.net/solecinha/apuntes-docentes-usle>

<http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch10.pdf>

<https://es.scribd.com/document/306180755/Coagulacion-y-floculacion-pdf>

<http://tarwi.lamolina.edu.pe/~cramost/MODELO%20DE%20EROSION%20HIDROLOGICA%20-%20SIG.pdf>

https://ponce.sdsu.edu/períodos_de_retorno_articulo.html

<http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/12-051.htm#t3b>

<http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1119&context=biosysengfacpub>

OTROS

Apuntes de clase de Hidrología Estadística: Distribuciones probabilísticas en hidrología.

Apuntes de clase de Mecánica de Suelos: Distribución de tamaños de las partículas en el agua.

CICA Ingenieros Consultores, 2013.resumen ejecutivo del EIA: Modificación del Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Tantahuatay – Ciénaga Norte hasta la ampliación de 30000 TMD.

Determinar las texturas del suelo de manera visual FAO

ECAS: Decreto Supremo N° 004-2017 MINAM – Perú

Knight Piésold Consultores S.A. 2008. Resumen ejecutivo del EIA Proyecto Tantahuatay Estudio de Impacto Ambiental.

VII. ANEXOS

ANEXO 1: DATOS DE PRECIPITACIÓN DE LAS ESTACIONES DE LA ZONA DE ESTUDIO.	173
ANEXO 2: DATOS DE PRECIPITACIÓN DE LAS ESTACIONES AUXILIARES.	174
ANEXO 3: MAPA DE UBICACIÓN DE LA TOMA DE MUESTRAS DE SEDIMENTO.	179
ANEXO 4: PLANO GENERAL.....	180
ANEXO 5: PROCESO DE FILTRACIÓN.	181

Anexo 1: datos de precipitación de las estaciones de la zona de estudio.

Cuenca Río Llaucano /Estación Meteorológica del Campamento Definitivo

Este: 757670.17 m., Norte: 9255043.53m.;

Altitud: 3907 m.s.n.m.

Año	Precipitación (mm)										
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Ene	162.2	125.4	258.2	86.0	216.2	220.9	113.8	102.8	171.8	123.6	151.8
Feb	59.8	198.8	170.6	132.0	164.6	253.2	107.4	152.6	79.0	141.2	82.0
Mar	245.4	139.2	223.0	155.0	194.2	124.8	180.4	276.4	266.2	110.6	236.5
Abr	177.4	115.0	104.6	107.4	169.4	160.8	78.0	53.8	105.0	88.2	155.0
May	85.2	69.6	101.8	88.4	39.4	64.4	109.0	81.4	119.4	31.8	96.2
Jun	5.8	27.2	32.8	29.0	25.8	25.4	26.8	11.2	27.4	22.2	34.2
Jul	25.8	21.2	28.4	39.6	39.0	3.0	25.6	10.0	15.2	4.4	7.0
Ago	30.2	38.0	33.6	15.6	11.4	9.0	28.0	26.0	14.0	6.0	35.6
Sep	11.6	105.6	43.2	53.4	93.0	10.0	27.4	90.6	10.0	37.2	30.8
Oct	189.2	187.8	96.6	92.2	105.4	136.6	168.6	79.4	87.4	72.2	123.3
Nov	147.2	125.2	150.4	130.4	97.0	136.2	31.4	72.0	129.6	37.0	75.0
Dic	69.6	59.0	93.2	163.4	246.6	74.0	145.0	153.4	69.2	90.4	74.2
TOTAL	1209.4	1212.0	1336.4	1092.4	1402.0	1218.3	1041.4	1109.6	1094.2	764.8	1101.6
MAX	245.4	198.8	258.2	163.4	246.6	253.2	180.4	276.4	266.2	141.2	236.5
Prom.	100.8	101.0	111.4	91.0	116.8	101.5	86.8	92.5	91.2	63.7	91.8
desv. Est.	80.3	59.2	76.0	49.0	79.9	84.4	58.7	74.7	75.5	46.9	65.8

Estación campamento Mirador

Este: 755394.83 m.;

Norte: 9254592.09 m.;

Altitud: 3863 m.s.n.m.

Año	Precipitación (mm)				
	2013	2014	2015	2016	2017
Ene	122.2	112.2	202.6	90.1	171
Feb	115.3	148.4	213	136.4	94.9
Mar	242.2	298.4	41.2	125	257.7
Abr	78.4	50	101.6	85.8	164.6
May	108.6	89.4	91.8	27	111.8
Jun	28.6	10.8	26.6	28.2	36.2
Jul	22.2	9.6	21.6	4.2	7.8
Ago	37.4	22.4	41	6.4	51
Sep	29	107.4	9	35.2	75
Oct	181.8	103	91.6	78.8	118.2
Nov	33	100.6	156.8	35.2	88.8
Dic	170.6	137.8	56.4	118.2	75.4
TOTAL	931.8	1190	1053.2	770.5	1252.4
MAX	242.2	298.4	213	136.4	257.7
Prom.	97.4	99.2	87.8	64.2	104.4
desv. Est.	72.4	78.7	69.8	47.2	67.9

Anexo 2: Datos de precipitación de las estaciones auxiliares.

Chugur

Este: 750196.32 m.;

Norte: 9262086.58 m.;

Altitud: 2756 m.s.n.m.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1970	138.2	43.4	95.0	63.1	172.4	22.4	77.6	7.5	100.3	191.6	142.3	114.3
1971	104.6	97.3	562.8	100.2	85.1	102.1	66.7	13.5	53.8	147.5	39.9	172.5
1972	79.8	133.8	129.4	85.7	184.6	6.2	3.0	73.6	72.3	107.9	143.3	111.5
1973	157.6	124.2	216.3	329.6	43.1	94.8	53.1	92.5	105.5	159.1	102.0	81.4
1974	167.3	268.7	117.0	134.5	44.1	28.8	7.9	5.1	108.7	78.0	137.5	122.2
1975	193.5	279.6	416.0	150.8	179.8	101.6	65.9	18.1	121.6	244.9	86.1	10.2
1976	374.4	184.4	291.1	152.6	79.4	18.2	0.0	19.3	56.3	48.0	42.0	73.3
1977	294.8	169.5	99.4	190.6	82.5	15.9	13.0	5.0	39.7	144.4	256.9	126.2
1978	20.9	73.3	68.0	91.4	56.0	12.1	35.0	0.0	118.0	21.3	85.3	83.3
1979	15.7	42.6	105.6	62.1	82.7	14.3	23.0	12.4	91.1	13.2	13.5	24.1
1980	122.0	68.6	44.6	54.3	97.4	0.0	2.2	0.0	12.0	290.8	167.5	88.7
1981	75.2	186.8	119.0	94.6	78.2	120.1	23.4	49.8	3.4	383.1	88.1	93.6
1982	130.1	199.1	105.5	103.3	164.5	2.4	5.4	0.0	87.1	251.8	184.3	256.3
1983	299.7	156.9	156.8	269.9	315.8	188.5	53.2	82.6	190.0	118.1	53.5	78.3
1984	58.2	205.2	154.4	257.7	135.6	64.5	12.1	1.5	95.2	104.0	76.4	62.5
1985	113.7	76.4	131.6	81.2	105.2	73.5	134.7	13.8	12.0	179.5	130.8	42.1
1986	87.5	119.8	123.7	52.7	139.2	88.9	150.6	0.0	2.0	80.9	189.2	268.4
1987	124.2	160.9	143.5	232.9	30.6	28.0	136.4	77.2	144.9	170.5	250.5	184.9
1988	322.2	426.3	113.7	116.5	142.0	53.3	8.2	9.0	153.1	217.8	145.4	340.1
1989	497.5	549.2	700.3	724.5	183.6	77.0	10.4	22.5	63.8	105.9	6.5	13.3
1990	0.8	2.3	25.4	139.1	8.1	11.1	4.5	3.4	39.0	181.5	121.9	34.2
1991	10.6	63.7	107.2	0.0	10.5	4.4	0.0	0.0	19.1	42.4	18.1	36.6
1992	53.9	39.4	30.7	26.6	5.2	10.5	0.0	11.2	122.4	60.1	7.5	45.5
1993	78.1	148.9	366.3	409.0	298.9	12.2	52.0	46.3	265.2	348.1	148.0	201.9
1994	335.5	243.7	352.5	256.5	55.6	0.0	0.0	0.0	71.6	86.7	114.1	147.6
1995	86.8	301.5	237.3	120.6	164.0	26.3	53.8	9.2	58.2	206.4	209.2	307.7
1996	110.7	251.1	398.1	220.8	68.6	26.8	24.9	28.8	65.5	326.5	94.3	41.5
1997	86.5	219.9	117.0	144.7	71.0	65.1	0.0	13.1	66.0	93.6	207.6	276.2
1998	168.9	258.0	303.5	276.7	106.6	15.7	0.0	14.3	66.8	179.2	89.5	109.2
1999	160.3	423.6	309.0	135.8	160.1	150.9	25.5	13.8	222.7	134.2	150.7	268.2
2000	95.1	299.2	396.7	128.9	180.5	71.0	7.8	8.0	129.0	51.8	94.7	230.4
2001	203.6	177.7	423.0	122.7	215.7	10.4	11.2	4.7	137.0	140.5	166.1	264.6
2002	134.8	310.8	280.2	238.5	72.1	5.4	16.8	17.6	80.7	224.5	171.6	206.6
2003	178.7	255.8	184.8	128.4	47.7	69.8	25.2	48.9	138.6	92.7	159.0	115.9
2004	132.0	136.0	121.4	115.4	95.2	5.8	74.3	7.1	95.0	190.7	212.8	118.4
2005	109.1	257.5	455.9	59.7	36.9	11.1	11.2	5.2	55.9	303.3	115.0	177.8
2006	189.3	317.5	500.0	124.1	53.6	78.7	39.4	32.3	136.0	86.8	199.8	292.9
2007	161.2	96.2	302.2	234.6	93.4	0.6	59.1	39.6	33.0	242.6	240.3	79.5
2008	254.7	481.1	325.4	236.7	104.1	28.6	41.4	19.4	292.5	250.3	126.1	43.5
2009	354.9	198.5	436.9	164.3	157.3	76.4	33.2	15.1	66.5	171.2	212.2	173.0
2010	68.9	237.0	378.2	253.5	113.9	44.9	24.3	16.7	47.1	118.6	80.1	148.6
2011	137.3	240.3	207.8	322.9	20.5	18.2	60.4	13.1	111.8	166.3	85.4	287.5
2012	490.2	380.0	164.0	213.2	83.3	13.2	0.0	21.6	33.4	185.9	232.5	88.0
2013	183.1	160.1	347.1	139.7	223.3	5.1	20.6	64.0	18.5	276.2	56.2	191.6

Quebrada Shugar - Bambamarca

Este 781155.93 m.;

Norte: 9260036.71 m.;

Altitud: 3257 m.s.n.m.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1970	120.7	46.9	114.2	126.0	76.2	45.4	46.4	11.5	75.3	208.1	212.9	141.0
1971	117.7	101.0	288.0	114.5	106.7	66.6	17.1	8.1	43.5	188.3	129.3	118.3
1972	60.5	119.5	202.5	212.2	93.5	1.2	17.7	41.8	77.3	85.5	130.6	107.2
1973	99.5	80.1	197.9	146.3	46.2	57.3	53.2	44.3	123.6	86.5	99.9	94.6
1974	123.9	197.6	158.1	69.1	4.8	78.7	18.4	53.6	86.6	172.0	95.6	103.1
1975	122.3	189.5	322.6	165.0	147.0	106.2	20.0	47.5	65.7	94.2	101.4	15.4
1976	214.2	122.9	153.2	89.7	71.3	9.2	2.2	25.6	36.7	76.0	66.0	69.4
1977	181.9	192.4	177.3	107.2	51.8	7.7	2.9	9.4	32.8	112.6	149.1	136.9
1978	74.7	85.9	55.9	88.3	61.5	5.8	56.7	1.2	56.5	54.4	105.8	125.3
1979	76.8	99.4	268.5	98.7	44.7	2.6	34.4	48.9	78.1	20.3	58.7	54.8
1980	87.9	82.2	137.5	40.0	31.3	17.6	21.0	11.2	9.5	204.5	214.6	72.3
1981	80.7	195.0	162.6	106.5	77.7	51.8	21.4	96.9	44.5	164.7	85.9	102.0
1982	85.1	95.8	93.3	105.2	129.0	106.2	32.4	0.0	123.7	186.4	120.0	171.5
1983	214.5	37.8	207.0	125.8	49.9	29.2	23.1	26.2	62.7	82.8	100.8	161.9
1984	50.7	153.8	152.6	87.0	95.6	27.0	41.8	33.7	68.8	154.6	72.1	59.3
1985	43.6	64.6	76.9	47.1	32.7	10.7	20.7	18.7	66.1	15.5	64.2	95.9
1986	115.0	99.9	115.6	84.9	46.8	0.0	3.5	40.7	60.1	31.1	69.9	94.3
1987	57.5	115.7	65.4	106.4	15.0	14.4	82.4	0.9	50.4	77.0	126.2	85.2
1988	108.8	172.3	77.2	69.7	30.0	0.0	0.0	0.0	47.9	62.2	118.9	66.1
1989	126.9	98.5	131.2	82.6	7.9	16.0	8.7	0.0	59.5	99.6	56.6	30.8
1990	33.9	24.0	9.3	70.9	49.1	34.6	4.9	6.4	26.6	94.6	98.4	61.3
1991	76.4	67.3	54.1	109.3	17.6	7.4	21.6	0.0	36.4	31.5	55.0	120.2
1992	57.0	61.3	108.2	81.1	22.6	62.2	15.3	33.2	91.8	88.5	53.7	70.6
1993	92.3	55.7	97.5	102.0	76.4	6.5	0.0	22.6	27.2	75.8	81.6	85.1
1994	76.7	88.9	78.2	71.2	27.2	22.0	1.2	2.9	46.7	48.2	63.9	104.4
1995	60.5	43.2	77.6	25.8	61.7	28.1	26.7	0.0	22.8	93.1	88.3	150.9
1996	92.4	135.9	115.6	66.3	28.3	10.3	3.0	17.9	23.5	88.0	26.2	14.9
1997	59.6	44.8	67.7	134.9	24.0	24.6	0.0	14.9	35.2	48.5	96.8	114.5
1998	69.0	101.0	146.1	98.8	48.7	2.7	0.0	4.3	56.8	209.1	73.4	73.4
1999	136.7	284.0	60.5	40.2	82.6	104.5	8.2	5.5	90.9	27.9	145.7	124.0
2000	56.7	181.6	196.3	85.3	94.4	75.9	27.8	6.7	63.0	24.7	122.9	141.5
2001	196.0	65.3	260.5	43.0	52.9	4.5	4.6	0.3	51.2	106.3	260.5	126.7
2002	61.5	136.7	197.6	165.0	68.1	2.8	36.6	0.3	39.3	133.5	154.1	174.6
2003	136.8	152.7	107.7	125.1	49.4	41.6	1.3	41.3	79.1	94.3	115.9	106.8
2004	47.8	80.1	103.5	74.6	67.1	34.8	45.7	20.3	21.2	148.3	148.9	129.0
2005	63.5	144.9	174.5	141.2	11.0	2.9	6.1	3.5	37.1	161.6	56.8	138.9
2006	156.0	130.5	289.2	56.1	10.4	33.7	28.9	3.1	46.4	116.8	112.7	165.4
2007	189.1	55.1	187.8	149.3	29.0	2.3	23.1	38.2	37.0	121.4	151.0	71.9
2008	185.1	249.8	182.7	105.5	69.7	17.0	3.2	27.0	87.5	151.1	98.6	40.4
2009	290.6	141.7	144.1	131.7	91.1	35.1	18.7	6.0	52.2	134.4	156.2	152.6
2010	98.2	116.4	134.5	68.8	71.1	41.0	28.1	3.4	41.5	50.0	104.2	83.6
2011	73.9	63.2	225.2	137.7	51.9	17.9	19.7	8.0	80.1	70.2	91.7	189.7
2012	200.5	209.0	128.0	112.8	38.9	11.1	0.5	8.7	18.2	95.5	145.6	142.9
2013	129.2	110.1	302.8	108.7	102.0	6.9	16.9	67.3	7.6	135.0	27.3	161.6

Carachugo

Este: 765800 m.;

Norte: 9228200 m.;

Altitud: 3988 m.s.n.m.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1970	94.4	118.2	145.9	118.2	55.4	24.6	8.3	3.8	84.1	256.9	123.6	175.6
1971	165.6	199.5	280.2	118.1	20.3	56.3	25.7	19.5	57.1	151.8	59.6	263.9
1972	93.3	179.7	224	140.8	51.6	10.7	8.6	22.4	118.6	92.1	174.3	119.4
1973	184.1	183	231.6	174.5	43.4	69.9	12.9	22.1	128	93.4	218	176.2
1974	114.9	228.2	173.7	89.3	21.1	55.9	11.7	29.2	31.4	134.5	90.9	206.2
1975	102.4	237.9	166.9	106.4	84.6	26.6	13.2	19.8	28.7	74.3	91	72.3
1976	190.9	125.2	163.3	57.6	61.8	29.6	4.9	7.7	20.7	91.1	48.6	109.8
1977	177.9	219.3	172.6	81.9	58.7	12.8	11.6	5.3	67.8	130.9	207.8	193.3
1978	67.2	99.3	76.7	77.2	91.8	6.2	6.8	6.1	68.7	83.8	128	145
1979	106.1	152.4	310.1	63.8	30.5	7.9	12.4	20.8	128.3	15.2	94.7	156.2
1980	81.6	105.1	194.7	56.6	41.1	15.7	9.4	11.5	18.5	278.7	248.3	130.1
1981	98.3	263.6	206.7	83.8	48.6	9.1	14.2	16.1	10.6	212.6	33.7	162.8
1982	95.8	169.6	170.4	142.9	63.1	12.4	7	9.7	131.7	164	282.8	205.8
1983	173.7	124.4	248.6	180.3	43.5	32.2	16.1	11	98.3	174.6	75.8	100.7
1984	64.3	302.3	226.3	145.9	91.8	48	33.4	23	79.1	225.7	189.6	178
1985	60.5	120	112.1	72.2	85.4	21.6	10.2	20.3	92.9	44.7	142.5	222.7
1986	119.9	108.2	93.1	199.4	40.5	18.9	3.8	19.3	14.1	89.3	188.8	205.7
1987	213.1	194.1	160	93.2	33.8	16.9	18.5	17.2	37	72.6	257.6	130.4
1988	231.3	156.6	118.4	141.9	35.3	16.1	3.5	5	19.6	82.9	178.2	188.1
1989	167.8	215.8	120	143.8	35.8	9.2	9	12.6	54.7	168.3	25.9	49.9
1990	65.2	114.6	124.8	75.3	62.7	44.7	2.6	8.8	145.7	234.3	328.7	128.3
1991	95.5	156.2	293.3	112.6	44.2	6.2	4.2	4.6	76.6	111.2	207.5	274.7
1992	161.4	91.2	143.9	89	34.8	57.4	11.1	11.5	124.7	183.7	117.7	259
1993	148.2	180.9	258.4	173.7	37	49	1.3	3.4	60.3	133	155	274.4
1994	240.7	252.3	230.7	226.4	62.9	15	22.1	4.6	50	108	126	169.4
1995	60.5	193	199.1	165.4	89.2	2.8	45.5	6.1	32	72.6	193.5	261.1
1996	158.5	198.6	214.6	96.3	49	58.2	1.8	26.2	38.4	176.9	35.6	49
1997	116.3	136.9	62.5	83	43.4	18.8	6.9	0.8	64	148.2	179.7	134.3
1998	101	216.6	201.4	158.8	97.4	11	1	1.2	23	186.8	138.8	44.2
1999	177	352.4	169.6	79.6	94.6	134.6	23.9	11.7	200.9	110.7	188.5	281.4
2000	87.3	257.6	206.2	92.2	83	27.6	4.2	26.4	189.6	14.8	39.4	172
2001	326.8	179	309.6	104.4	61.8	8.1	18.4	2.8	73.8	121.2	245.8	213.9
2002	63.2	150	306.4	214.2	38.4	13.8	16.4	0.8	43.2	195.2	150	246.2
2003	135.2	102.4	209.6	87.8	135.2	0.2	0	0	59.6	109.2	240.4	186.3
2004	99.3	94.2	232.9	119.6	60.9	5.8	0.3	8.6	93.2	156.1	333.2	336.3
2005	186.7	201.7	394.7	199.1	66.8	19.3	13.7	10.9	48	279.4	77.5	233.4
2006	105.2	258.3	327.1	157.2	13	58.4	11.7	3.5	34.3	130.8	190.3	339.9
2007	147.1	78	244.3	195.6	71.1	3.3	23.6	32.8	27.4	274.3	252.7	147.3
2008	149.7	265.2	207.9	142.0	56.2	50.8	10.4	18.9	102.9	196.4	154.3	105.6
2009	296.3	171.4	253.1	166.8	101.1	57.0	21.1	13.9	37.9	194.1	230.7	226.2
2010	85.8	176.9	263.5	143.0	66.4	26.7	18.4	8.4	23.6	96.9	155.4	211.7
2011	88.3	116.9	172.7	170.9	31.3	19.5	18.3	6.9	62.6	82.8	114.6	263.0
2012	285.0	274.9	166.4	121.7	54.7	9.8	0.2	11.8	27.7	169.4	225.8	73.7
2013	83.0	173.7	236.6	107.4	117.7	22.0	13.8	20.5	17.5	178.9	54.3	192.4

Maqui-Maqui

Este: 780019 m.;

Norte: 9228957 m.;

Altitud: 4024 m.s.n.m.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1970	109.6	103.5	154.6	84.5	63.4	24	12.9	6.6	40.8	233.2	104	114.3
1971	129.2	189.9	311.1	97.9	76.4	48.7	29.9	20.1	41.6	124.9	78.4	223.9
1972	102.5	153.9	200.9	92.7	36.9	14.1	2.9	18.3	71.9	63.8	146	111.1
1973	150	144.9	213	155.3	43.6	40.6	11.4	22	108.9	65.4	149.5	185.2
1974	77.9	196.5	154.9	115.2	34.3	32.8	13.1	28.2	36.4	107.2	91.2	172.7
1975	95	189.4	135.8	121.8	43.3	12.9	5	20.1	17.9	74.2	113.1	79
1976	155.8	130.2	150.8	78.7	66.2	21.9	7.1	9.4	15.4	62.8	64.1	107
1977	155.2	155.7	146.7	71.5	36.5	13.2	11.7	6	56.4	109.3	173.8	172.3
1978	59	88.4	84.3	71.4	54.7	11.4	16.7	7	49.5	55.4	151.2	126.2
1979	106.5	157.4	244.7	101.3	52.1	11.4	20.3	18.3	91.6	33.4	86.7	159.9
1980	69.9	79	162.1	51.8	66.5	5.7	4.4	13.2	22	284.9	197	106.9
1981	93.9	224.6	155.5	98.8	44.8	3.4	4.1	18	17.2	197.1	54.2	137.7
1982	108.3	152.7	133.7	128.7	36.2	19.7	10.7	11.4	105.6	137.4	212.4	164.6
1983	161.3	104	194.2	148.8	42.1	19.7	13.1	12.5	76.9	151.8	107	116.1
1984	88.9	278.3	157.2	106.3	50.1	31.2	7.4	23.4	45.1	199.7	169.9	187.2
1985	51.6	88.7	101.6	56.5	76.3	31.1	18.1	21	67.2	43.9	87.5	163.4
1986	90.8	102.8	127.3	133.4	79.9	18.5	7.2	19.6	15	89.1	130	156.3
1987	179.6	139.8	138.4	72	47	11.7	13.9	18.1	53.3	66.3	146.2	127.5
1988	145.3	159.5	132.4	113.6	21.7	9.4	6.2	7.3	28.4	87.1	138.3	184.2
1989	113.9	188.2	131.7	127.1	20.1	11.1	5.3	16.6	49.8	141.5	88.4	53.3
1990	65.1	111.7	128.5	64.9	24.1	28.7	10.2	10.9	100.2	210.1	178.4	140.6
1991	63.6	135.1	267.3	93.9	105.3	13.5	2.3	9.4	69.6	82.3	135.7	210.3
1992	124.7	92.5	149.3	82.5	38.3	56.8	5.9	16.9	99.5	186.3	95.8	200.3
1993	105.8	162	220.8	111.8	37.4	18	11.3	5.1	70.7	109.1	115	244.4
1994	160.7	224.6	173.5	152.8	137.5	23	8.6	6.3	80.5	98.2	135.7	167.7
1995	20.6	145	154.6	84.5	72.5	14.2	3.9	3.6	22.2	70.4	156.2	168.9
1996	79	155.2	184.9	97.8	55.1	22.9	2.8	10.4	29.1	146.3	55.4	83.3
1997	94.2	125.2	74.9	63.5	25.1	9.4	6.1	2.3	25.9	89.7	136.4	118.6
1998	57.4	192.5	161	119.4	93.4	5.8	0.4	1.6	18	155.4	160.8	47.4
1999	162.4	315.2	137.4	69.6	101.4	93.2	17	7.2	123.6	58	110.2	238
2000	86.4	226.2	196.2	97.6	68.4	26.4	5	35.8	136.4	9.6	55.2	147.8
2001	243.2	148.8	257.4	99.6	65.4	6.8	12.8	3.4	72	124.6	170.4	193.6
2002	53	106.6	193	168.6	35.2	15.8	18.4	3.3	40.8	195.6	134	207.2
2003	92.4	101.6	113.8	25.6	9.4	13.2	4.4	4.4	13.4	18	22.4	118.7
2004	95.7	67.1	110	71.5	21.6	7.4	22.1	8.7	55.6	115.6	187	203
2005	116.3	140.2	325.7	122.9	30.5	17.5	11.4	17.8	36.8	292.4	73.9	229.4
2006	91.4	257.3	270.8	122.4	21.6	58.7	9.7	22.6	33	140	168.9	276.6
2007	120.1	72.4	236.2	137.4	67.3	6.3	51	37.1	33.2	234	194.8	108.2
2008	138.2	250.9	167.9	102.9	73.1	29.0	14.0	41.1	90.2	154.2	134.6	124.9
2009	263.7	173.7	256.3	198.4	134.6	74.4	24.9	38.3	44.9	181.6	200.4	170.1
2010	74.7	147.6	241.3	113.3	109.7	22.1	16.8	4.8	27.7	119.6	267.7	221.7
2011	118.6	161.0	251.0	218.9	28.9	13.2	8.9	6.6	74.6	73.1	149.3	191.8
2012	367.5	295.9	134.4	116.8	50.8	7.9	0.0	10.7	3.8	217.9	311.4	71.6
2013	96.8	144.0	172.7	76.5	162.6	9.9	26.7	43.9	12.2	149.1	80.0	161.0

La Llica

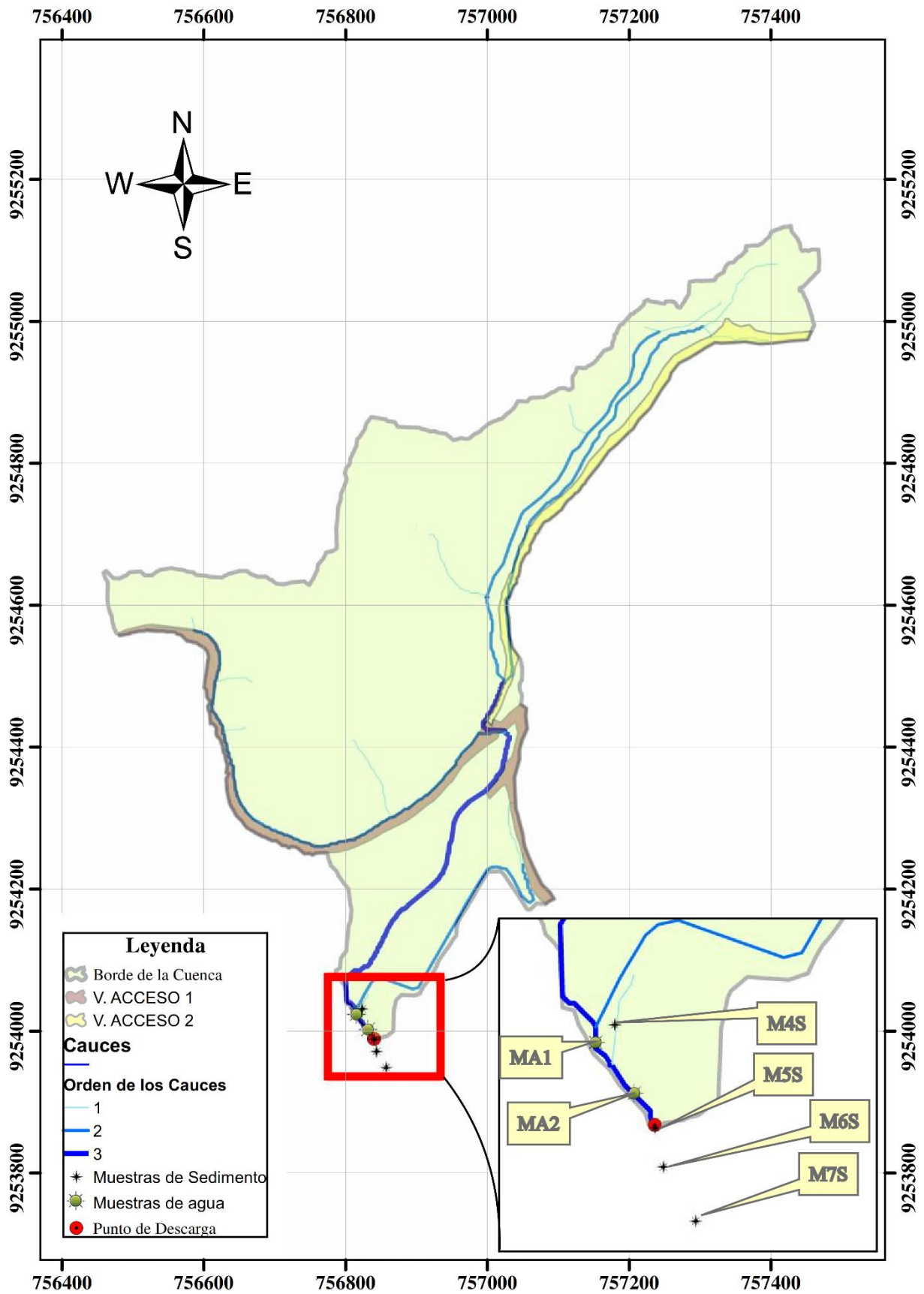
Este: 7744954 m.;

Norte: 9249499.82 m.;

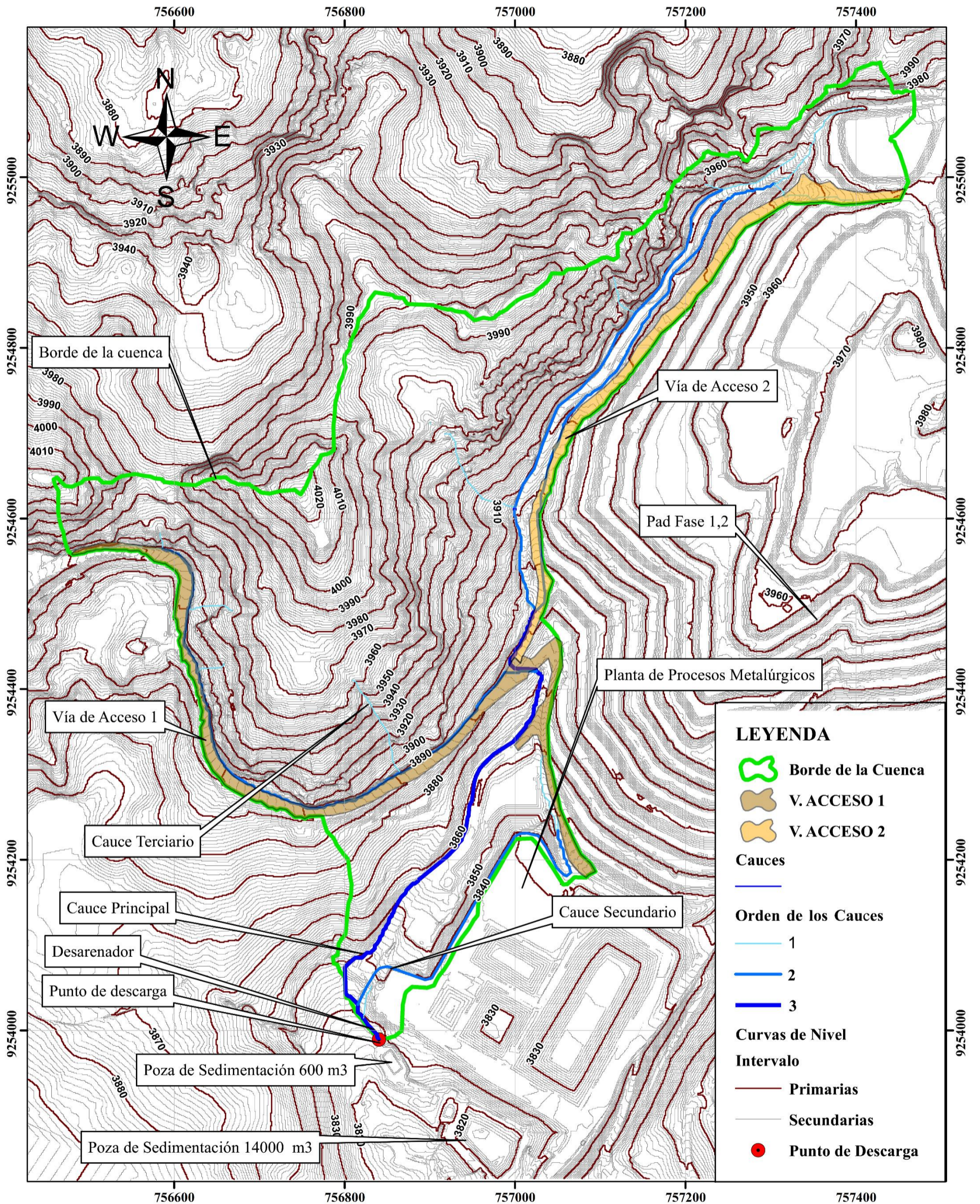
Altitud: 2625 m.s.n.m.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1970	109.9	74.5	118.4	99.1	48.8	33.9	6.2	3.6	54.0	101.0	81.4	92.3
1971	86.0	112.1	276.9	92.7	26.0	18.1	29.8	23.9	55.6	88.0	97.5	128.4
1972	73.0	88.2	131.2	106.4	39.6	12.6	5.1	6.7	61.6	46.1	83.1	121.0
1973	137.2	90.1	103.9	129.2	53.8	43.6	10.8	7.9	94.2	84.4	93.2	91.2
1974	79.1	154.1	100.9	88.6	43.6	38.3	11.8	54.0	67.0	52.6	63.5	109.2
1975	90.9	158.5	201.8	93.2	39.4	19.9	15.4	29.8	71.6	63.3	58.8	39.5
1976	123.8	85.1	100.2	65.2	44.1	49.5	3.5	12.0	37.6	58.7	66.6	70.0
1977	138.8	171.9	146.7	78.7	33.7	15.5	7.0	8.6	45.9	97.6	69.9	88.1
1978	30.0	38.0	66.6	81.4	29.1	10.3	10.8	11.6	60.1	62.3	86.6	104.4
1979	80.4	96.3	163.0	81.2	28.2	8.5	12.4	34.7	88.6	26.1	35.3	70.8
1980	54.1	59.6	80.0	70.6	35.8	26.1	6.3	16.2	54.5	134.2	141.1	90.0
1981	105.2	200.6	132.6	68.9	23.6	14.6	6.8	40.5	45.2	123.5	140.9	89.9
1982	97.4	112.2	114.8	112.5	33.7	18.2	1.8	3.6	68.5	98.8	107.0	112.3
1983	126.3	55.4	152.4	108.6	29.2	10.8	14.0	9.3	30.6	78.8	111.6	161.8
1984	49.8	228.7	150.0	129.1	49.8	27.3	18.0	60.6	30.5	82.1	40.7	40.4
1985	42.9	67.5	70.6	69.5	42.2	21.1	2.5	35.8	45.0	75.3	63.4	87.4
1986	99.4	108.5	100.6	144.1	82.2	1.5	0.0	48.1	56.6	78.5	85.9	150.1
1987	145.8	82.5	85.2	111.3	27.2	18.0	38.6	31.0	71.6	81.0	119.4	50.3
1988	126.4	119.8	86.3	92.3	6.3	36.9	0.0	5.0	58.5	56.8	132.8	63.6
1989	187.9	103.2	169.0	131.2	10.0	37.4	11.0	11.3	62.2	88.9	67.0	12.0
1990	59.2	85.5	54.8	82.1	59.5	59.1	2.0	10.0	46.3	118.5	121.9	40.4
1991	48.0	90.4	150.9	71.5	30.0	18.7	12.3	0.0	45.5	32.0	39.8	66.2
1992	54.0	35.9	54.0	72.8	23.5	35.0	11.5	12.6	84.0	111.9	64.5	68.4
1993	98.3	172.4	238.2	128.8	67.7	11.5	5.9	20.5	81.6	114.9	71.4	174.7
1994	110.4	109.3	247.3	145.3	29.6	16.0	0.7	0.0	52.7	75.8	123.6	125.9
1995	32.5	93.2	92.0	95.9	79.2	11.0	11.0	2.0	73.3	114.2	87.4	137.9
1996	75.7	181.5	174.5	83.6	50.7	9.8	15.4	24.6	50.3	189.1	45.5	27.7
1997	49.5	138.8	57.0	99.3	40.5	38.4	0.8	1.0	44.2	68.0	96.3	134.4
1998	81.6	130.9	228.9	165.9	63.5	10.3	0.0	0.4	32.3	142.3	108.9	75.4
1999	120.5	218.5	84.5	84.7	39.7	39.2	18.8	4.3	75.7	74.4	75.2	126.2
2000	64.9	150.9	122.8	100.9	44.1	30.1	10.2	41.4	71.6	61.4	88.0	119.0
2001	212.0	106.3	212.6	102.9	30.3	17.2	15.8	3.6	51.6	73.8	125.5	130.4
2002	42.7	74.0	142.0	120.3	31.0	28.6	12.9	13.4	56.9	90.8	100.5	164.4
2003	85.7	64.9	113.5	76.4	35.1	46.6	5.0	19.7	48.2	58.4	99.9	104.1
2004	86.1	97.4	140.5	89.0	69.5	21.1	11.0	11.8	48.0	98.6	72.4	158.6
2005	98.2	87.8	140.2	99.7	53.6	21.1	8.6	13.4	39.2	77.7	63.7	131.0
2006	94.5	91.6	188.7	102.7	58.2	30.0	7.1	17.6	52.1	61.3	91.0	140.8
2007	137.6	85.3	183.2	139.4	39.7	11.4	8.7	8.3	48.1	87.6	79.4	122.1
2008	104.3	165.5	137.5	118.6	39.6	45.2	8.6	28.0	82.0	119.2	84.9	56.2
2009	206.4	107.0	167.4	139.3	71.2	50.8	17.5	20.7	30.2	117.8	126.9	120.4
2010	59.7	110.4	174.3	119.5	46.7	23.8	15.3	12.5	18.8	58.8	85.5	112.7
2011	61.5	72.9	114.2	142.8	22.0	17.4	15.2	10.3	49.8	50.2	63.1	140.0
2012	198.5	171.6	110.1	101.7	38.6	8.7	0.2	17.5	22.0	102.8	124.3	39.2
2013	57.8	108.4	156.5	89.7	82.9	19.6	11.5	30.5	14.0	108.6	29.9	102.4

Anexo 3: Mapa de ubicación de la toma de muestras de sedimento.

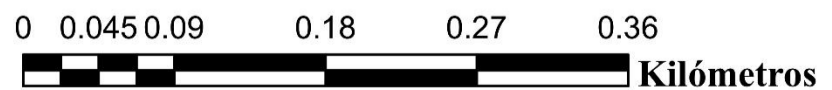


PLANO GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO



Esc. 1:4,500

Proyección UTM - PSAD56



Anexo 5: Proceso de filtración.

