UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA EN MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE

DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS VULNERABLES A EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CATAMAYO POR MEDIO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Tesis de grado previa a la obtención de título de Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente

AUTORES: Maira del Cisne Bustamante Morocho

José Luis Álvarez Bustamante

DIRECTOR: Ing. Aníbal González Mg. Sc.

Loja, Ecuador

2011

Loja, 19 de octubre de 2011

Ing. Aníbal González, Mg. Sc.

CATEDRÁTICO DEL ÁREA AGROPECUARIA Y DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

CERTIFICO.

Que el trabajo de investigación titulado **"DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS VULNERABLES A EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CATAMAYO POR MEDIO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA"**, de autoría de los señores egresados de la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente MAIRA DEL CISNE BUSTAMANTE MOROCHO y JOSÉ LUIS ÁLVAREZ BUSTAMANTE, ha sido dirigida, revisada en su integridad, por lo que autorizo su presentación y publicación.

Atentamente,

Ing. Aníbal González, Mg. Sc.
DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICACIÓN:

Los que al pie firmamos, Miembros del Tribunal de Grado, CERTIFICAMOS que, los señores MAIRA DEL CISNE BUSTAMANTE MOROCHO y JOSÉ LUIS ÁLVAREZ BUSTAMANTE, egresados de la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, han incorporado todas las correcciones y recomendaciones en su tesis titulada **"DETERMINACIÓN DE LAS ZONAS VULNERABLES A EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CATAMAYO POR MEDIO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA"**, por lo tanto autorizamos su publicación, difusión y pueden continuar con los trámites de graduación.

Loja, 10 de noviembre de 2011

Atentamente,

Ing. Jorge García Luzuriaga
PRESIDENTE

Ing. Hugo Sáenz Figueroa
VOCAL

Ing. Magaly Castillo Sánchez
VOCAL

AUTORÍA

Las ideas y conceptos expuestos en el presente informe de investigación, así como los resultados, conclusiones y discusión son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Maira del Cisne Bustamante Morocho *José Luis Álvarez Bustamante*

DEDICATORIA

Es un poco difícil realizar una dedicatoria, pues es mucha gente la que ha ayudado para que pueda llegar a este punto de mi trayectoria universitaria, sin embargo esta Tesis va en especial dedicación a, Dios, que me ha encaminado varias metas, y las estoy cumpliendo en este espacio de tiempo y por la ayuda espiritual que siempre me brinda.

A mis padres, Marianita y Medardo por su amor, comprensión y por apoyar sin restricciones a su hija.

A mis hermanas Nela, Toty y Anali quienes contribuyen día a día a esforzarme por ser mejor persona.

A Toño por ser mi compañero, mi soporte diario para llenar estas páginas que marcan el fin de una etapa y el comienzo de otra.

Finalmente a mi hija, Ana Paula, que con sus ojitos y cariño me dan la fuerza necesaria para estar de pie y con la cabeza en alto para enfrentar cualquier situación por difícil que sea.

Maira del Cisne

Cada etapa que logre en mi vida las dedico a todos quienes han formado parte de mi vida y han permitido que logre lo que me he propuesto, a Dios por ser mi fortaleza, a mi querida abuelita Manuela Jumbo por su amor, confianza y apoyo incondicional, a mis padres Carmita y José les agradezco por todo, a mis hermanos María, Estefanía, Marco, Patricio, y a mi sobrina Isabella que es el todo para mí.

José Luis

AGRADECIMIENTO

Dejamos constancia de nuestro profundo agradecimiento a todos quienes de una u otra manera contribuyeron durante el desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación.

Especialmente al Ing. Aníbal Eduardo González González, director del presente trabajo de investigación por su apoyo constante, a la Dra. Emmanuelle Quentin Joret, Coordinadora del CENTRO IDRISI-ECUADOR y Dr. Héctor Martínez, por compartir comentarios, ideas, consejos y literatura especializada, además de su orientación durante el desarrollo de la investigación.

Nuestra inmensa gratitud a la Universidad Nacional de Loja; al Centro Integrado de Geomática Ambiental "CINFA" por el respaldo técnico brindado y todo el personal que en él laboran, especialmente a la Lic., María del Cisne Torres Ochoa, por su amistad y amabilidad.

A los Ingenieros: María Fernanda González, José Guido Merino y Fabián Reyes Bueno por su ayuda constante, aportaciones y observaciones que han ayudado a complementar y mejorar el presente trabajo.

Finalmente agradecemos a la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente en las personas del Sr. Polivio Salazar y Lic. Glorita Vivanco, pues durante nuestros años de estudio hicieron agradable nuestra estancia, al personal docente, familiares, y a ciertos compañeros y amigos de aula.

"*Una buena educación técnica produce profesionales que se distinguen por su capacidad, deseo de superación, calidad ética y otras buenas cualidades. En cambio una mala educación, les conserva ignorantes y les vuelve holgazanes, mediocres y poco útiles a la sociedad. Los profesores tienen la oportunidad de contribuir en cualquiera de estas dos opciones"* (Campos, 1998).

Los Autores

ÍNDICE

1. RESUME…….…. 1
2. INTRODUCCIÓN 6
3. REVISIÓN DE LITERATURA 6
3.1. CUENCA…… 9
3.1.1. Cuenca Hidrológica…… 9
3.1.2. Componentes de una Cuenca…….……. 9
3.1.2.1. Factores físicos…… 10
3.1.2.2. Factores biológico…….. 10
3.1.2.3. Factores humanos…….. 10
3.1.2.4. Factores Ambientales……. 10
3.1.3. Límites de la cuenca…… 11
3.1.4. Tamaño de la cuenca…… 11
3.1.5. Parámetros morfométricos…… 12
3.1.5.1. Área de una cuenca…… 12
3.1.5.2. Perímetro……. 12
3.1.5.3. Factor de forma…… 12
3.1.5.4. Factor de elongación……. 12
3.1.5.5. Pendiente de la cuenca…….. 12
3.1.5.6. Elevación media de la cuenca…….. 12
3.1.5.7. Curva hipsométrica……. 12
3.1.5.8. Longitud, perfil y pendiente del cauce…… 12
3.2. EROSIÓN…….. 12
3.2.1. Tipos de erosión…….. 12
3.2.1.1. Erosión geológica natural…….. 12
3.2.1.2. Erosión acelerada o antrópica…….. 12
3.2.2. Erosión Hídrica…… 15
3.2.3. Erosión Hídrica Pluvial……... 16
3.2.3.1. Erosión por salpicadura……..... 16
3.2.3.2. Erosión laminar……... 17
3.2.3.3. Erosión en surcos…… 17
3.2.3.4. Erosión en cárcavas…… 17

3.3. COSTO ECONÓMICOS DERIVADOS DE LAS PÉRDIDAS DEL SUELO… 18
3.4. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO……. 18
3.5. MÉTODOS INDIRECTOS…….. 20
3.5.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)……. 21
3.5.2. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo RUSLE (USLE revisada).. 23
3.6. SEDIMENTACIÓN……... 23
3.6.1. Sedimentación Fluvial…… 24
3.6.2. Sedimentación Ocasionada por los Ríos…… 25
3.6.3. Sedimentación Eólica…… 25
3.7. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA…… 25
3.7.1. Funcionamiento de un SIG…… 26
3.7.2. Técnicas Utilizadas…… 27
3.7.3. Representación de los Datos…… 27
3.7.4. Idrisi Taiga…… 29
3.7.4.1. Módulo RUSLE…….. 30
3.7.4.2. Módulo SEDIMENTATION…….. 31
4. MATERIALES Y MÉTODOS…… 32
4.1. MATERIALES……... 32
4.2. SISTEMA HIDROGRÁFICO…….. 33
4.2.1. Ubicación Geográfica…… 33
4.2.2. Ubicación Política…… 33
4.2.3. Ubicación Ecológica……... 35
4.2.4. Análisis Climático…… 35
4.3. MÉTODOS…… 36
4.3.1. Metodología para: “Elaborar una Base de Datos Digitales con la Información Biofísica Existente. Validar e Investigar Nueva Información Relacionada con el Tema de Estudio”……. 36
4.3.1.1. Elaboración de la línea base……... 36
4.3.1.2. Generación y validación de información temática…….. 36
4.3.1.3. Delimitación de la cuenca…… 38
4.3.1.4. Parámetros morfométricos…….. 39

4.3.2. Metodología para: “Analizar la modelación espacial de la erosión de la cuenca con base en los módulos RUSLE y SEDIMENTATION del paquete de SIG IDRISI TAIGA”……. 40
4.3.2.1. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)…… 41
4.3.2.2. Factores requeridos en la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (RUSLE)……. 41
a. Generación del factor de erodabilidad del suelo (K)……. 42
b. Generación del factor de precipitación y escorrentía (R)……. 44
c. Generación del factor de cobertura del suelo (C)…….. 48
d. Generación de factor de protección de prácticas agrícolas (P) 49
e. Generación de parámetros numéricos…….. 50
4.3.2.3. Factores Requeridos por el Módulo de SEDIMENTATION…… 51
a. Determinación del factor de entrega de sedimentos (SDR)… 54
3.3.3 Metodología para: “Constatar los resultados obtenidos del módulo RUSLE y SEDIMENTATION en SIG en el campo”……... 54
3.3.4 Metodología para: “Proponer alternativas adecuadas de manejo y uso del suelo mediante el paquete de SIG IDRISI”…… 56
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN…… 59
5.1. ELABORACIÓN DE UNA BASE DE DATOS DIGITALES CON LA INFORMACIÓN BIOFÍSICA EXISTENTE. VALIDAR E INVESTIGAR NUEVA INFORMACIÓN CON EL TEMA DE ESTUDIO……..... 59
5.1.1. Características Morfométricas de la Cuenca Alta del Río Catamayo…. 59
5.2. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN POTENCIAL (CRUDA Y NETA) DE LA CUENCA CON BASE EN LOS MÓDULOS RUSLE Y SEDIMENTATION DEL PAQUETE DE SIG IDRISI TAIGA…… 63
5.2.1. Factores RUSLE……. 63
5.2.1.1. Factor K…….. 63
5.2.1.2. Factor R…….. 64

5.2.1.3. Factor C…….. 66
5.2.1.4. Factor P…….. 68
5.2.2. Parámetros Numéricos de RUSLE…….. 68
5.2.3. Estimación Potencial de la Erosión Hídrica de la Cuenca Alta del Río Catamayo…….. 68
5.2.4. Sedimentación y Entrega de Sedimentos…….. 72
5.2.4.1. Parámetro numérico coeficiente de entrega de sedimentos (SDR)…….…... 72
5.2.4.2. Sedimentación y pérdida total del suelo de la cuenca…… 72
5.3. COMPARARCIÖN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO RUSLE Y SEDIMENTATION EN SIG EN CAMPO……..…….. 75
5.3.1. Observación en Campo……. 75
5.4. ALTERNATIVAS ADECUADAS DE MANEJO Y USO DEL SUELO MEDIANTE SIMULACIONES EN EL PAQUETE DE SIG IDRISI……...……...….. 86
5.4.1. Alternativas adecuadas para la disminución de la erosión hídrica en la Cuenca Alta del Río Catamayo…… 86
5.4.2. Estimación potencial de la erosión hídrica de la Cuenca Alta del Río Catamayo…… 90
6. CONCLUSIONES…….. 93
7. RECOMENDACIONES……. 95
8. BIBLIOGRAFÍA…….. 97
9. ANEXOS…….. 103

INDICE DE FIGURAS

Figura	Nombre	Pág.
1	Vector y raster……	28
2	Base de datos espaciales y de atributos……	29
3	Parroquias presentes en la Cuenca Alta del Río Catamayo……	31
4	Sistema hidrográfico de la provincia de Loja……	32
5	Esquema de localización del área de estudio……	33
6	Esquema para delimitar la zona de estudio, Cuenca Alta del Río Catamayo……	37
7	Esquema para obtener parámetros morfométricos, Cuenca Alta del Río Catamayo……	38
8	Método de implementación para la estimación de la erosión y sedimentación……	39
9	Parámetros requeridos por RUSLE……	41
10	Imágenes de edafología de la Cuenca Alta del Río Catamayo (PRONAREG, 2005)…….	42
11	Distribución espacial de las estaciones climáticas de la zona de estudio……..	45
12	Imagen superficial de la precipitación de la zona de estudio……..	46
13	Imágenes de cobertura del suelo de la Cuenca Alta del Río Catamayo (PRONAREG, 2005)…….	47
14	Esquema utilizado en Macromodelo para determinar los parámetros de exposición y pendiente……	50
15	Parámetros requeridos por el módulo SEDIMENTATION……	51
16	Imágenes de entrada requerida por el módulo de SEDIMENTATION…	52
17	Imagen del MNA, límite de cuenca, río principal y punto de interés de la Cuenca Alta del Río Catamayo……..	59
18	Curva hipsométrica de la Cuenca Alta del Río Catamayo…….	60
19	Perfil de cauce principal de la Cuenca Alta del Río Catamayo…….	60
20	Imagen del factor K de la Cuenca Alta del Río Catamayo……	62
21	Imagen del factor R de la Cuenca Alta del Río Catamayo……	63
22	Imagen del factor C de la Cuenca Alta del Río Catamayo……	65

23 Imagen del factor P de la Cuenca Alta del Río Catamayo…… 66
24 Estimación de pérdida de suelo de la Cuenca Alta del Río Catamayo… 68
25 Pérdida de suelo por división de la cuenca (microcuencas)……. 70
26 Producción de sedimentos a nivel de cuenca en la Cuenca Alta del Río Catamayo…… 71
27 Acumulación de la producción de pérdida de suelo anual neta en los cauces de la cuenca…….. 73
28 Vista panorámica del sector Ventanas…… 74
29 Perfil del suelo…… 74
30 Cultivos de maíz y caña de azúcar…… 75
31 Medición de la profundidad del suelo…… 75
32 Terreno en etapa de preparación (arado)…….. 75
33 Vegetación xerofita característica del sector…… 76
34 Pendientes con escaza cobertura vegetal…… 76
35 Materiales empleados en medición de profundidad…… 76
36 Vegetación xerofita representativa…….. 77
37 Perfil del suelo…… 77
38 Pendiente sin cobertura vegetal…….. 77
39 Presencia de erosión hídrica……... 78
40 Medición de la profundidad del suelo…… 78
41 Suelo con escaza cobertura vegetal…….. 78
42 Parte Alta de la Cuenca Alta del Río Catamayo……... 79
43 Bosque nublado presente en el área de estudio……. 79
44 Medición de la profundidad del suelo en la parte alta de la cuenca……. 79
45 Cultivos relevantes de la zona…… 80
46 Medición de la profundidad del suelo…… 80
47 Perfil de suelo…… 80
48 Puntos GPS de los lugares visitados en campo…… 81
49 Perdidas de suelo por división de la cuenca con los factores C y P modificados……..…. 87
50 Tipos de terrazas a implementarse en la Cuenca Alta del Río Catamayo……... 88

51 Producción y entrega de sedimentos a nivel de la cuenca con los factores C y P modificados…….. 90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Nombre	Pág.
1	Requerimiento, información secundaria e información procesada, que se necesita y obtendrá en el módulo RUSLE y SEDIMENTATION…….	36
2	Textura, materia orgánica, estructura granular y permeabilidad prevalecientes en los suelos de la Cuenca Alta del Río Catamayo, 2005	42
3	Estaciones meteorológicas, precipitaciones medias y promedio total que influyen en la Cuenca Alta del Río Catamayo…….	44
4	Valores del factor C en base a l tipo de cobertura de suelo……..	48
5	Prácticas de conservación del suelo (USDA. 2005)……..	49
6	Puntos GPS para comprobación en campo……	54
7	Valores del factor C, modificados en base al tipo de cobertura……	56
8	Valores de práctica de conservación del suelo modificado (USDA, 2005)	56
9	Características morfométricas de la Cuenca Alta del Río Catamayo…….	58
10	Comparación de resultados de pérdida de suelo de la Cuenca La Gavía con la Cuenca Alta del Río Catamayo…….	69
11	Otras investigaciones realizadas en cuencas hidrográficas, sobre pérdida de suelo, mediante simulación en SIG…….	69
12	Diferencia de Sedimentación y pérdida total del suelo en la Cuenca Alta del Río Catamayo……	72
13	Imágenes verificación en campo, Cuenca Alta del Río Catamayo……	74
14	Verificación y comparación de los sitios (testigos) vulnerables a erosión hídrica simulados con SIG e identificados en campo…….....	83
15	Diferencia de estimación de la erosión hídrica en la Cuenca Alta del Río Catamayo……..	85
16	Diferencia de estimación de la producción de sedimentos en la Cuenca Alta del Río Catamayo, ton/año……	91

1. RESUMEN

La presente investigación denominada “Determinación de las Zonas Vulnerables a Erosión Hídrica en la Cuenca alta del Río Catamayo por Medio de Sistemas de Información Geográfica” se realizó en la parte alta de la Cuenca Catamayo, perteneciente a la provincia de Loja, dentro de los cantones Catamayo y Loja, abarca una superficie territorial de 1 318.7 km^2. Dicho estudio se realizó con el propósito de simular en SIG (Sistemas de Información Geográfica), la pérdida y arrastre de suelo ocasionado por factores naturales y antrópicos.

Para la presente investigación se procedió a la recolección de antecedentes necesarios de algunos estudios realizados en la provincia de Loja, y de archivos existentes en la base de datos digitales del Centro Integrado de Geomática Ambiental (CINFA) y del Centro de Recursos Idrisi-Ecuador, de la Universidad Nacional de Loja, determinando parámetros morfométricos, límites políticos, geográficos, poblados, sistemas de drenaje y características topográficas de la zona, se validò la información obtenida y se procede a generar nueva información.

Mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) compuesta de seis factores (variables) e incorporada en el SIG IDRISI edición TAIGA, se procediò a estimar la erosión potencial cruda y neta.

Para la ejecución de los módulos RUSLE y SEDIMENTATION se estableció cada uno de los factores requeridos por la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE).

Los factores K (erodabilidad del suelo) y C, de cobertura de suelo, se determinó mediante información existe en la base de datos del CINFA y Laboratorio de Suelos Agua y Bromatología de la Universidad Nacional de Loja; para el factor K se aplicó la ecuación matemática establecida por Wischmeier y Smith en 1978, que permitió adaptar la información de análisis de suelo, y el factor C que se obtuvo mediante reclasificación de valores establecidos por la FAO (1985).

Para obtener el factor R (erosividad de la lluvia) fue necesario la recopilación de información de precipitación de un rango de 15 años, de estaciones meteorológicas ubicadas dentro y fuera de la zona de estudio, se calcula las precipitaciones medias y se aplica la ecuación establecida por Renard y Freimud en 1994 debido a que el promedio de los valores medios sobrepasa los 850 mm. El factor P se determinó de acuerdo a parámetros establecidos por la USDA, (2005), y finalmente los factores L y S se obtuvieron del MNA (Modelo Numerico de Altitud), información de imágenes de entrada y ecuaciones matemáticas.

La imagen de zonas vulnerables a erosión hídrica (pérdida de suelo por división de la cuenca) permitió identificar en imagen los lugares potencialmente vulnerables y que aportan sedimentos en la cuenca; se procedió a identificar en campo los sitios previamente establecidos en consenso con el director de tesis y asesor. El valor de pérdida de suelo en la zona de estudio fue de 295.21 ton/ha año que al ser comparado con otros estudios se determinó como erosión fuerte. Los sitios visitados concuerdan con la información de SIG, se identificaron sectores con escaza cobertura vegetal, agricultura en lugares con pendientes mayores al 45 % y presencia de cárcavas. En la zona de estudio se establece un sitio que no consta en la imagen de SIG, esto se debe a que la información de entrada se encuentra desactualizada.

Las alternativas propuestas en SIG para un manejo y uso adecuado del suelo, fueron basadas en la modificación de los factores C y P, encaminadas a la disminución de la erosión hídrica en la zona de estudio, se simuló el cambió de cobertura vegetal (factor C) y se agregó valores de factor P que se utiliza para prácticas de conservación agrícola, en las zonas identificadas como vulnerables a erosión hídrica.

Al ejecutar del módulo RUSLE, con los factores de C y P modificados con el fin de lograr sostenibilidad, se obtuvo un valor de 53.43 ton/ha, identificado como erosión fuerte, a diferencia del valor inicial de 295.21 ton/ha año, el proceso erosivo se reduce en 82 %.

Se concluyó que la aplicación del programa de SIG IDRISI edición TAIGA mediante la ejecución de los módulos: Gestión Integrada del Agua, Rusle (Ecuación Universal de la Perdida de Suelo Revisada) y Sedimentación permitió conocer un enfoque rápido del estado actual de un territorio, facilitando y optimizando tiempo y recursos económicos.

Se debe poner énfasis en estas dos variables pues si existe cobertura natural, y agricultura sostenible; a largo plazo contribuirá a mejorar la calidad ambiental y conservar los recursos agua y suelo, optimizando la calidad de vida de las personas que dependen de esta actividad.

SUMMARY

This research entitled "Identification of areas vulnerable to water erosion in the upper reaches of Middle Catamayo for Geographic Information Systems" was held at the top of Catamayo Basin belongs to the province of Loja, and within the Loja Catamayo cantons and covers a land area of 318.7 km2 1. This study was performed in order to simulate in GIS (Geographical Information Systems), and drag the loss of soil caused by natural and human factors.

To make the digital database comes to collecting necessary background studies conducted in the province of Loja, and existing files in the digital database of the Integrated Center for Environmental Geomatics (CINFA) and Idrisi Resource Center - Ecuador, National University of Loja, determining morphometric parameters, political boundaries, geographical, towns, drainage systems and topography of the area, validate the information obtained and proceeds to generate new information.

By applying Equation Universal Soil Loss Revised (RUSLE) composed of six factors (variables) and incorporated into the GIS IDRISI TAIGA edition, we proceed to estimate the crude and net erosion potential.

For the execution of the modules and Sedimentation RUSLE must establish each of the factors required by Equation Universal Soil Loss Revised (RUSLE).

The factors K (soil erodibility), and C, land cover is determined by information exists in the database CINFA Soil and Water Laboratory and Food Science, National University of Loja, for the K-factor equation is applied mathematics established by Wischmeier and Smith in 1978, which allows to adapt the soil test information, and the factor C is obtained by reclassification of securities established by the FAO (1985).

For the R factor (rainfall erosivity) was gathering information necessary for precipitation of a range of 15 years from weather stations located within and outside the study area, average rainfall is calculated and applied the equation set by Renard and Freimud in 1994 because the average values exceeds 850 mm. The P factor is determined

according to parameters set by the USDA, (2005), and finally the factors L and S are obtained from MNA input image data and mathematical equations.

The image of areas vulnerable to water erosion (soil loss by dividing the basin) in picture to identify potentially vulnerable sites and contribute sediment in the basin, we proceed to identify previously established field sites in agreement with the director of thesis advisor.The value of soil loss in the study area is 295.21 t / ha year when compared with other studies is determined as strong erosion. Sites visited in line with GIS information, identified vegetation data were limited sectors, agriculture in areas with slopes greater than 45% and presence of gullies. In the study area provides a site that does not appear in the image of GIS, this is because the input information is outdated.

The alternatives proposed in GIS for management and appropriate land use are based on the modification of C and P factors, aimed at reducing water erosion in the study area was simulated vegetation changed (factor C) and added P factor values used for agricultural conservation practices in the areas identified as vulnerable to water erosion.

RUSLE module to run with the factors of C and P modified in order to achieve sustainability, we obtain the value of 53.43 t / ha, identified as strong erosion, unlike the initial value of 295.21 t / ha year, the process erosion is reduced by 82%.

It is concluded that the application of the GIS software IDRISI TAIGA editing by executing the following modules: Integrated Water Management, Ruslan and Sedimentation allows fast focusing know the current status of a territory, facilitating and optimizing time and economic resources.

Emphasis should be placed on these two variables because if there is natural cover, and sustainable agriculture, the long term contribute to improved environmental quality and conserve water and soil resources, optimizing the quality of life of people who depend on this activity.

2. INTRODUCCIÓN

Los procesos de erosión y sedimentación del suelo es uno de los mayores problemas ambientales en la región Andina, debido a la seria amenaza que estos representan a la agricultura, y estructuras de conservación de agua y suelo, al paisaje natural o medioambiente en general. (Saavedra y Mannaerts, 2003).

Los problemas de erosión de suelos no solo están limitados a las zonas en las cuales la erosión toma lugar sino también a zonas aguas abajo donde los sedimentos llevados por el escurrimiento pueden también causar daños a las infraestructuras hidráulicas, canales de riego, sedimentación de reservorios y contaminación asociada a los sedimentos resultando en una declinación en la propiedades fisicoquímicas del agua.

Morgan (1997) manifiesta que la erosión es un proceso con dos fases. La primera corresponde al desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo, y la segunda a su posterior transporte por los agentes erosivos como las corrientes de agua y el viento. Los problemas de erosión de suelos no solo están limitados a las zonas en las cuales la erosión toma lugar sino también a zonas aguas abajo donde los sedimentos llevados por el escurrimiento pueden también causar daños a las infraestructuras hidráulicas, canales de riego, sedimentación de reservorios y contaminación asociada a los sedimentos resultando en una declinación en la propiedades fisicoquímicas del agua.

El Ecuador ha sido y sigue siendo afectado por numerosos procesos erosivos, de tal manera que se puede considerar que la erosión constituye uno de los principales aspectos de degradación de los recursos naturales, especialmente del suelo. Alrededor del 50% del territorio tiene que ver con este problema.

La Sierra es el asiento de una erosión, activa a muy activa, generalizada en muchos lugares. Una erosión más localizada, de carácter potencial, pero que se desarrolla con una relativa rapidez en nuestros días, afecta a toda la parte occidental de la Costa y, en menor grado, a los grandes ejes de colonización de la Región Amazónica. (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2005)

En la actualidad se han implementado modelos que facilitan la estimación de la erosión y sedimentación mediante simulación en sistemas de información geográfica (SIG), instrumentos de gran utilidad, cuyos resultados son empleados en la gestión de los recursos agua y suelo. La metodología utilizada tiene que ser adecuada y compatible con la información obtenida, con el objetivo de adquirir los resultados esperados (Martínez, 2007).

Para realizar la presente investigación se utilizó el SIG IDRISI versión Taiga, este software nació bajo del nombre "The IDRISI Project" (IP) en el "Clark Laboratories for Cartographic Technology and Geographic Analysis" que pertenece a la Escuela de Post-grado en Geografía.

Desde su inicio en 1987, IDRISI ha evolucionado constantemente para convertirse en uno de los SIG más utilizados a nivel mundial y con altas capacidades de análisis tanto para mapas, como imágenes de satélite, todo ello a nivel de microcomputadoras. Este SIG puede ser ubicado en más de 120 países alrededor del mundo y sus aplicaciones son de las más variadas, entre ellas: planificación regional y local, manejo y conservación de los recursos naturales. (Eastman, 2006)

En la presente investigación se aplicó el módulo de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), del paquete SIG IDRISI versión Taiga, que permitió estimar la erosión del suelo en la cuenca alta del rio Catamayo; RUSLE, utilizó seis factores que son: erodabilidad, erosividad, cobertura vegetal, prácticas agrícolas, expresadas en imágenes y longitud, pendiente, y tamaño de la cuenca expresadas en números; como resultado se obtuvo las imágenes de erosión total y promedio, con estos resultados se procedió a estimar la sedimentación en el módulo SEDIMENTACION, para luego contrastar con el recorrido de campo que se ejecutó en puntos estratégicos de la cuenca. Se propuso alternativas de cultivo y prácticas agrícolas establecidas por la FAO y USDA, para simular la disminución de erosión; generando de esta manera información de respaldo que permitió realizar toma de decisiones para la gestión y manejo adecuado de los recursos agua y suelo.

El presente informe se elaboró dando cumplimiento a los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Identificar el grado de erosión hídrica en zonas vulnerables de la Cuenca Alta del Río Catamayo empleando, el modelo RUSLE en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Objetivos Específicos:

1. Elaborar una base de datos digitales con la información biofísica existente. Validar e investigar nueva información relacionada con el tema de estudio.

2. Estimar la erosión potencial (cruda y neta) de la cuenca con base en los módulos RUSLE y SEDIMENTATION del paquete de SIG IDRISI TAIGA.

3. Comparar los resultados obtenidos del modelo RUSLE y SEDIMENTATION en SIG, en el campo.

4. Proponer alternativas adecuadas de manejo y uso del suelo mediante simulaciones en el paquete de SIG IDRISI.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. CUENCA

3.1.1. Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica está constituida por el territorio que delimita el curso de un rio y el espacio donde se colecta el agua que converge hacia un mismo cauce. La Cuenca Hidrográfica, sus recursos naturales y habitantes poseen condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que les confieren características particulares a cada una, importantes para considerarlas como unidades de planificación.

En zonas de altas montañas y cordilleras los ejes longitudinales de las cuencas se constituyen en vías naturales de comunicación y de integración comercial, sea a lo largo de sus ríos, de las cumbres que las separan una de otras. Se fomentan estrechos mecanismos de interacción entre sus habitantes que le confieren condiciones socioeconómicas particulares. (Campos, 1998)

3.1.2. Componentes de una cuenca

Para su estudio los componentes de una cuenca se agrupan de la siguiente manera:

3.1.2.1. Factores físicos

- **El relieve:** Forma del terreno, sus elevaciones, ligadas a la formación de los suelos, el drenaje superficial, la erosión, etc.
- **La topografía:** Ligada al relieve. Diferencias de elevación relacionadas con diferencias de drenaje (valles, colinas , mesetas)
- **La hidrología:** Régimen de caudales, o sea volumen de escorrentía, sedimentación y clasificación de corrientes.
- **La hidrografía:** Subcuencas que hacen parte de la cuenca, forma de la cuenca, análisis morfométrico y red de drenaje

- **La geología:** Determina la red hidrográfica y el tipo de roca y suelo que predominan en una región. Para realizar prácticas de conservación y restauración debe conocerse material de origen de suelos.
- **La geomorfología:** Trata de la forma que posee la corteza terrestre, se relaciona con el clima, relieve, material parental, tiempo de formación del suelo.
- **El clima:** Condiciona los usos que se pueden dar al suelo en una región, provoca la erosión y degradación de los suelos. (Chow,1959)

3.1.2.2. Factores biológicos:

- **El suelo:** Material de origen, pendiente, erosión, fertilidad. Uso actual y potencial.
- **La vegetación:** Bosques naturales, artificiales, clases de cultivos, pastos, páramos.
- **La fauna:** Participa en ciclo de formación de nutrientes, cadenas tróficas, Tienen valor científico, estático, recreativo y son fuente de alimento, medicinal, etc.
- **La ecología:** Estudiar la comunidad con los organismos que viven. Ecosistemas. Clasificación por zonas de vida, provincias biogeográficas, regiones zoogeográficas, macroecosistemas, (Chow,1959)

3.1.2.3. Factores Humanos

Elemento fundamental en desarrollo de una cuenca. Beneficiario directo de planes. El manejo integrado de una cuenca permite introducir cambios sociales, fomentar el desarrollo económico y mejorar las condiciones de vida. Se debe estudiar población, incremento, mortalidad, infraestructura, escuelas, salud, energía, tenencia de la tierra, prácticas agrícolas, etc. (Chow, 1959)

3.1.2.4 Factores Ambientales

Concepto de manejo de cuencas ha evolucionado en los últimos años. No solo se refiere al aspecto hídrico, control de inundaciones, el riego, disminución de sedimentos, agua para consumo humano.

3.1.3. Límites de una cuenca

Para delimitar una cuenca hay que tomar en cuenta la topografía del terreno. Son las partes más altas a su alrededor y se llaman divisorias o divorcios de aguas.

Se llaman divorcios de aguas a las líneas de separación con las cuencas adyacentes. Siguen alrededor de la cuenca y solamente atraviesan el río en el punto de desagüe. (Chow, 1959)

3.1.4. Tamaño de la cuenca

Para delimitar una cuenca hay que tomar en cuenta la topografía del terreno. Son las partes más altas a su alrededor y se llaman divisorias o divorcios de aguas. Se llaman divorcios de aguas a las líneas de separación con las cuencas adyacentes. Siguen alrededor de la cuenca y solamente atraviesan el río en el punto de desagüe.

Según CIDIAT, 1978:

- Sistema Hidrográfico: > a 300 000 ha (3 000 km^2)
- Cuenca: 60 000 a 300 000 ha (600 a 3 000 km^2)
- Subcuenca: 10 000 a 60 000 ha (100 a 600 km^2)
- Microcuenca: < a 10 000 ha (100 km^2)

Según INEFAN:

- Sistema Hidrográfico: > a 300 000 ha (3 000 km^2)
- Cuenca: 100 000 a 300 000 ha (1 000 a 3 000 km^2)
- Subcuenca: 15 000 a 100 000 ha (150 a 1 000 km^2)
- Microcuenca: 4 000 a 15 000 ha (40 a 150 km^2)

3.1.5. Parámetros Morfométricos

3.1.5.1. Área drenada de una cuenca

Es el área en proyección horizontal encerrada por el parteaguas. (km^2). El área de la cuenca afecta las crecidas, el flujo mínimo y la corriente media. De acuerdo al área una cuenca puede catalogarse como grande, pequeña, etc. Cuencas grandes km^2 y pequeñas ha.

3.1.5.2. Perímetro

Es la medición de la línea envolvente del área.

3.1.5.3. Factor de forma

Tiene fundamental importancia en la cantidad de escorrentía. Para una misma área y una misma intensidad de lluvia, el hidrograma de salida depende directamente de la forma de la cuenca.

Coeficiente de Gravelius

$$Cg = 0{,}282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Cg = coeficiente de Gravelius

P = perímetro de la cuenca (km)

A = área de la cuenca (km

Cg	Forma
1,00 - 1,25	Redonda
1,25 – 1,50	Ovalada
1,50 – 1,75	Oblonga

3.1.5.4. Factor de elongación

Schum propuso (Re) como el cociente adimensional entre el diámetro de un círculo (D) que tiene igual área (A) que la cuenca y la longitud (Lc) de la misma. Lc es la más grande dimensión de la cuenca desde la salida hasta la divisoria más distante, paralela al cauce principal.

$$R_e = \frac{D}{L_c} = \frac{1{,}1284\sqrt{A}}{L_c}$$

Coeficiente varía entre 0.6 a 1.0

Valores cercanos a la unidad relieve bajo

Re= 0.6 a 0.8 asociado a fuertes relieves y pendientes.

3.1.5.5. Pendiente de la cuenca

Guarda una relación compleja, con el grado de infiltración, con la escorrentía, con la humedad del suelo y con la contribución del agua subterránea a la corriente del cauce.

Criterio de Alvord

Se analiza la longitud de las curvas de nivel de la cuenca

$$S_c = \frac{DL}{A}$$

A = Area de la cuenca, en km^2

D = Desnivel constante entre curvas de nivel, en km.

L = Longitud total de las curvas de nivel, en km.

Sc = Pendiente de la cuenca.

3.1.5.6. Elevación media de la cuenca

- **Método de las intersecciones***:* El mapa topográfico de la cuenca se divide en cuadrados de igual tamaño. La elevación media de la cuenca se calcula como el promedio de las elevaciones de todas las intersecciones.

3.1.5.7. Curva hipsométrica

Es una curva que indica el porcentaje de área de una cuenca, o bien la superficie de la cuenca en km2 que existe por encima de una cota determinada.

3.1.5.8. Longitud, perfil y pendiente del cauce principal

- **Longitud:** La longitud (L) del cauce o colector principal es una magnitud útil en la respuesta hidrológica, ya que los efectos de la precipitación se sentirán más rápidamente en un río corto que en un río largo.
- **Perfil:** Se obtiene llevando a una gráfica los valores de sus recorrido horizontales (abscisas), contra los cambios de elevaciones respectivas (ordenadas).
- **Pendiente:** Se relaciona con las características hidráulicas del escurrimiento, en particular con la velocidad de propagación de las ondas de avenida y con el transporte de sedimentos. (Tejerina, 2010)

3.2. EROSIÓN

La erosión es el proceso de sustracción o desgaste de la capa superficial del suelo por acción de procesos geológicos exógenos como las corrientes superficiales de agua o hielo glaciar, el viento o la acción de los seres vivos.

Según Arsenault y Bonn (2005), los procesos de erosión geológica son un fenómeno natural donde los cambios son frecuentemente imperceptibles en un corto tiempo pero tienen consecuencias a largo plazo. El clima, la geología y la cubierta vegetal de una zona son de suma importancia debido a que determinan el tipo de erosión natural que se esté produciendo, la erosión se refiere al transporte de partículas y no a la disgregación de las rocas. El material erosionado puede estar conformado por:

- ✓ Fragmentos de rocas creados por abrasión mecánica por la propia acción del viento, aguas superficiales, glaciares y expansión-contracción térmica por variaciones estacionales, diurnas o climáticas;

- ✓ Suelos, los cuales son creados por la descomposición química de las rocas mediante la acción combinada de ácidos débiles disueltos en agua superficial y meteórica, hidrólisis, ácidos orgánicos, bacterias, acción de plantas.

3.2.1. Tipos de erosión

3.2.1.1. Erosión geológica o natural

Es el desgaste natural de la superficie de la tierra sin intervención del hombre y por lo tanto, fuera de su control. Los factores que actúan en este tipo de erosión son: el agua de lluvia, las corrientes fluviales, el mar, el viento, la temperatura y la gravedad.

Es un proceso lento e imperceptible que tiende a buscar una estabilidad de la superficie en equilibrio entre el suelo, la vegetación, los animales y el agua, y que aún continúa en muchas regiones jóvenes de la tierra. La erosión geológica contribuye a la formación del relieve, a la meteorización de las rocas y a la formación de los suelos. (Osinaga y Villanueva, 2004).

3.2.1.2. Erosión acelerada o antrópica

Es la erosión rápida del suelo propiciada por el hombre al romper el equilibrio entre los suelos, la vegetación y el agua o el viento. El hombre favorece la acción erosiva del agua y el viento, especialmente en los terrenos en pendiente, al usar sistemas y herramientas inadecuadas en los cultivos, al talar los bosques o quemar la vegetación, al construir obras o vías de comunicación.

Según FAO (2002), los agentes más importantes que actúan en la erosión son el agua y el viento. En función de esto se conocen dos tipos de erosión**,** la eólica y la hídrica. A nivel mundial, la erosión hídrica es el tipo más importante de degradación de suelos y ocupa aproximadamente 1,093 millones de hectáreas (56 %) del área total afectada por degradación de suelo inducida por el hombre. La erosión eólica es, a continuación, la que afecta mayor superficie y ocupa 548 millones de hectáreas (28 %) del área afectada.

Por su importancia, en esta investigación solamente se hará referencia a la erosión hídrica. Según la forma como el agua actúa en el suelo, existen tres clases de erosión hídrica: erosión pluvial, erosión por escurrimiento y remoción en masa.
Los factores que desencadenan la erosión hídrica son: clima, topografía, suelo, vegetación y técnicas de cultivo. (Osinaga y Villanueva, 2004).

3.2.1.3. Erosión hídrica

Son procesos físicos por los cuales se ven regidos los procesos de la erosión hídrica de una zona. Están directamente relacionados por diferentes factores ligados como son: el clima, la topografía, la hidrología y el uso del suelo. Los principales agentes responsables de generar la erosión hídrica son las precipitaciones pluviales y la escorrentía superficial. Además, se relacionan los factores anteriores con la fuerza de gravedad, que se encarga de producir la dinámica necesaria para desprender, disolver y transportar las partículas del suelo (Clérici y García, 2001).

Cuando las gotas de agua alcanzan y chocan sobre la superficie del suelo durante las precipitaciones pluviales, éstas tienden a desprender las partículas del suelo, después

el agua empieza a escurrir sobre la superficie en forma de escorrentía junto con las partículas de suelo en forma de sólidos disueltos y transportadas por diferentes conductos superficiales a través de las pendientes que presenta el relieve. Sí la velocidad del agua disminuye lo suficiente, las partículas de mayor densidad que se encuentran disueltas en el agua tienden a sedimentarse, en tanto que, las de menor tamaño continuarán disueltas y seguirán siendo transportadas hacia otros sitios más lejanos por el agua a través de los diferentes conductos de transporte del agua de escorrentía. Los procesos de la erosión hídrica también implica el desprendimiento, transporte y, eventualmente, la sedimentación del material erosionado (Figueroa, 1975).

3.2.2. Erosión hídrica pluvial

La erosión hídrica pluvial es la que se genera como consecuencia de la lluvia. De acuerdo con sus formas de actuar la erosión hídrica se subdivide en: erosión por salpicadura, erosión laminar, erosión en surcos, y erosión en cárcavas. (Osinaga y Villanueva, 2004).

3.2.2.1. Erosión por salpicadura

La erosión de suelo es un proceso mecánico que requiere energía, la mayor parte de esta energía es suministrada por las gotas de lluvia. Cuando las gotas golpean el suelo desnudo a alta velocidad, fragmenta los gránulos de suelo y agregados, desprendiendo las partículas de la masa del suelo. La acción de salpicadura mueve las partículas desprendidas solamente a distancias cortas, pero el flujo superficial ligero transporta parte de estas partículas directamente pendiente abajo y otra parte es conducida a pequeñas depresiones donde el flujo es más concentrado y provee una mejor transportación de las partículas del suelo.

3.2.2.2. Erosión laminar

El flujo laminar, que es muy superficial, transporta material del suelo que ha sido desprendido por impacto de las gotas de lluvia. Cuando el escurrimiento es impedido de fluir libremente por una obstrucción natural o artificial p. ej. barrera de residuos

vegetales o vivas en contorno, se reduce la velocidad del flujo y hay una mayor probabilidad de que ocurra una deposición de partículas.

Dado que la erosión laminar ocurre casi uniformemente sobre los campos agrícolas, puede remover una considerable cantidad de suelo sin ser evidente, pero no puede ser ignorado como una fuente importante de sedimentos.

3.2.2.3. Erosión en surco

Es un proceso donde pequeños canales de varios centímetros de profundidad son formados. El suelo es desprendido por la acción abrasiva del flujo de agua y por desprendimiento del suelo, causado por socavamiento de las paredes laterales de los canales. Las partículas desprendidas son transportadas por una combinación de suspensión, saltación y rodamiento. Partículas suspendidas, principalmente arcilla y limo fino, pueden viajar grandes distancias antes de ser depositadas sobre la superficie de la tierra. El potencial erosivo del flujo de agua depende de su velocidad, profundidad, turbulencia del flujo así como del tipo y cantidad del material siendo transportado. Erosión en surco incrementa rápidamente con la longitud y el grado de pendiente que causa un incremento en la velocidad y volumen del flujo de escorrentía superficial (Osinaga y Villanueva, 2004).

3.2.2.4. Erosión en cárcavas

Cuando hay una mayor concentración en el escurrimiento, las irregularidades del terreno permiten la unión de varios surcos y se forman zanjas de gran tamaño conocidas como cárcavas, generalmente ramificadas y que no permiten el uso de maquinarias, ni ningún cultivo. Esta forma de erosión es común en suelos altamente susceptibles a la erosión.

La aparición de surcos y cárcavas representan el grado superior del proceso de erosión que se manifiesta en los suelos. Su formación tiene origen en el drenaje superficial y a medida que se incrementa el tiempo de concentración.

Pérdidas de suelo en sitios agrícolas y de construcción son usualmente producto de una combinación de erosión laminar y en surco.

Dado que los sedimentos de estos dos tipos de erosión vienen del suelo cerca de su superficie, la probabilidad de contener contaminantes (fertilizantes, pesticidas) es mayor que en sedimentos provenientes de cárcavas, canales y de lechos de ríos, aunque la cantidad de sedimentos de estos es mucho mayor que de las primeras fuentes

La estimación de la erosión que pueda ocurrir y de la posible zona afectada se puede realizar a través de diferentes métodos y técnicas.
Uno de los métodos más utilizados para predecir el fenómeno es el análisis de factores o elementos del medio. (Osinaga y Villanueva, 2004).

3.2.2.5. Tipos de cárcavas:

De acuerdo a su forma, las cárcavas pueden ser clasificadas en seis categorías diferentes.

- **Lineal:** de forma larga y con cabeza angosta, de pocos tributarios en sus costados.
- **Bulbosa:** ancha y espatulada en el extremo superior, pudiendo ser lineal en su parte baja.
- **Dendrítica:** formada por muchos tributarios en forma ramificada.
- **Enrejada:** los tributarios entran al canal formando aproximadamente un ángulo de 90°.
- **Paralela:** compuesta por una o más cárcavas que desaguan en una sola.
- **Compuesta:** combinaciones de dos o más formas, dándose especialmente en zonas con problemas avanzados de erosión (Villanueva y Osinaga, 2004).

3.3. COSTOS ECONÓMICOS DERIVADOS DE LAS PÉRDIDAS DEL SUELO

Los reportes de pérdidas de suelo, si bien resultan dramáticos conforme a las comparaciones establecidas con las tasas de formación de suelo, lo son aún más una vez se hace su valoración económica. Así, diferentes estimativos en los Estados Unidos de América indican pérdidas económicas que oscilan entre 500 millones y 1 billón de dólares anuales. Al respecto, el costo total de la erosión se estima entre 1,7 y 1,8 billones de dólares, e incluye el costo en su control, estando el costo total para un

año particular (1983) en el rango 525-588 millones de dólares, distribuidos en costos por pérdidas de productividad de los cultivos (420 millones) y pérdidas por fertilización (105-168 millones). Las cifras corresponden a los daños económicos causados por la erosión en fincas o predios rurales, y que comprenden el valor de la reducción de las cosechas, y los incrementos en costos derivados de la mayor necesidad de aplicación de insumos, como fertilizantes (Figueroa, 1975).

El caso de América Tropical, aun cuando estimado para América del Sur, se reportan casi 250 millones de hectáreas de terreno afectadas por la degradación del suelo, siendo la erosión la principal amenaza con 68 % del terreno afectado PNUMA, (2000); unos 100 millones de hectáreas se han degradado como consecuencia de la deforestación, en tanto que unos 70 millones de hectáreas se han visto sometidas a procesos de pastoreo intensivo (Saavedra y Mannaerts, 2003).

3.4. MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO.

Según Somarriba y Obando (2005), la estimación de pérdidas de suelo, es una herramienta útil para planificación del uso de la tierra, en el marco de la gestión ambiental. Los métodos directos mediante el montaje de unidades experimentales en campo permiten generar información sobre la modelación del fenómeno erosivo, este método se emplea con la finalidad de realizar ensayos de campo enfocados a la investigación. Los métodos indirectos basados en el empleo de expresiones matemáticas de tipo paramétrico, las cuales permiten realizar estimaciones indirectas de la pérdida de suelo, permiten ahorros de tiempo y dinero.

3.5. MÉTODOS INDIRECTOS

A efectos de la estimación de pérdidas de suelo, la modelación del fenómeno representa una importante herramienta, para su posterior aplicación en los procesos de planificación del uso de la tierra en forma clara, ordenada y además, viable económicamente. Sin embargo, es claro que su obtención depende en buena medida, de la información recolectada en experimentaciones de campo, y que tales modelos no son por ello, de carácter estático, sino mejor configuran un cierto dinamismo, conforme se adquieren nuevas comprensiones del fenómeno, que se integran a los modelos

obtenidos, o simplemente, se amplían las bases de datos que los soportan (Tejerina, 2010).

Cabe destacarse dentro de los modelos, básicamente dos tipos los determinísticos y los paramétricos; los primeros están basados en ecuaciones matemáticas con el objeto de describir los procesos involucrados en el modelo, tomando en consideración las leyes de conservación de la materia y energía. Por otra parte, los modelos de tipo paramétrico, se basan en la identificación de relaciones estadísticamente significativas entre variables, que se asume son importantes, cuando se cuenta con una razonable base de datos; aquí son reconocidos tres tipos de análisis:

- **De caja negra:** donde sólo son estudiadas las entradas y salidas principales
- **De caja gris:** donde se tiene conocimiento en algún detalle de cómo trabaja el sistema
- **De caja blanca:** donde todos los detalles acerca de cómo opera el sistema son conocidos.

La mayor parte de los modelos usados en estudios de erosión del suelo, son de tipo paramétrico de caja gris, basándose así en la definición de los factores más importantes, en su medición, y en su relación con las pérdidas de suelo, mediante empleo de técnicas estadísticas.

Se destaca dentro de los modelos de tipo paramétrico, en primer lugar, la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) dada su extendida aplicación a lo largo y ancho del mundo aunque de mayor importancia en Norteamérica donde tuvo origen actualmente, se usa su versión revisada (RUSLE) (Almoza *et al.,* 2004)

Deben además mencionarse, la metodología desarrollada por Tosi (1972), para la estimación de pérdidas de suelo, cuyo principal atractivo reside en su aplicabilidad a las condiciones propias a las latitudes tropicales; y la propuesta por Morgan *et al*. (1984) para la valoración del riesgo de erosión, que supera a los anteriores dada la estimación, que en forma adicional, se puede hacer a través suyo, de la escorrentía media anual.

La modelación de la erosión incluye, además, el enfoque de cuencas hidrográficas, producción y carga de sedimentos en corrientes de agua y los efectos del viento (erosión eólica) entre otros.

3.5.1. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

USLE es el acrónimo para *Universal Soil Loss Equation*, por sus siglas en inglés, es decir, *Ecuación Universal de Pérdida de Suelo*. Esta ecuación se desarrolló en EEUU en 1930 por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de EEUU (USDA SCS; actualmente Natural Resources Conservation Service, NRCS), si bien parece ser que la primera publicación de la USLE completa no llegó hasta 1965. (Clérici y García, 2001)

Dicha ecuación expresa el promedio de las pérdidas anuales de suelo a largo plazo (en toneladas métricas por hectárea y año, t/ha/año), y por tanto no es válida para un año concreto ni para un evento particular (Tejerina, 2010).

La ecuación es la siguiente:

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{R} * \boldsymbol{K} * \boldsymbol{L} * \boldsymbol{S} * \boldsymbol{C} * \boldsymbol{P}$$

Dónde:

***A* =** Es la pérdida de suelo por unidad de superficie, medida en toneladas métricas por unidad de superficie (t/ha).

R = Es el factor de erosividad de la lluvia; es el producto acumulado para el período de interés (normalmente un año), con cierta probabilidad de ocurrencia (normalmente 50 % o promedio), de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos de las lluvias.

K = Es el factor de erosionabilidad del suelo; es la cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor erosividad de la lluvia (Mg/J), cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de una pendiente del 9 % de gradiente y 22.1 m de longitud.

L = (adimensional) es el factor de longitud de la pendiente; la relación entre la pérdida de suelo con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en 22,1 m de longitud, a igualdad de los demás factores.

S = (adimensional) es el factor gradiente de la pendiente; la relación entre la pérdida de suelo con un determinado gradiente y el estándar de 9 %, a igualdad de los demás factores.

C = (adimensional) es el uso y gestión de suelos; es la relación de pérdidas por erosión entre un suelo con un determinado sistema de uso y gestión (rotación de cultivos, uso de los mismos, laboreo, productividad, gestión de residuos, etc.) y el mismo suelo puesto en las condiciones en que se definió K, a igualdad de los demás factores.

P = (adimensional) es el factor práctica mecánica de apoyo; la relación entre la pérdida de suelo con determinada mecánica (laboreo en contorno, en fajas, terrazas, etc.) y la que ocurre con laboreo a favor de la pendiente, a igualdad de los demás factores.

3.5.2. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo RUSLE (USLE revisada)

Formulada por Wischmeier y Smith (1968-1978) y revisada por Lane y Nearing (1989), a la que se le han introducido ciertas modificaciones en lo referente a la determinación del factor de erosividad de la lluvia R y al factor topográfico LS, tiene el mismo propósito que la USLE y se formula igual pero incorpora importantes diferencias en la manera de estimar cada uno de los parámetros, así para el factor ***R*** se incorporan nuevos mapas de isolíneas para el índice de erosionabilidad; ***K*** incorpora aspectos relacionados con procesos de heladas; ***LS*** se estiman según nuevas fórmulas; ***C*** incluye nuevos sub-factores y ***P*** incluye nuevas consideraciones de prácticas agrícolas. (Clérici y Préchac, 2001), RUSLE tiene la siguiente expresión matemática:

$$\boldsymbol{A = R * K * L * S * C * P}$$

Dónde:

A = Pérdida de suelo promedio anual en [t/ha/año]
R = Factor erosividad de las lluvias en [MJ/ha*mm/hr]

K = Factor erodabilidad del suelo en [t/ha.MJ*ha/mm*hr]

LS = Factor topográfico (función de longitud-inclinación-forma de la pendiente), a dimensional

C = Factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal), adimensional

P = Factor de prácticas de conservación (conservación de la estructura del suelo), adimensional.

3.6. SEDIMENTACIÓN

La sedimentación es el proceso de acumulación de materiales después de haber sido erosionados y transportados. La sedimentación es el último paso del proceso de la morfogénesis. Las características de los depósitos, dependen de la naturaleza del agente de transporte. En el caso de los ríos, mares o viento el material se deposita cuando el movimiento es menor que la velocidad de deposición de la carga. En el caso del hielo, la deposición se produce cuando encuentra un obstáculo o cuando la masa de hielo alcanza su máxima extensión espacial.

El sedimento es un material sólido, acumulado sobre la superficie terrestre (litosfera) derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera (vientos, variaciones de temperatura, precipitaciones meteorológicas, circulación de aguas superficiales o subterráneas, desplazamiento de masas de agua en ambiente marino o lacustre, acciones de agentes químicos, acciones de organismos vivos). (Campos, 1998)

Puesto que la mayor parte de los procesos de sedimentación se producen bajo la acción de la gravedad, las áreas elevadas de la litosfera terrestre tienden a ser sujetas prevalentemente a fenómenos erosivos, mientras que las zonas deprimidas están sujetas prevalentemente a la sedimentación. Las depresiones de la litosfera en la que se acumulan sedimentos, son llamadas cuencas sedimentarias.

Las cargas de sedimentos son, sin embargo, difíciles de estimar debido a que se debe tomar en cuenta la gran complejidad de las interrelaciones que existen entre los procesos físicos implicados como: la variabilidad espacial y temporal de los factores

medio ambientales que influyen en la erosión hídrica y del transporte de las partículas en suspensión (Muñiz, 2001).

3.6.1. Sedimentación Fluvial

Este tipo de sedimentación se presenta por acción de la velocidad del agua, que son las que provienen del deshielo de la nieve, o de la lluvia y discurren sobre el terreno sin cauce fijo. Al deslizarse por las laderas se van uniendo entre sí hasta incorporarse a un torrente o río. Su acción es especialmente erosiva, dependiendo en gran medida, de la naturaleza del terreno por el cual discurren, de su permeabilidad, de la pendiente y de la vegetación. Finalmente después del proceso erosivo el transporte del material erosionado se sedimenta.

Según CECN y UNICAFE (2005) los torrentes ejercen tres efectos: de erosión, transporte, y sedimentación, según su curso. En él se distinguen tres partes:

- ✓ ***Cuenca de recepción:*** Es la zona del torrente donde se reúnen las aguas salvajes que forman su caudal. Suele tener forma de embudo, donde predominan la erosión y el transporte, aunque también se depositan los materiales más pesados.
- ✓ ***Canal de desagüe:*** Es el cauce del torrente. Por él se desplaza el agua con gran violencia, transportando el material erosionado. También aquí produce erosión, profundizando el cauce y arrancando materiales a ambos lados. Estos materiales angulosos excavan por los remolinos que crea el agua, formando las llamadas ollas o marmitas del gigante.
- ✓ ***Cono de deyección****:* Es la zona final del torrente. En ella disminuye bruscamente la pendiente, por lo que la erosión y el transporte dejan de actuar y se produce la sedimentación de los materiales arrastrados. Estos son heterogéneos, como piedras angulosas, gravas, arenas, barro y restos de vegetación.

3.6.2. Sedimentación Ocasionada por los Ríos

Los ríos son corrientes de agua que de forma permanente discurren por un cauce fijo. En ellos se distinguen: El cauce o lecho, que es el hueco excavado por el río y por donde avanzan sus aguas, suele presentar uno pequeño, de estiaje, y otro más amplio

o de avenida. El caudal, es el volumen de agua que transporta por unidad de tiempo, suele variar según la estación y la pluviosidad. Los efectos de erosión, transporte y sedimentación se realizan de distinta manera dependiendo del caudal, de la velocidad del agua y de los materiales que encuentre (Muñiz, 2001).

3.6.3. Sedimentación Eólica

Es la sedimentación producto de la acción del viento. Cuando disminuye la fuerza del viento, las partículas transportadas se van depositando selectivamente: primero, las más gruesas y luego las más finas. De esta forma se van formando los depósitos, que en algunas regiones pueden ser importantes. Las formas más comunes son: Rizaduras paralelas y Dunas o médanos (Rojas, 1999).

3.7. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para soportar la captura, administración, manipulación, análisis, modelamiento y graficación de datos u objetos referenciados espacialmente, para resolver problemas complejos de planeación y administración.

Un sistema de información geográfica, es una herramienta de análisis de información. La información debe tener una referencia espacial y debe conservar una inteligencia propia sobre la topología y representación.

Es integración organizada de *hardware*, *software* y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información. En el sentido más estricto, es cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones. (Galindo, 1998)

3.7.1. Funcionamiento de un SIG

A causa del desarrollo de la informática con el transcurso de los años, los investigadores han optado por utilizar los sistemas de información geográfica (SIG) en estudios relacionados con la modelación. La mayoría de los SIG permiten realizar modelos numéricos de altitud que permiten determinar las pendientes y las direcciones de flujo del agua de escorrentía en cuencas. El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía (Martínez, 2007).

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.

3.7.2. Técnicas Utilizadas

Las modernas tecnologías SIG trabajan con información digital, para la cual existen varios métodos utilizados en la creación de datos digitales. El método más utilizado es la digitalización, donde a partir de un mapa impreso o con información tomada en campo se transfiere a un medio digital por el empleo de un programa de Diseño Asistido por Ordenador (DAO o CAD) con capacidades de georreferenciación.

Dada la amplia disponibilidad de imágenes orto-rectificadas (tanto de satélite y como aéreas), la digitalización por esta vía se está convirtiendo en la principal fuente de extracción de datos geográficos. Esta forma de digitalización implica la búsqueda de datos geográficos directamente en las imágenes aéreas en lugar del método tradicional de la localización de formas geográficas sobre un tablero de digitalización. (Montes *et al*., 2007)

3.7.3. Representación de los Datos

Los datos SIG representan los objetos del mundo real (carreteras, el uso del suelo, altitudes). Los objetos del mundo real se pueden dividir en dos abstracciones: objetos discretos (una casa) y continuos (cantidad de lluvia caída, una elevación). Existen dos formas de almacenar los datos en un SIG: raster y vectorial. (Franco, 2008)

Los SIG que se centran en el manejo de datos en formato vectorial son más populares en el mercado. No obstante, los SIG raster son muy utilizados en estudios que requieran la generación de capas continuas, necesarias en fenómenos no discretos; también en estudios medioambientales (contaminación atmosférica, distribución de temperaturas, localización de especies marinas, análisis geológicos, etc.) (Eastman, 2006).

- **Raster:** Un tipo de datos raster es, en esencia, cualquier tipo de imagen digital representada en mallas. El modelo de SIG raster o de retícula, permite realizar un estudio espacial, más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor. Cualquiera que esté familiarizado con la fotografía digital reconoce el píxel como la unidad menor de información de una imagen. Una combinación de estos píxeles creará una imagen, a distinción del uso común de gráficos vectoriales escalables que son la base del modelo vectorial.

- **Vectorial:** En un SIG, las características geográficas se expresan con frecuencia como vectores, manteniendo las características geométricas de las figuras. En los datos vectoriales, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir, de límites definidos. Cada una de estas geometrías está vinculada a una fila en una base de datos que describe sus atributos. Por ejemplo, una base de datos que describe los lagos puede contener datos sobre la batimetría de estos, la calidad del agua o el nivel de contaminación. Esta información puede ser utilizada para crear un mapa que describa un atributo particular contenido en la base de datos. Los lagos pueden tener un rango de colores en función del nivel de contaminación.

Además, las diferentes geometrías de los elementos también pueden ser comparados. Así, por ejemplo, el SIG puede ser usado para identificar aquellos pozos (geometría de puntos) que están en torno a 2 kilómetros de un lago (geometría de polígonos) y que tienen un alto nivel de contaminación. (Saavedra y Mannaerts, 2003)

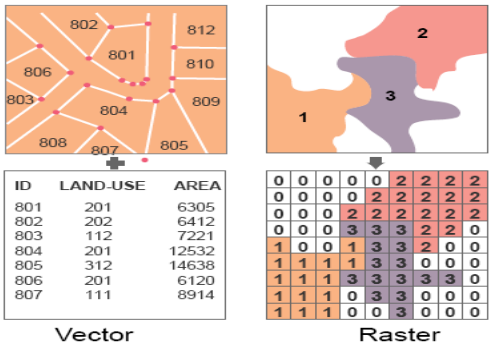


Figura 1. Vector y raster

3.7.4. Idrisi Taiga

La edición Taiga, lanzada en enero del 2009, es la decimosexta edición del software. Idrisi-Taiga desde 1987 es utilizado por investigadores y profesionales de las industrias de más de 175 países del mundo.

Se incluyen herramientas para planificación de territorios, soporte para toma de decisiones y análisis de riesgo con poderosas aplicaciones de estadística espacial, análisis de superficies y modelaje espacial.

Es un sistema integrado de procesamiento de imágenes y solución de software, proporciona cerca de 300 módulos para el análisis y visualización digital de la información espacial.

Posee una base de datos central: es una colección de mapas e información relacionada en formato digital. La base de datos se ocupa de las características de la superficie terrestre, consiste en dos elementos: una base de datos espaciales que describe la geografía (forma y posición) de las características de la superficie terrestre, y una base de datos de atributos que describe las particularidades o cualidades de

estas características. Se puede tener una parcela de propiedad definida en la base de datos espacial y cualidades como su uso de la tierra, dueño, valor de la propiedad, y demás, en la base de datos de atributos (Eastman, 2006).En algunos sistemas, las bases de datos espaciales y de atributos se distinguen claramente una de otra, mientras que en otros se encuentran íntimamente integradas en una sola unidad.

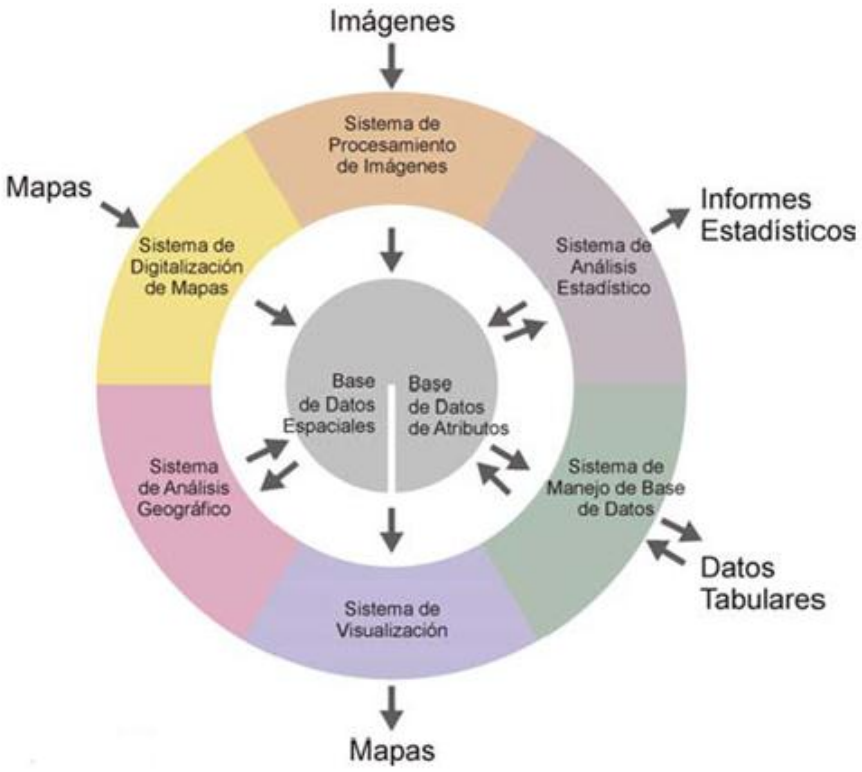


Figura 2. Bases de datos espaciales y de atributos

3.7.4.1. Módulo RUSLE

El módulo Rusle es parte del paquete de SIG Idrisi-Taiga, este evalúa la pérdida de tierras de cultivo y pastizales. Se trata de una aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) describe en el Manual Agrícola de la USDA.

El módulo RUSLE permite estimar la pérdida media anual del suelo para las condiciones existentes (información de entrada), permite simular el cambio de uso

del suelo, el cambio climático, y cambios en las prácticas de conservación o gestión, que podrían afectar la pérdida de suelo. Se estima la pérdida de suelo de los campos agrícolas individuales, las cuencas hidrográficas, u otras unidades de área apropiada.

La salida del módulo RUSLE permite determinar el patrón espacial de la pérdida de suelo, permite identificar las áreas críticas dentro de los campos o cuencas que aportan cantidades importantes de pérdida de suelo.

3.7.4.2. Módulo SEDIMENTATION

El módulo Sedimentation utiliza parches de nivel de salida de la herramienta de modelado RUSLE para evaluar el movimiento del suelo neto (erosión o deposición) en parches, campos o cuencas de los ríos (cuencas). Si se analizan los datos a escala de cuenca, una relación de entrega de los sedimentos puede ser de entrada para determinar el sedimento a salir de la cuenca.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se describe: los materiales, la zona de estudio y metodología utilizada durante el desarrollo de la investigación.

4.1. MATERIALES

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó los siguientes materiales: Laboratorio de Geomática Ambiental (CINFA); que cuenta con equipos de cómputo, 1 GPS navegador Megallan Triton 2000, un barreno, flexómetro, cámara digital fotográfica Sony Cybershot 12 megapixeles, material de oficina, SIG paquete Idrisi Taiga e imagen satelital, resolución 15-25km.

4.2. UBICACIÓN POLÍTICA

La Cuenca Alta del Río Catamayo se encuentra en el parte sur oriental de la provincia de Loja, específicamente en los valles de Vilcabamba, Quinara y Catamayo.

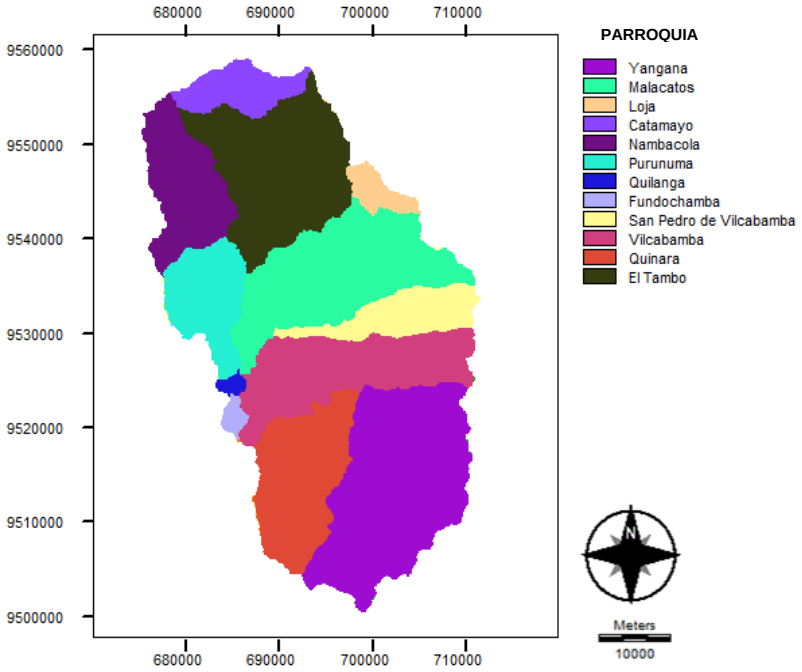


Figura 3. Parroquias presentes en la Cuenca Alta del Río Catamayo.

Gran parte del área de está inmersa dentro del cantón Loja, y forman parte del territorio las parroquias Yangana, Quinara, Vilcabamba, San Pedro de Vilcabamba, Malacatos;

la parte baja de la subcuenca está constituida por la parroquia El Tambo del cantón Catamayo y de las parroquias Fundochamba, Purunuma y Nambacola del cantón Gonzanamá. (Proyecto Binacional Catamayo-Chira, 2005)

4.3. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La Cuenca Alta del Río Catamayo se ubica en las siguientes coordenadas Datum UTM WGS 84

Coordenadas E: 681 169 m y 698 491 m

Coordenadas N: 9 557 852 m y 9 501 671 m

4.4. SISTEMA HIDROGRÁFICO.

En la figura 3, se muestra el sistema hidrográfico de la provincia de Loja con los cauces principales.

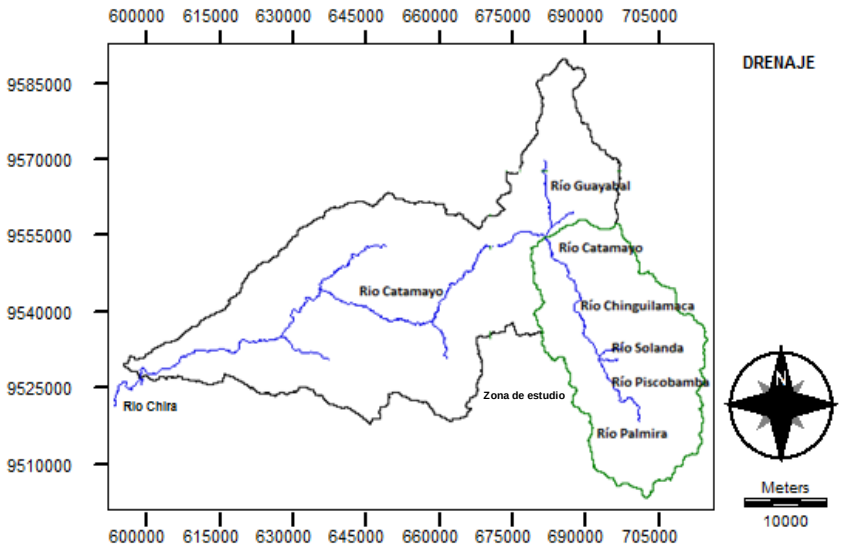


Figura 4. Sistema hidrográfico de la provincia de Loja

El presente estudio se desarrolló en la Cuenca Alta del Río Catamayo; este afluente nace a 3 673 msnm y recibe el nombre de río Tuna, al recibir aportes de los ríos Aguacola y Yangana recibe el nombre de río Palmira, este afluente al recibir contribución del rio Masanamaca forma el río Piscobamba, este tributario se une con él

río Malacatus que aguas abajo recibe el nombre de río Solanda, al recibir el aporte de un contribuyente (sin nombre), el río principal se denomina Chinguilamaca; este río antes de la llegada al punto de salida se denomina río Catamayo. El punto de interés o salida se ubica previo a la unión con el río Guayabal.

La zona de estudio pertenece a la Sub-Cuenca del río Catamayo (133 Km^2 de área drenada) la cual forma parte de la Cuenca Binacional Catamayo-Chira, que desemboca en el Océano Pacífico. (Proyecto Binacional Catamayo-Chira, 2005)

Políticamente la zona de estudio limita al Norte con la desembocadura del río Guayabal, del cantón Catamayo; al Sur con el cantón Palanda provincia de Zamora Chinchipe y parte del cantón Espíndola, al Este con el cantón Loja y Parque Nacional Podocarpus, (provincia de Zamora Chinchipe) y finalmente al Oeste con los cantones Gonzanamá y Qulinaga.

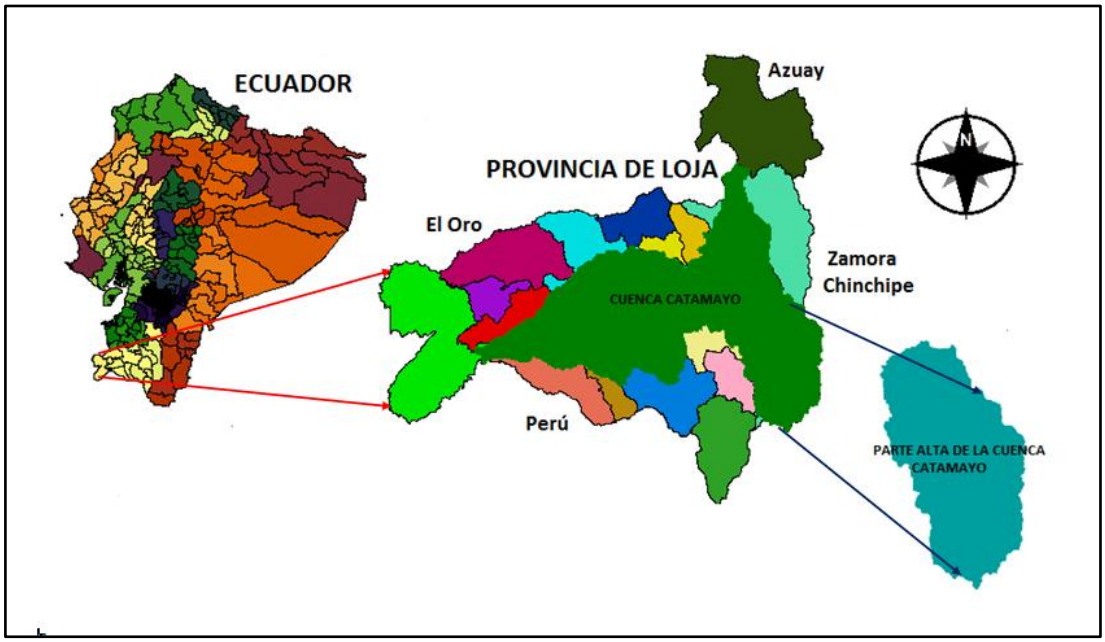


Figura 5. Esquema de localización del área de estudio

4.4.1. Ubicación Ecológica

De acuerdo a la clasificación vegetal de Sierra dentro del área de estudio se han identificado siete ecosistemas: Bosque de neblina montano, Bosque semideciduo montano bajo, Bosque siempreverde montano alto, Matorral húmedo montano, Matorral seco montano, páramo arbustivo y zonas intervenidas (Sierra, 1999)

4.4.2. Análisis Climático

De acuerdo a estudios realizados por el Proyecto Binacional Catamayo-Chira, y con un período de 30 años, establece que el clima en el área de estudio varía notablemente, a los 3 673 msnm la temperatura oscila en 7 °C, y desde los 3 200 a 1 200 msnm la temperatura haciende de 20 a 24 °C. (Proyecto Binacional Catamayo-Chira, 2005)

Las precipitaciones ocurren de octubre a mayo con medias anuales superiores a 1 000 mm. En este mismo sector existen zonas de excepción como son las zonas altas de los cantones de Quilanga y Gonzanamá que corresponden a los límites de la cuenca sur occidental, donde las precipitaciones son constantes, llegando a medias anuales de 1 000 a 2 000 mm. La variación temporal de la evaporación es pequeña pero su variación espacial es grande, oscila entre 6,0 mm/día en la cuenca baja, y hasta 3,0 mm/día en la cuenca alta. (Proyecto Binacional Catamayo-Chira, 2005)

4.5. MÉTODOS

A continuación se describen los procedimientos empleados durante la ejecución del proyecto de investigación, que permitieron obtener, preparar, y analizar la información, que permite cumplir con los objetivos previamente establecidos.

4.5.1. Metodología para "Elaborar una Base de Datos Digitales con la Información Biofísica Existente. Validar e Investigar Nueva Información Relacionada con el Tema de Estudio"

4.5.1.1. Elaboración de la línea base

Se realizó la recolección de los antecedentes necesarios de algunos estudios realizados en la provincia de Loja, y de archivos existentes en la base de datos digitales del Centro Integrado de Geomática Ambiental (CINFA) y del Centro de Recursos Idrisi-Ecuador, de la Universidad Nacional de Loja, está información permite determinar límites políticos, geográficos, poblados, sistemas de drenaje y características topográficas.

4.5.1.2. Generación y validación de información temática

Para determinar las zonas vulnerables a la erosión hídrica en la zona de estudio, se considera la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) compuesta por seis factores (variables).

A continuación se describe toda la información recopilada, validada y empleada en el desarrollo del proyecto, además de la información generada durante la investigación.

Tabla 1. Requerimiento, información secundaria e información procesada, que se necesita y obtendrá en el módulo RUSLE y SEDIMENTATION.

REQUERIMIENTO	INFORMACIÓN SECUNDARIA	INFORMACIÓN PROCESADA	FUENTE
Delimitación de la Cuenca Alta del Río Catamayo	Modelo Numérico de Altitud MNA SRTM	Delimitación de la cuenca en estudio Parámetros morfométricos	Centro de Recursos Idrisi-Ecuador Resolución 400 m
Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE)			
Factor de erodabilidad del suelo	Mapa de edafología de suelo, Resultados de análisis de textura del suelo de la zona de estudio, Laboratorio de Suelos Agua y Bromatología, de la Universidad Nacional de Loja.	Imagen del erodabilidad del suelo (Factor K).	PRONAREG, 2005 Escala: 1:50 000
Factor de precipitación y Escorrentía.	Datos de precipitación en mm de estaciones que influyen en la zona de estudio, con un periodo de 16 años, 1990-2005. ❖ Cajanuma (M-543) ❖ El Tambo (M-759) ❖ Gonzanamá (M-149) ❖ La Argelia (M-033) ❖ Malacatos (M-143) ❖ Nambacola (M-763) ❖ Quilanga (M-241) ❖ Quinara (M-764) ❖ Yangana (M-147)	Interpolación de los promedios totales anuales de precipitación. Imagen de precipitación y escorrentía (Factor R)	INAMHI
Factor de cobertura de suelo	Mapa de cobertura vegetal, y tabla de valores de cobertura vegetal establecidos por USDA 2005.	Reclasificación con valores establecidos por la USDA 2005. Imagen de cobertura de suelo (Factor C)	PRONAREG, 2005 Escala: 1:50 000
Factor de Longitud de pendiente/ Factor de pendientes abruptas	MNA Modelo Numérico de Altitud SRTM, y máscara de la cuenca.	Cálculo de la longitud y ángulo de la pendiente.	Centro de Recursos Idrisi-Ecuador Resolución 400 m
Factor protección de prácticas agrícolas	Tabla de valores de prácticas agrícolas, establecidos por la USEPA 2005	Imagen de protección de prácticas agrícolas, (Factor P)	
RUSLE: Promedio anual de la pérdida de suelo por unidad de área	Aplicación de la ecuación, con los factores descritos anteriormente.	• Imagen pérdida de suelo promedio. • Imagen pérdida total de suelo. • Imagen pérdida de suelo promedio por división. • Imagen de suelo total por división.	
SEDIMENTATION	Imágenes generadas por RUSLE: • Imagen de identificación de las divisiones realizadas de la cuenca • Imagen de la pérdida total de suelo de cada • Modelo Numérico de Altitud MNA.	• Imagen de pérdida de suelo anual neta por área (t/ha/año). • Imagen de Pérdida de suelo anual neta por división (t/año)	

Fuente: Los Autores

Para delimitar la zona de estudio (cuenca hidrográfica) se empleó el Modelo Numérico de Altitud (MNA) SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission), previamente tratada (sin huecos), de la base de datos del Centro de Recursos Idrisi Ecuador, perteneciente al Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja.

La obtención de cada uno de los factores propuestos en la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo (RUSLE), se realizó mediante información secundaria, tomada de la base de datos del Centro Integrado de Geomática Ambiental (CINFA), Centro de Recursos IDRISI Ecuador y estudios realizados por el Proyecto Binacional Catamayo Chira, (2005). Para el desarrollo del factor R se toma datos de precipitación en milímetros (mm) de estaciones meteorológicas que influyen en la zona de estudio, con un periodo de 16 años (1990-2005). Los valores de pendiente y longitud de pendiente, se obtienen mediante fórmulas matemáticas que se aplicaron sobre el MNA y la máscara de la cuenca; para obtener el Factor P de prácticas de conservación se realiza tomando información de las tablas de la USEPA.

4.5.1.3. Delimitación de la cuenca.

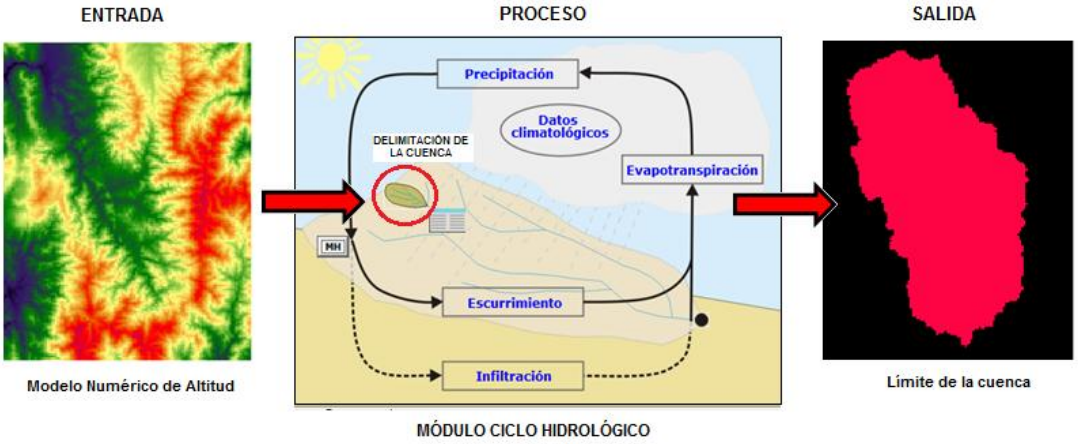


Figura 6. Esquema para delimitar la zona de estudio, Cuenca Alta del Río Catamayo.

Para delimitar la cuenca se necesitó de un Modelo Numérico de Altitud, y la imagen de escurrimiento de la provincia de Loja, esto para localizar (por observación directa) la cuenca en estudio.

Cuando se localiza la cuenca, se procede a definir el punto de interés, que en este caso fue en el río Psicobamba antes de la unión con el río Guayabal, para que el programa delimite la cuenca de manera correcta.

En el módulo Gestión Integral del Agua, necesita como punto al cual se vierten todas las celdas que conforman la cuenca, en la opción cuenca, se procedió a insertar el MNA y el punto de desagüe, de acuerdo a los requerimientos del módulo; se ejecuta y se obtiene la imagen de la cuenca en estudio, en formato raster y vector (ver Figura 17).

4.5.1.4. Parámetros morfométricos

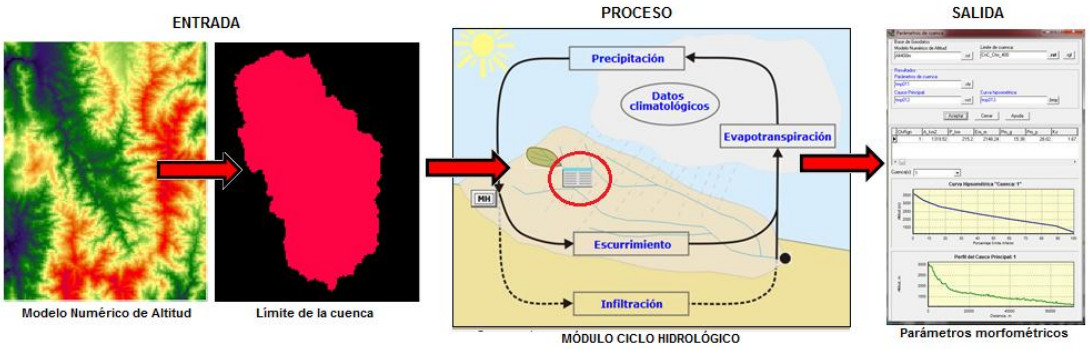


Figura 7. Esquema para obtener parámetros morfométricos, Cuenca Alta del Río Catamayo.

Para determinar los parámetros morfométricos al igual que la delimitación de la cuenca, se utilizó el módulo de Gestión Integral del Agua, en la opción parámetros se agrega el MNA y la delimitación de la cuenca, obteniendo los parámetros morfométricos más importantes, (ver Tabla 9)

4.5.2. Metodología para: "Analizar la Modelación Espacial de la Erosión de la Cuenca con Base en los Módulos RUSLE y SEDIMENTATION del Paquete de SIG IDRISI TAIGA"

Figura 8. Método de implementación para la estimación de erosión y sedimentación.

El esquema de la figura 8, muestra la síntesis de los requerimientos del método implementado para la determinación de proceso de erosión hídrica, dichos procedimientos metodológicos posteriormente de manera conjunta son llevados a la aplicación en los módulos RUSLE y SEDIMENTATION del paquete de SIG IDRISI TAIGA.

Se empleó las unidades del Sistema Internacional (SI) en factores con ecuaciones que así lo requieran, se homogeniza las unidades de los parámetros de valores numéricos y de imágenes digitales en los métodos empleados. Los métodos y las ecuaciones que se utilizó, son las que se ajustan a la información disponible y a la realidad de la zona de estudio.

4.5.2.1. Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE).

La simulación de la erosión hídrica en un SIG se lleva a cabo empleando ecuaciones matemáticas representadas por medio de modelos. Para determinar las zonas vulnerables a erosión hídrica en la Cuenca Alta del Río Catamayo, se empleó ecuaciones que simulan la erosión hídrica bruta de la cuenca en estudio.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) es una ecuación compuesta por siete variables que se describen en la siguiente expresión matemática, ecuación A.1 (USDA, 2005).

$$\mathbf{A} = \mathbf{R} * \mathbf{K} * \mathbf{L} * \mathbf{S} * \mathbf{C} * \mathbf{P} \qquad \text{(A.1)}$$

Dónde:

A = promedio anual de pérdida de suelo por unidad de área (ton/ ha año).

R = factor de precipitación y escorretía (MJ mm/ha hr año).

K = factor de erodabilidad del suelo (ton ha hr/ha mm MJ).

L = factor de longitud de pendiente (adimensional).

S = factor de pendientes abruptas (adimensional).

C = factor de coberturas del suelo (adimensional).

P = factor de protección de prácticas agrícolas (adimensional).

4.5.2.2. Factores requeridos en la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE).

Al utilizar el módulo RUSLE para estimar la producción de la erosión bruta de la Cuenca Alta del Río Catamayo se requiere de una serie de parámetros (imágenes), y de valores numéricos requeridos e introducidos al módulo para su ejecución, tal como se muestra el esquema de la figura 9.

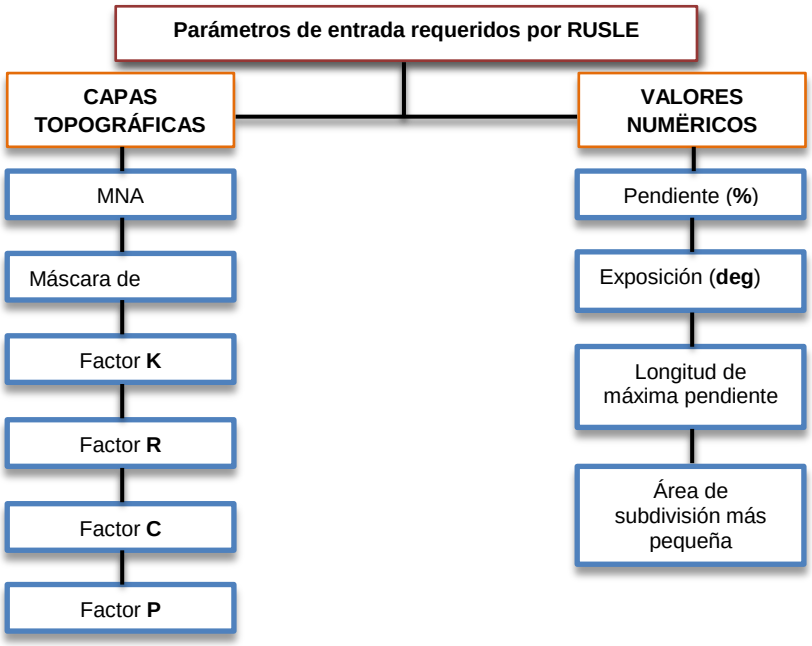


Figura 9. Parámetros requeridos por RUSLE

Los resultados obtenidos de la estimación de la pérdida de suelo con la ecuación RUSLE, es la cantidad de sedimento perdido por el perfil del suelo, y no la cantidad de sedimento que sale de la cuenca. RUSLE es una ecuación que permite estimar el promedio de la pérdida de suelo anual para las condiciones existentes, también simula los cambios de uso de suelo, de clima y cambios en las prácticas de conservación y manejo, permitiendo estimar la afectación de estos cambios a la pérdida del recurso suelo.

a. Generación del factor de erodabilidad del suelo (K)

Para determinar el factor K, se adquirió la imagen de edafología (PRONAREG, 2005), de la base de datos digitales del (CINFA); que sea representativa y que abarque la Cuenca Alta del Río Catamayo, con el fin de constatar que tipos de suelos son los que predominan en el área de estudio. En la figura 10, especifica los diferentes tipos de suelo representativos de la zona.

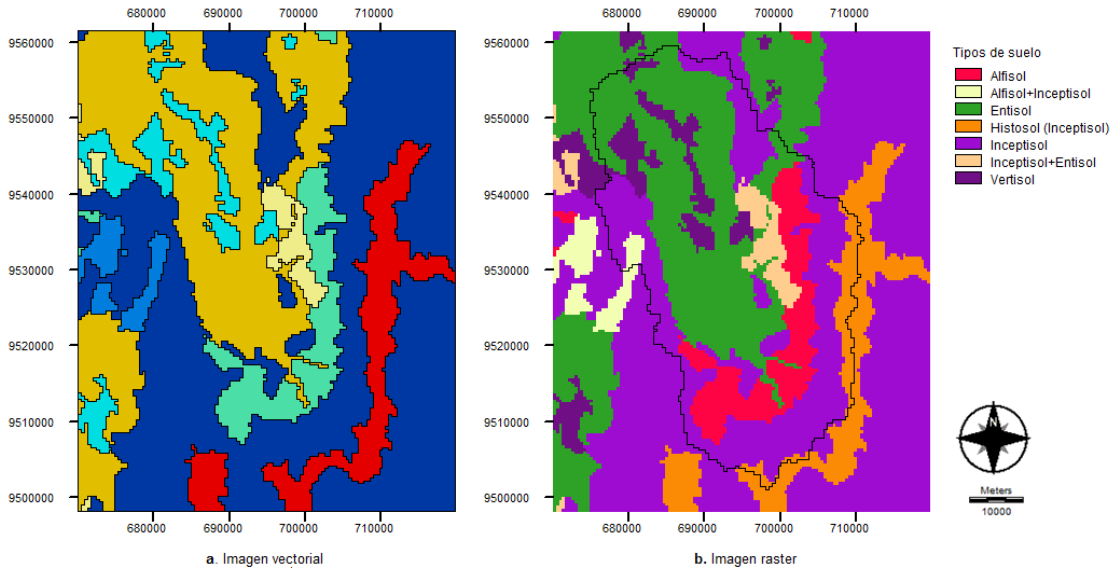


Figura 10. Imágenes de edafología de la Cuenca Alta del Río Catamayo (PRONAREG, 2005).

De la información existente en el Laboratorio de Suelos, Agua y Bromatología, del Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, de la Universidad Nacional de Loja se recopiló información sobre análisis de textura, porcentaje de materia orgánica (MO), estructura granular (S) y tipo de permeabilidad (P), que prevalecen en la zona de estudio; esta es una de las maneras más comunes de disposición de datos de análisis de suelos. En la tabla 2, se describe cada uno de los porcentajes y valores.

Tabla 2. Textura, materia orgánica, estructura granular y permeabilidad prevalecientes en los suelos de la Cuenca Alta del Río Catamayo, 2005.

CÓDIGO	Tipo de suelo	% Lo	% Ao	% Ac	% MO	S	P
1	Alfisol	39.74	29.03	25.28	5.95	4	3
2	Alfisol+Inceptisol	63.5	16.56	19.28	0.66	4	3
3	Entisol	42.52	30.78	25.4	1.3	4	3
4	Inceptisol	71.26	15.66	3.94	9.14	4	3
5	Histosol (Inceptisol)	70.13	19.28	3.28	7.31	3	4
6	Vertisol	42.12	24.72	30.96	2.2	4	4

Fuente: Los Autores

Estos datos son requeridos por las ecuaciones B1 y B2 para el cálculo del factor K, mediante la aplicación del icono calculadora de imagen, incorporado en el programa IDRISI TAIGA. Se empleó la ecuación desarrollada por Wischmeier y Smith (1978), pues este método de cálculo permite emplear los datos obtenidos de laboratorio en el análisis de suelos, la cual se describe a continuación:

$$K = \frac{1}{7.574} \cdot \frac{\left[2.1 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - MO) \cdot 10^{-4} + 3.25 \cdot (s-2) + 2.5(P-3)\right]}{100} \qquad \text{(B.1)}$$

Dónde:

K = factor de erosividad del suelo (ton ha hr/ha MJ mm)

MO = materia orgánica (%)

s = tipo de estructura granular del suelo

p = tipo de permeabilidad

M = es el producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias del suelo.

Para obtener **M** se emplea la siguiente ecuación B.2

$$\mathbf{M} = (\%\text{limo} + \%\text{arena}) \cdot (100 - \%\text{arcilla}) \qquad \text{(B.2)}$$

b. Generación del factor de precipitación y escorrentía (R)

Para obtener el factor de precipitación y escorrentía, Se debería tomar datos de intensidad de la lluvia; pero debido a la complejidad y escasez de esta información, se ha optado por correlacionar los datos de precipitación anual (erosividad de la lluvia) con las ecuaciones desarrolladas por Renard y Freimund (1994)

Se toma en cuenta datos de precipitación (mm), un total de nueve estaciones meteorológicas, que registran un periodo de 15 años desde 1990 a 2005, de las estaciones climatológicas presentes dentro y fuera de la zona de estudio

A continuación se describe la información existente de cada estación presente en la zona de estudio, dichos valores fueron tomados de la tesis: “Estudio de la variabilidad

espacial y temporal de la precipitación y temperatura, ligado al cambio climático en la provincia de Loja". (Chamba y Chuncho, 2011).

Tabla 3. Estaciones meteorológicas, precipitaciones medias y promedio total que influyen en la Cuenca Alta del Río Catamayo, 1990 a 2005.

Código INAMHI	Estaciones Meteorológicas	Coordenadas N	E	Precipitación Media (mm)	Promedio Total (mm)
33	La Argelia	9553464	699403	947.5	**1008.9**
143	Malacatos	9533892	691965	764.0	
147	Yangana	9516982	702487	1054.0	
149	Gonzanamá	9532642	674205	1130.0	
241	Quilanga	9524366	677664	1224.0	
543	Cajanuma	9548762	699492	1164.6	
759	El Tambo	9549532	688727	909.1	
763	Nambacola	9542159	673845	1019.0	
764	Quinara	9530749	694978	868.1	

Fuente: Los Autores

En la tabla 3, únicamente se muestran los códigos de las estaciones propuestos por el INAMHI, nombre, coordenadas UTM, además, de la precipitación media (valor promedio de los 15 años por estación) y promedio total; que se obtiene de las precipitaciones medias a través de las estaciones, la base de datos original constan valores de precipitación mensual y anual (ver anexos).

La imagen compuesta de la figura 11, muestra la distribución espacial de las estaciones climatológicas contempladas en la zona del estudio, en cada punto se localiza una estación climatológica representando su código (Cdg), la imagen está ligada al promedio anual de precipitación (Prpm) de los 15 años de registro de esa estación, tal como se muestra a continuación.

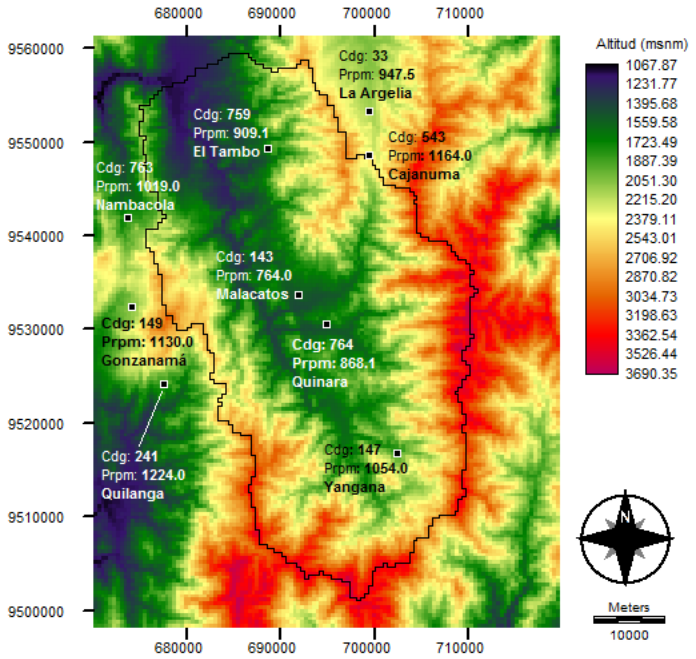


Figura 11. Distribución espacial de las estaciones climatológicas de la zona de estudio.

Después de obtener el promedio anual de precipitación registrada durante los 15 años para cada estación climatológica, se aplicó el módulo Interpol, con la finalidad de obtener una imagen superficial de distribución de la lluvia de la Cuenca Alta del Río Catamayo. La imagen generada por esté método se muestra a continuación.

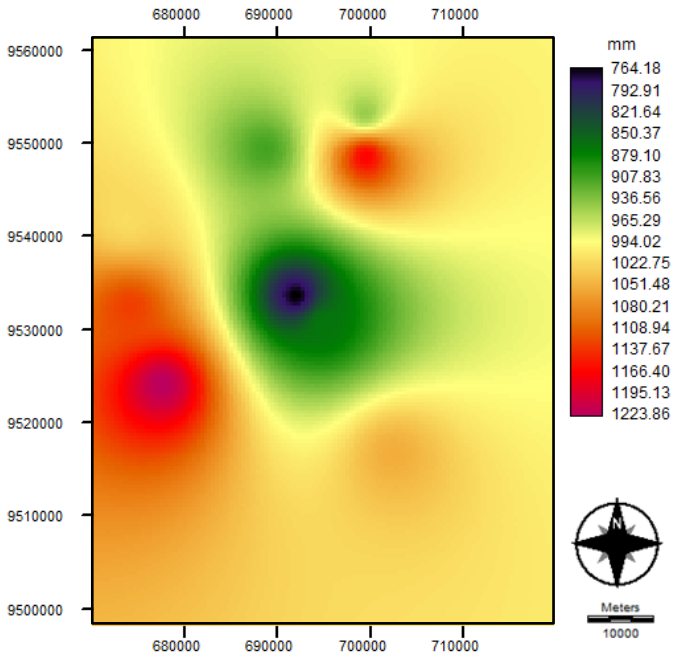


Figura 12. Imagen superficial de precipitación de la zona de estudio.

Con el valor obtenido de la imagen superficial de distribución de la lluvia, se registró un promedio de 1008.9 mm, se procedió a aplicar la ecuación C.1, debido a que los valores promedios anual de precipitación son mayores a 850 mm. La ecuación establecida por Renard y Freimud (1994) permite obtener los valores de R, la cual se describen a continuación:

$$\mathbf{R} = 587.8 + 1.249 * \mathrm{Pa} + 0.004105 * \mathrm{Pa}^2 \qquad \mathrm{Pa} > 850\ \mathrm{mm} \qquad \text{(C.1)}$$

Dónde:

R = factor de erosividad (MJ mm/ ha hr año)

Pa = precipitación total anual (mm)

Estos procedimientos se ejecutan en el icono calculadora de imagen que se encuentra incorporado en el programa de SIG IDRISI TAIGA.

c. Generación del factor de cobertura del suelo (C)

Para calcular el factor C, se adquirió la imagen de cobertura de suelo (PRONAREG, 2005), de la base de datos digitales del Centro Integrado de Geomática Ambiental (CINFA); dicha imagen tiene que ser representativa y que abarque la Cuenca Alta del Río Catamayo. Con el fin de detallar los cultivos agrícolas existentes en la zona de estudio se tomó como referencia información de zonificación existente en el Proyecto Binacional Catamayo-Chira. En la figura 13, se muestran los diferentes tipos de cobertura vegetal representativos de la zona.

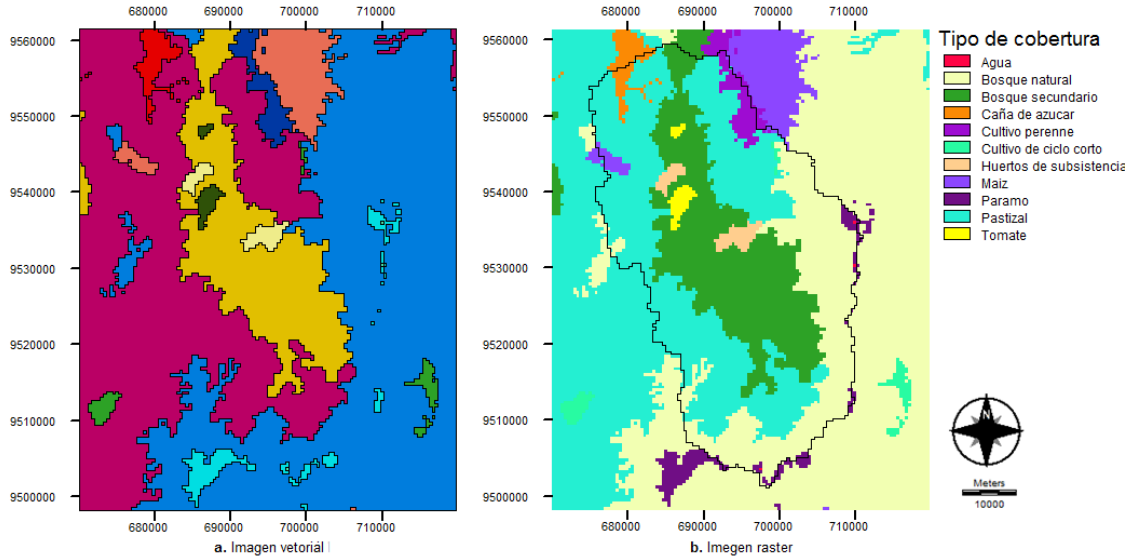


Figura 13. Imágenes de cobertura del suelo de la Cuenca Alta del Río Catamayo (PRONAREG, 2005).

Para generar el factor C, finalmente se procede asignar valores a la figura 13.b según el tipo de cobertura vegetal y uso del suelo, los valores asignados a cada clase de cobertura se presentan en la tabla cuatro. Los valores C de cobertura de suelo (tabla 4) fueron tomados de tablas generadas por la USDA, 2005.

Tabla 4. Valores del factor C en base al tipo de cobertura de suelo.

Cdg	COBERTURA	FACTOR C
1	Agua	0
2	Bosque Natural	0.003
3	Bosque Secundario	0.007
4	Caña de azúcar	0.263
5	Cultivo Perenne	0.079
6	Cultivo de ciclo corto	0.300
7	Huertos de Subsistencia	0.900
8	Maíz	0.620
9	Paramo	0.004
10	Pastizales	0.013
11	Tomate	0.502

Fuente: FAO, Revista Agronomía Costarricense, 2009.

d. Generación de factor de protección de prácticas agrícolas (P)

El factor P se establece mediante el análisis de información establecido por la USDA, (2005); donde manifiesta que los valores de P cercanos a 0 mantienen gran eficiencia en la obra o práctica seleccionada y si el valor es cercano a 1, entonces la eficiencia de la obra para reducir la erosión es baja. Los valores de P que se utiliza para diferentes prácticas de conservación del suelo. La tabla 5 se muestra algunas prácticas de conservación de suelo más frecuentemente empleadas así como sus respectivos valores (PNUMA, 2000).

Tabla 5. Prácticas de conservación del suelo.

Tipo de práctica	P
Surcado al contorno	0.75-0.90
Surcos rectos	0.80-0.95
Franjas al contorno	0.60-0.80
Terrazas (2-7% de pendiente)	0.50
Terrazas (7-13% de pendiente)	0.60
Terrazas (mayor de 13%)	0.80
Terrazas de banco	0.10
Terrazas de banco en contra pendiente	0.05

Fuente: USDA, 2005.

La generación de factor P, se realizó creando un cuadro de imagen del tamaño de los demás factores, con el valor de 1, debido a que en la zona de estudio no se realiza ningún tipo de prácticas de conservación de uso del suelo durante el desarrollo de las actividades agrícolas.

e. Generación de parámetros numéricos

Los parámetros numéricos requeridos por RUSLE se estiman empleando el MNA de la cuenca, su área y la resolución de píxel empleado en las imágenes generadas o adquiridas en el desarrollo de la investigación.

- **Generación de los parámetros de pendiente y exposición**

Los parámetros numéricos de pendiente y exposición, se obtienen multiplicando la imagen del MNA de la zona de estudio con la imagen del límite de la cuenca (máscara); dichas imágenes son procesadas en los módulos de exposición (aspect) y pendiente (slope). En la figura 14, se muestra el esquema utilizado para determinar los parámetros de pendiente y exposición.

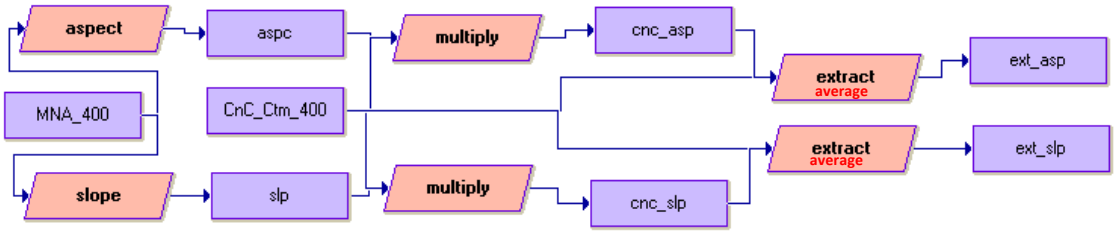


Figura 14. Esquema utilizado en Macromodelo para determinar los parámetros de exposición y pendiente

- **Determinación de la longitud de pendiente máxima**

Para determinar la longitud de pendiente máxima es necesario conocer el tamaño de pixel empleado en las imágenes, a continuación se describe la ecuación usada.

$$\mathbf{L} = (\mathrm{Trp}^2 + \mathrm{Trp}^2)^{1/2}$$

Dónde:

L= Longitud de pendiente

Trp= Tamaño de resolución de pixel

- **Cálculo de tamaño de división más pequeña de la cuenca**

Para calcular el tamaño de división más pequeña al cual el módulo RUSLE subdividirá la cuenca se realizó dividiendo el área de la zona de estudio entre 7 150 divisiones que es el área establecida por el usuario, el resultado obtenido no deberá sobrepasar de 32 000 divisiones que es la restricción de operación del modelo, esto evitara tener inconvenientes a la hora de ejecutar la operación.

4.5.2.3. Factores requeridos por el módulo de SEDIMENTATION

Se empleó el módulo SEDIMENTATION con el fin de simular los procesos de sedimentación y producción de sedimentos en una cuenca y que son transportados por la escorrentía. Se debe obtener imágenes resultado de la ejecución del módulo RUSLE. En la figura 18, muestra el esquema de los parámetros de entrada

requeridos por el módulo de SEDIMENTATION para realizar el análisis a nivel de cuenca.

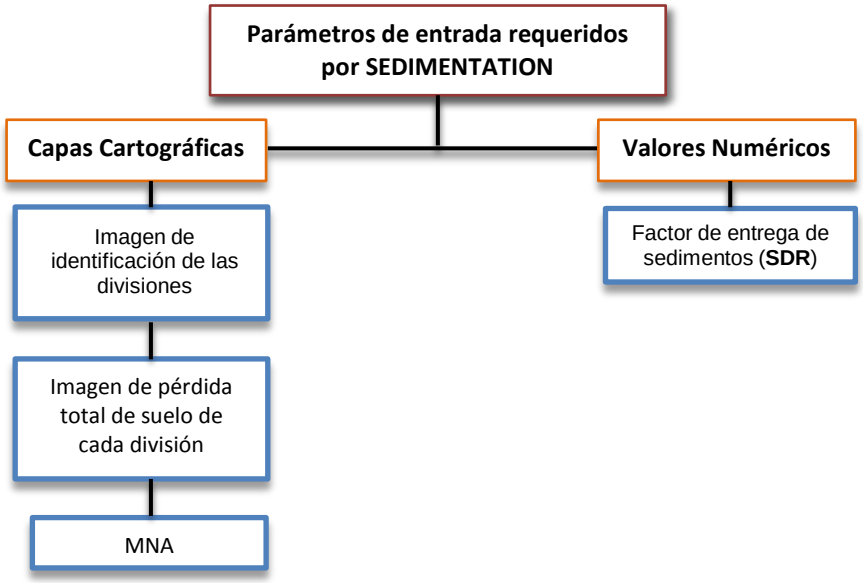
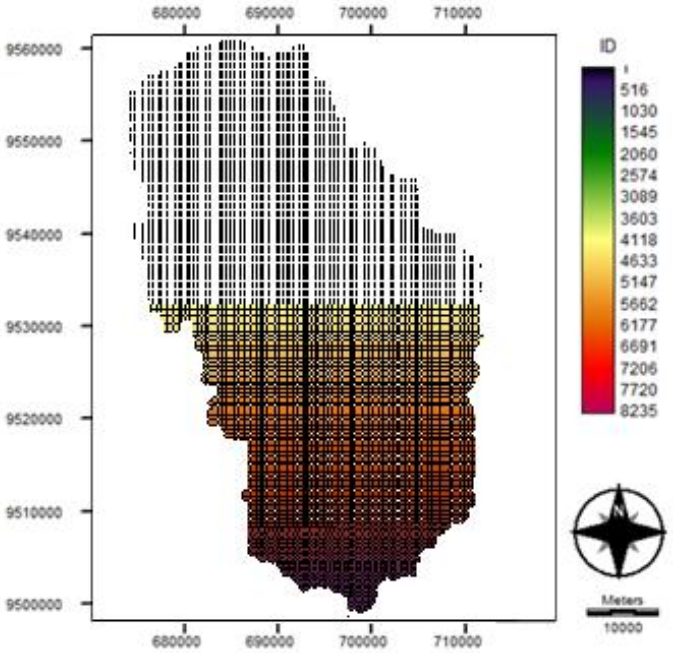
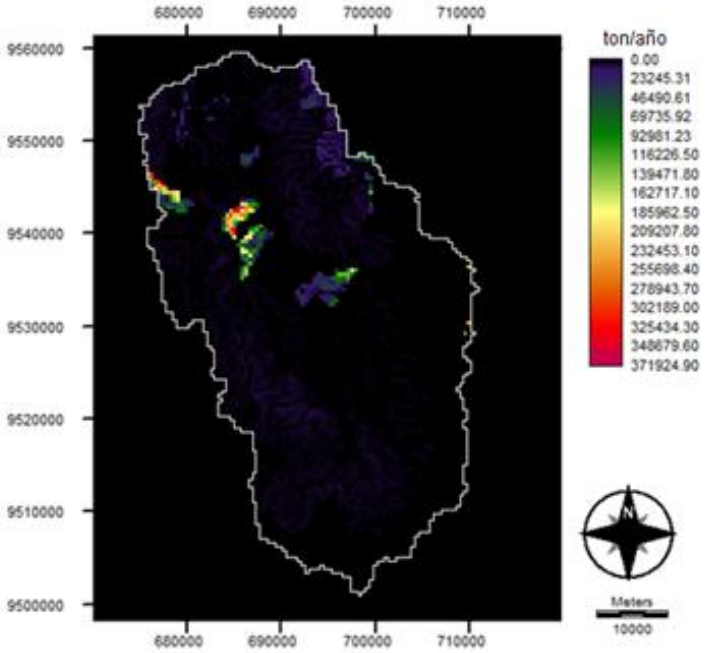


Figura 15. Parámetros requeridos por el módulo SEDIMENTATION

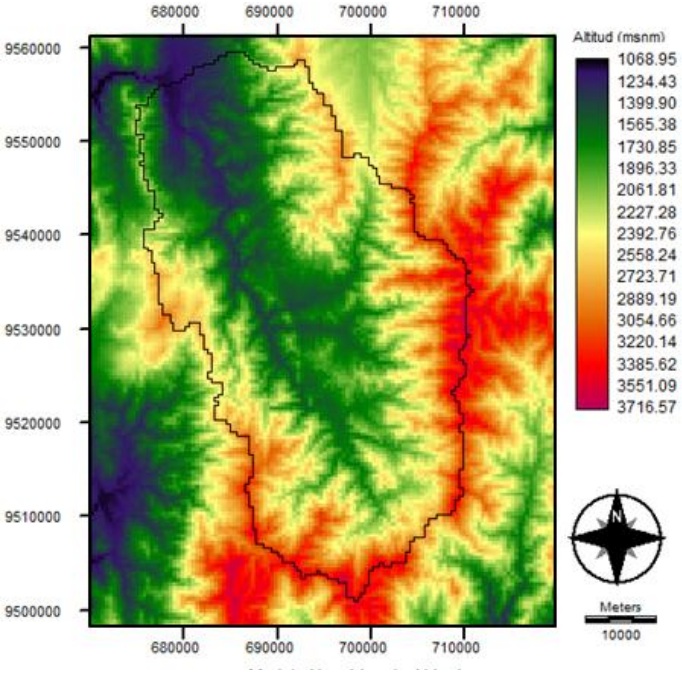
Las imágenes que requiere el módulo SEDIMENTATION para su ejecución son las imágenes que resultaron de la ejecución del módulo RUSLE, las cuales son: *imagen de identificación de las divisiones realizadas de la cuenca* e *imagen de la pérdida total de suelo de cada división* y el Modelo Numérico de Altitud (MNA). Las imágenes requeridas para la ejecución módulo se muestran a continuación:



a. Identificación de cada subdivisión de la cuenca



b. Pérdida total de suelo por división de la cuenca



c. Pérdida total de suelo por división de la cuenca

Figura 16. Imágenes de entrada requeridas por el módulo de SEDIMENTATION.

a. Determinación del factor de entrega de sedimentos (SDR)

Para determinar el factor de entrega de sedimentos (SDR), que representa la relación del sedimento que efectivamente alcanza el punto de análisis (salida de la cuenca) y la cantidad de sedimento producido por la erosión superficial. Se expresa el SDR como una función exclusiva del área de la cuenca y es menor a uno (Strahler, 1952)

Para estimar la entrega de sedimentos se calculó mediante la ecuación de Vanoni, esta ecuación se empleó en países en vías de desarrollo, pues se deriva de datos de aproximadamente 300 cuencas hidrográficas distribuidas en diferentes partes del mundo (Ouyang y Bartholic, 1997), a continuación se describe la fórmula a utilizar.

$$\mathbf{SDRI} = 0.47 * \mathrm{Fi}^{-0.12}$$

Dónde:

Fi= área de la cuenca en análisis (km^2)

4.5.3. Metodología para: "Constatar los Resultados Obtenidos del Modelo RUSLE y SEDIMENTATION en SIG en el Campo"

Para verificó en campo las zonas potencialmente vulnerables a erosión hídrica se tomó como referencia la imagen *promedio potencial de la erosión* y la imagen de *pérdida del suelo promedio por división*, que se obtiene al ejecutar el módulo RUSLE. Se procedió a señalar puntos de ubicación, con valores altos, medios y bajos guiados por la cantidad de suelo por hectáreas que se pierde anualmente; resultado que se contrastó con una salida de campo, las zonas señaladas se exponen a continuación:

Para ello se procedió a recorrer el área de estudio de la Cuenca Alta del Río Catamayo, donde se determinan zonas de ensayo con la finalidad de corroborar en campo los resultados obtenidos en SIG, mediante observación directa.

Tabla 6. Puntos GPS, para comprobación en campo.

COORDENADAS		UBICACIÓN
X	Y	
707477	9520220	Parte alta
695985	9506321	
685550	9542592	Parte media
685124	9540525	
694129	9535172	
697164	9535767	
677531	9555832	Parte baja

Fuente: Los Autores.

En la tabla 6, se muestran los puntos GPS establecidos mediante consenso entre director de tesis, asesor y tesistas con la finalidad de verificar cualitativamente en campo los resultados obtenidos de la imagen de pérdida de suelo por división de la cuenca (zonas vulnerables a erosión hídrica).

Con GPS se referenció las distintas zonas identificadas, se realizó la medición de altitud, se procede a introducir el barreno en el suelo haciéndolo girar hasta que tope con material grueso (roca parental) que no permita su paso. Luego se procedió a medir con el flexómetro desde la punta del barreno hasta la parte donde se introdujo, para obtener un valor estimado de la profundidad del suelo, se realizó tres replicas en diferentes puntos de la zona de estudio, para de esta manera obtener un valor promedio el cual será el valor a registrar.

Para determinar el valor de pendiente en porcentaje se observó dentro del clinómetro hacia un punto de referencia, el clinómetro posee un nivel, el mismo que al observar el objeto de referencia, se ubica la burbuja en el hilo horizontal, se procedió a tomar la

medida de la pendiente calculada. Los valores obtenidos se calificaron de acuerdo a los parámetros establecidos por la FAO, (1985) que se describen a continuación:

Pendiente %	**Clasificación**
0-2	Llano
2-6	Suavemente inclinado
6-13	Inclinado
13-25	Moderadamente escarpado
25-55	Escarpado
> 55	Muy escarpado

Se caracterizó la cobertura vegetal de los distintos lugares a visitar, se identificaron las especies más representativas de cada estrato con su nombre vulgar y científico.

Mediante observación directa de la superficie del suelo se verificó el tipo de erosión existente, tomando aspectos como el volumen de cobertura vegetal, evidencia física reflejada en el terreno y la magnitud de la pendiente de cada sitio. Se procedió a clasificar de acuerdo a parámetros establecidos por la FAO, (1985).

Erosión Hídrica
- Laminar
- En surcos
- En Cárcavas

4.5.4. Metodología el Cuarto Objetivo para: "Proponer Alternativas Adecuadas de Manejo y Uso del Suelo Mediante el Paquete de SIG IDRISI"

Para determinar las alternativas de manejo y uso del suelo de una manera sustentable se realizó modificaciones en el factor C de cobertura vegetal del suelo y en el factor P de prácticas agrícolas de conservación, en zonas críticas.

Se modificó el factor C, tomando en cuenta las áreas de cultivos agrícolas que presentan riesgo de erosión y que los valores de estos sean cercanos a 1 (sin cobertura vegetal), se procedió a remplazar estos valores con vegetación que presente menos porcentaje de erosión. Obtenido esto se procedió a reclasificar, para así

ejecutar el módulo RUSLE. A continuación en la siguiente tabla, se describe los valores modificados.

Tabla 7. Valores del factor C, modificado en base al tipo de cobertura de suelo.

Cdg	COBERTURA	FACTOR C	COBERTURA MODIFICADA	FACTOR C MODIFICADO
1	Agua	0	Agua	0
2	Bosque Natural	0.003	Bosque Natural	0.003
3	Bosque Secundario	0.007	Bosque Secundario	0.007
4	Caña de azúcar	0.263	Caña de azúcar	0.263
5	Cultivo Perenne	0.079	Cultivo Perenne	0.079
6	Cultivo de ciclo corto	0.300	Cultivo de ciclo corto	0.300
7	Huertos de Subsistencia	0.900	Huertos de Subsistencia asociado	0.300
8	Maíz	0.620	Vegetación Natural	0.012
9	Paramo	0.004	Paramo	0.004
10	Pastizales	0.013	Pastizales	0.013
11	Tomate	0.502	Tomate	0.502

Fuente: FAO, Revista Costarricese, 2009.

Para modificar el factor P, se cambió las actividades agrícolas inadecuadas con valor de 1 (sin práctica de conservación), para reclasificar de acuerdo a la tabla establecida por la USDA, (2005) de prácticas de conservación del suelo, en este caso se estableció en pendientes que oscilen entre 13-25 %. Con la imagen resultante se procede ejecutar el módulo RUSLE.

A continuación en la siguiente tabla, se describe los valores que serán modificados.

Tabla 8. Valores de prácticas de conservación del suelo modificado (USDA, 2005).

TIPO DE PRÁCTICA	FACTOR P	TIPO DE PRÁCTICA	FACTOR P MODIFICADO
Sin práctica de conservación	1	Terrazas (mayor de 13%)	0.8
		Terrazas de banco (< 25 %)	0.1

Fuente: Los Autores.

Finalmente se ejecutó el módulo con los factores C y P modificados (al mismo tiempo), para posterior comprobación con los resultados anteriores. Con el fin de determinar con cuál de las tres ejecuciones y factores modificados disminuye la erosión. Para dar alternativas que permitan potencializar y desarrollar programas encaminados al mejoramiento y conservación de estos recursos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. ELABORACIÓN DE UNA BASE DE DATOS DIGITAL CON LA INFORMACIÓN BIOFÍSICA EXISTENTE. VALIDAR E INVESTIGAR NUEVA INFORMACIÓN RELACIONADA CON EL TEMA DE ESTUDIO

5.1.1. Características Morfométricas de la Cuenca Alta del Río Catamayo.

En el tabla 9, muestra los resultados de las características morfométricas de la cuenca Alta del Río Catamayo, generados con el módulo de parámetros de "ciclo del agua" que contiene el SIG Idrisi-Taiga. (Franco, 2008).

Tabla 9. Características morfométricas de la Cuenca Alta del Río Catamayo.

SIGLAS	PARÁMETRO	VALOR
A_km^2	Área (km^2)	1 318.7
P_km	Perímetro (km)	225.6
Em_m	Elevación media (msnm)	2 147.1
Pm_g	Pendiente media de la cuenca (g)	21.6
Pm_p	Pendiente media (%)	40.9
Kc	Índice o coeficiente de compacidad	1.7
Rci	Radio o relación de circularidad	0.3
Rh	Curva hipsométrica	1.4
Lc_km	Longitud del eje del río principal (km)	76.8
La_km	Longitud directa del río (km)	53.2
Sh	Coeficiente de sinuosidad hidráulico	1.4
Emx_m	Elevación máxima del río principal (msnm)	3 001.2
Emn_m	Elevación mínima del río principal (msnm)	1 129.3
Sc	Pendiente promedio del río principal (%)	2.4
Tc_kirpich_h	Tiempo de concentración en horas	7.8
Tc_CHPW_h	Tiempo de concentración en horas	7.8

Fuente: Módulo Ciclo del Agua, SIG Idrisi-Taiga.

En la tabla 9, se describen las características morfométricas de la Parte Alta de la Cuenca del Río Catamayo que abarca una superficie de 1 318.7 km^2 que corresponde al 18.30 % de área total de la cuenca Catamayo.

Según el INEFAN, (1993) considera a la zona de estudio como cuenca debido a que se encuentra dentro de los rangos (1 000 a 3 000 km^2), posee un perímetro de 225.6 km, el coeficiente de compacidad encontrado fue de 1.75 que define a la cuenca como “oblonga-rectangular” de acuerdo a los rangos establecidos por la FAO (1985); lo que indica un menor tiempo de concentración de la cantidad de agua dentro del área de la cuenca y sus escurrimientos pueden ser desalojados por cauces de mayor magnitud; es decir que existe poca susceptibilidad a concentrar crecidas.

La delimitación de la cuenca permite obtener los parámetros morfométricos descritos en la tabla anterior, en la figura 17, Se observa el límite de la zona de estudio, rio principal, desembocadura y altitud en msnm.

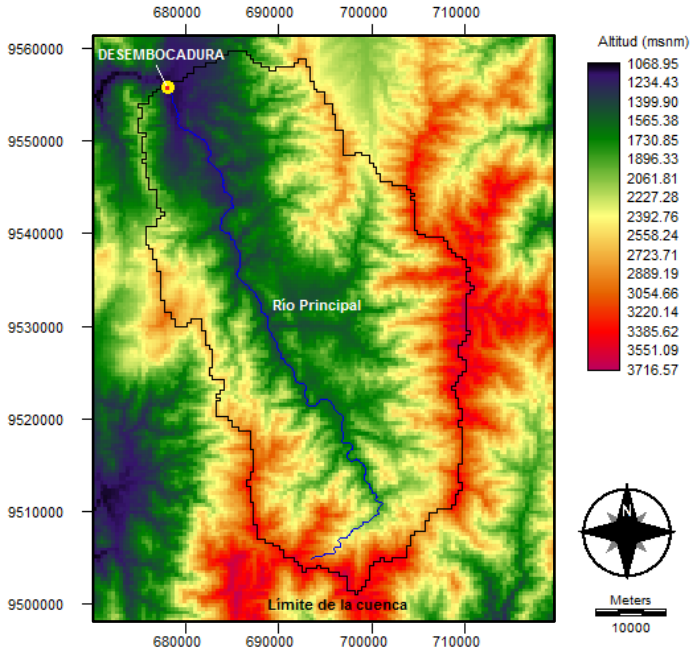


Figura 17. Imagen del MNA, límite de cuenca, río principal y desembocadura de la Cuenca Alta del Río Catamayo.

En esta imagen se puede observar la altitud de la cuenca ya descrita, el punto de desagüe, que fue el eje fundamental para la selección de la cuenca, y los que esta posee.

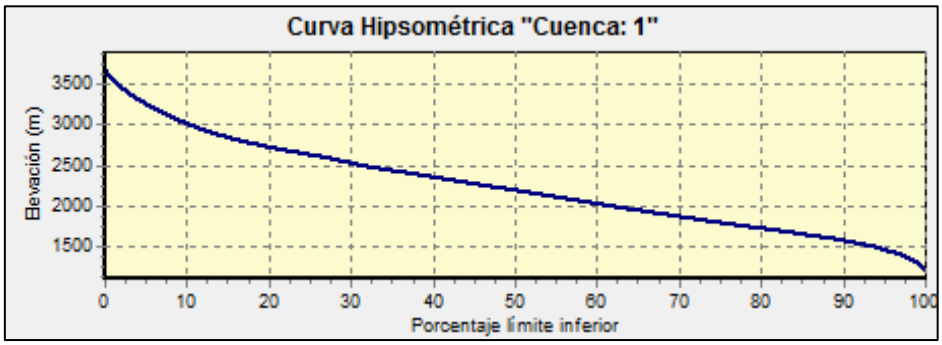


Figura 18. Curva hipsométrica de la Cuenca Alta del Río Catamayo

La figura 18, representa la curva hipsométrica de la cuenca, se evidencia que la cuenca se encuentra en etapa de equilibrio, ya que su pendiente es de 40.9 %; es una cuenca geológicamente madura de pie de montaña, con efecto de erosión geológica natural elevada; predominando el transporte de sedimentos (Silva, 1999). Al tener una pendiente débil revela un valle encajonado. (Londoño, 2001).

La altura mínima y máxima de la cuenca oscila entre 1 100 a 3 650 msnm, lo que se podría interpretar que entre mayor altitud, más riesgo de que exista erosión, sobre todo comenzando desde los 2 150 msnm en adelante, pero se podría descartar en el punto alto, por existir vegetación abundante. Desde los 2 150 msnm es posible que exista erosión debido a que su vegetación es escasa, existen precipitaciones constantes y prácticas agrícolas inadecuadas.

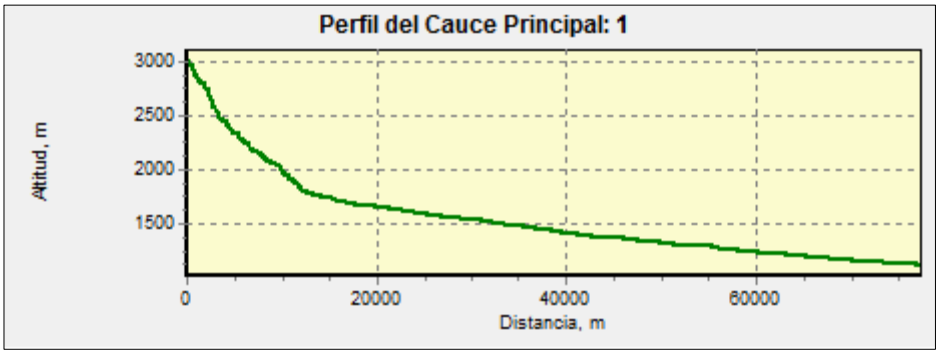


Figura 19. Perfil de cauce principal de la Cuenca Alta del Río Catamayo.

En la figura 19, se observa la pendiente del cauce principal de la cuenca. La elevación máxima del rio principal es de 3 001.2 m, y su altitud mínima 1 129.3 m y una pendiente del rio de 2.4 %. Desde los 3 001.28 m hasta aproximadamente los 1 800, existe una pendiente fuerte de aproximadamente 50 grados; por lo que se convierte peligrosa en ocasiones de precipitación ya que su torrente es acelerado; menos de los 1 800 msnm se torna suave el torrente permitiendo que aporte este rio a otros afluentes aguas abajo.

En este rango altitudinal se localizan los poblados de Cajanuma, Quebrada Honda, Pedro Aldar, Botijas, Guayquicuma, Yangana y Masanamaca. A partir de los 1 800 a 1 200 msnm la pendiente del cauce se torna leve (pendiente de 14 grados) y la rapidez del torrente disminuye, se encuentran en este rango altitudinal los siguientes poblados: Vilcabamba, Malacatos, Indiucho, La Era y Catamayito.

La cuenca tiene definidos sus cauces principales y cuenta con pocos tributarios de gran longitud, es de suponer que el tiempo transcurrido desde que cae una gota de lluvia hasta que salga por el desagüe principal debe ser rápido, lo que se comprueba por el tiempo de concentración: 7.8 horas. Díaz *et al.* (1999) mencionan que tiempos menores de 40 horas corresponden a un desalojo de agua veloz, aunque esta relación no corresponde fielmente a lo que se presenta en la realidad, además de que el tiempo de concentración no es constante (Mantilla *et al.,* 2005), ya que depende de la intensidad de la precipitación.

5.2. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN POTENCIAL (CRUDA Y NETA) DE LA CUENCA CON BASE EN LOS MÓDULOS RUSLE Y SEDIMENTATION DEL PAQUETE DE SIG IDRISI TAIGA

5.2.1. Factores del RUSLE

5.2.1.1. Factor K

La imagen de la figura 20, representa el factor de erodabilidad del suelo, los valores estimados del factor K de la cuenca que se observan en la imagen oscilan desde 0.032 a 0.063 (ton ha hr/ha MJ mm), valores bajos según la USDA, 2005, lo que indica, que los suelos de la cuenca son moderadamente susceptibles al desprendimiento y producen moderados escurrimientos, (erosividad), debido a que presentan textura fina con alto contenido de limo. (Peláez, 1999)

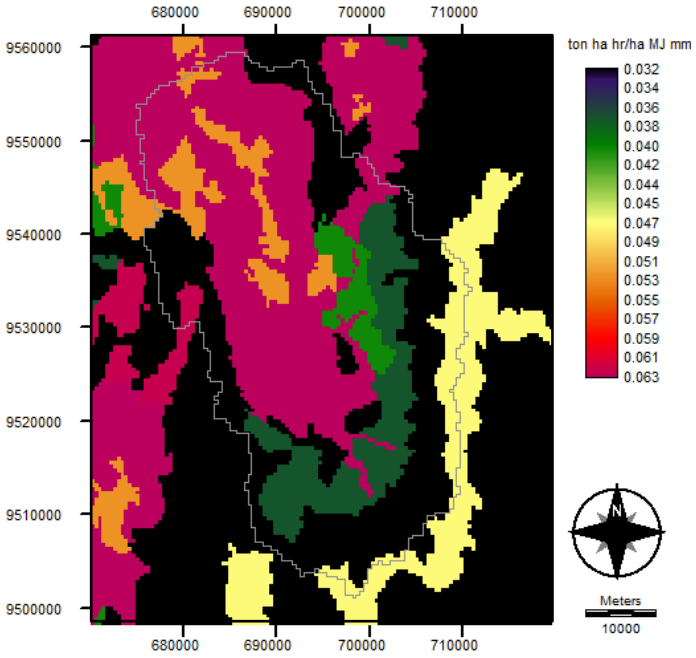


Figura 20. Imagen del factor K de la Cuenca Alta del Río Catamayo.

La parte alta de la Cuenca del Río Catamayo posee valores K de 0.032 a 0.037 que corresponden a tierras con vegetación boscosa nublada, con abundante materia orgánica (MO), esto permite que reduzca la erodabilidad, porque reduce la

susceptibilidad del suelo al desprendimiento e incrementa la infiltración, disminuye la escorrentía y erosión. Abarca una superficie de 617 km^2 que equivale al 46 % del área total de la zona de estudio.

Los valores entre 0.040 a 0.062, se ubican en la parte media y baja de la cuenca con una superficie de 545 Km^2 que corresponde al 41 % del área total, suelos con vegetación boscosa secundaria, bosque semideciduos, e intervención mayor con uso ganadero (potreros) y zonas agrícolas (cultivos anuales y perennes), actividades que favorecen a los procesos de erosión, estos suelos poseen textura equilibrada y bajo contenidos de materia orgánica MO.

5.2.1.2. Factor R

El factor de erosividad de la lluvia (R) se calcula para el área de estudio, se representa en la figura 21, con valores de R que oscilan entre 2 030 a 5 207 MJ mm/ha hr año.

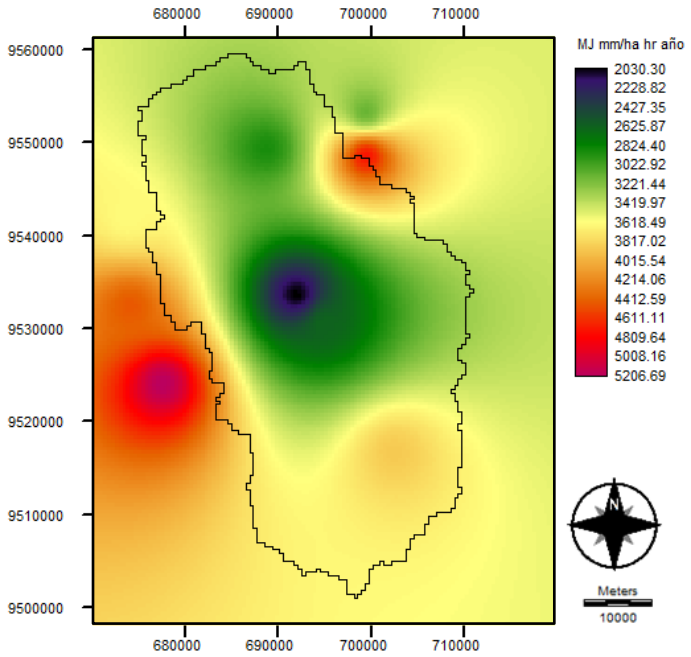


Figura 21. Imagen del factor R de la Cuenca Alta del Río Catamayo.

Según la clasificación del rango del grado de erosividad de la USDA (2005), los valores de R que varían de 3 000 a 8 263 MJ mm/ha hr año, presentan grado de erosividad alto.

El impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial son agentes externos que disgregan las partículas de suelo y provocan su transporte. Una vez que la capacidad de infiltración y de almacenamiento superficial del suelo está satisfecha, comienza el escurrimiento, arrastrando las partículas sueltas por la energía cinética de las gotas de lluvia y lo que la fuerza del escurrimiento disgrega. La capacidad de transporte está directamente relacionada a la velocidad y turbulencia del flujo. (Oñate, 2006)

En la parte sur-occidental, que corresponde al límite de la cuenca (zonas altas), muestra un valor de erosividad de 5 207 MJ mm/ha hr año, debido a que las precipitaciones en estos sectores son constantes. Aquí se ubican los cantones de Quilanga y Gonzanamá.

En el nudo de Cajanuma (divisorio de aguas) en la parte nororiental, límite del área de estudio con la ciudad de Loja; presenta un valor de erosividad de 4 612 MJ mm/ha hr año, debido a precipitaciones que provienen de la región amazónica transportada por los vientos alisios húmedos, zona de amortiguamiento del Parque Nacional Podocarpus

La parte baja de la cuenca tiene un valor de erosividad de 4 612 MJ mm/ha hr año, debido a que el valle de Catamayo se encuentra influenciado por el régimen oceánico presentándose la corriente calidad del Niño, donde la precipitación es más activa; mientras que la corriente fría de Humboldt disminuye los procesos de evaporación provocando precipitaciones menores.

5.2.1.3. Factor C

La figura 22, representa la imagen del factor de cobertura del suelo (C) estimado de la zona de estudio; se observa que los valores del factor C van de 0.00 a 0.90

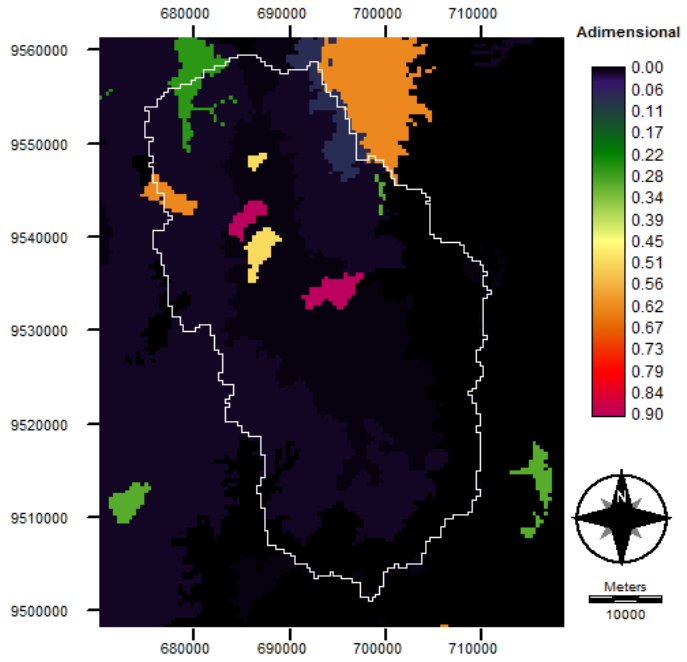


Figura 22. Imagen del factor C de la Cuenca Alta del Río Catamayo.

El factor C expresa la influencia de la vegetación sobre la erosión del suelo, factor que se utiliza a menudo para comparar los impactos relativos de las opciones de manejo en los planes de conservación.

La Parte Alta de la Cuenca de Río Catamayo presenta vegetación boscosa (cobertura frondosa) tiene valor de 0.03 con una superficie de 294 km^2 equivalente al 22 % del área total. Esta cobertura natural proporciona una adecuada protección al suelo, disminuyendo su pérdida bajo diferentes situaciones o panoramas desfavorables que se presenten; sirven como protección, disminuye la energía cinética que poseen las gotas de lluvia; evitando que éstas incidan directamente sobre el suelo; los tallos de los árboles y arbustos hacen que el flujo laminar del agua al escurrir se ralentice, reduciéndose así la capacidad de transporte de las partículas de suelo en suspensión;

en tanto que, las raíces proporcionan estabilidad y un aumento de la porosidad del suelo, proporcionando una adecuada infiltración del agua. (Martínez, 2007)

El área de pastizal presenta un valor de 0.013; cobertura de gran importancia pues sirve como trampas ya que favorecen al depósito de sedimentos arrastrados por el agua y evita que se sigan perdiendo en la red de drenaje; ocupa una superficie de 545 km^2 equivalente al 41 % del total de la cuenca.

Los áreas destinadas a la agricultura (cultivos anuales y perennes) ocupan 84 km^2 (6.2 %), valores que fluctúan entre 0.07 a 0.89 donde los cultivos perennes poseen el valor más bajo a diferencia de los huertos de subsistencia que posee el valor elevado, debido a las prácticas de barbecho que se realizan continuamente.

5.2.1.4. Factor P

En la figura 23, se aprecia la imagen del factor de conservación de prácticas agrícolas (P), tiene un valor de 1, debido a que en la zona de estudio no se emplean prácticas de control sobre la conservación del suelo.

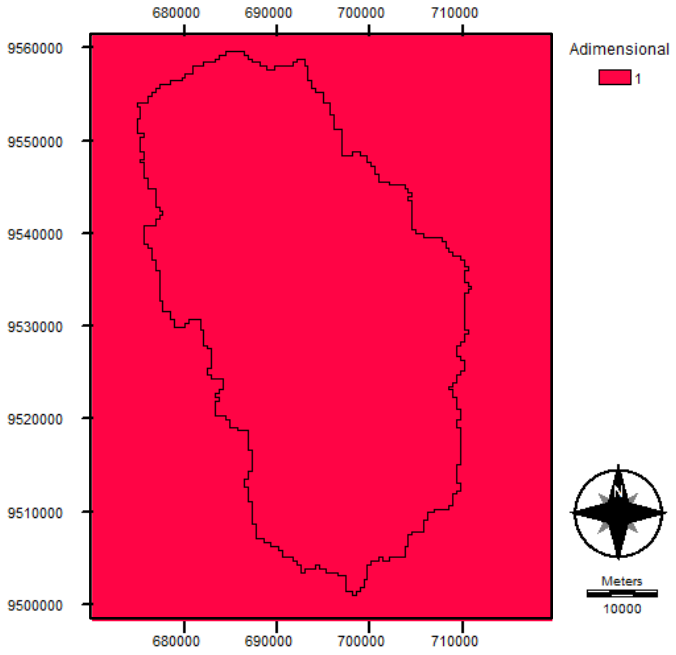


Figura 23. Imagen del factor P de la Cuenca Alta del Río Catamayo.

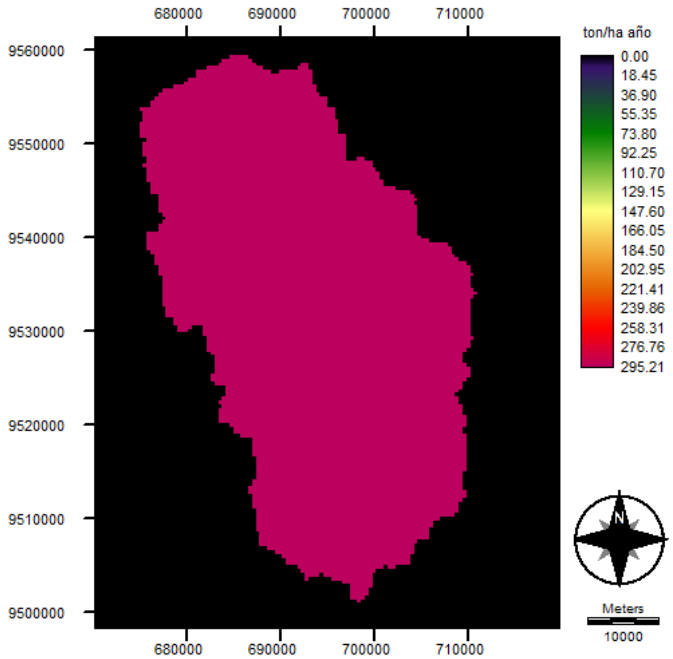
En la zona de estudio, específicamente en la parte media y baja de la cuenca, se realizan actividades agrícolas inadecuadas en lugares donde la pendiente es pronunciada, ocasionando que no exista retención de sedimentos, no facilite la infiltración y aumente el escurrimiento. Según Pérez, (2001) menciona que las prácticas de control (soporte) combate la erosión, puesto que modifica los patrones de flujo y el grado o dirección de superficie de escurrimiento. Generalmente las prácticas adecuadas incluyen actividades de contorno, cultivos en faja, terrazas y drenaje subsuperficial.

5.2.2. Parámetros Numéricos de RUSLE

El parámetro numérico de pendiente que se obtiene es 28.08 %, que representa el promedio de las pendientes (slope) que prevalecen en la zona de estudio. El valor de la media generado de exposición (aspect) de la cuenca es 186.78 grados (deg). Mientras que, el valor de la longitud de pendiente estimado para la cuenca es 600 m, distancia desde el origen de la escorrentía superficial a lo largo de la vía de flujo, a la localidad donde se concentra el flujo o donde se deposita el suelo desprendido; se debe tener en cuenta que el tamaño de píxel que se emplea en las imágenes es de 400 m. El tamaño de división de la cuenca para el análisis digital fue de 159 258 m^2 que se redondea a 160 000 m^2.

5.2.3. Estimación Potencial de la Erosión Hídrica de la Cuenca Alta del Río Catamayo.

Los resultados de la estimación de la erosión hídrica generados en el módulo RUSLE, que están potencialmente disponibles en la Cuenca Alta del Río Catamayo se muestran en la figura 24, están realizados a nivel de cuenca, donde se estima que en promedio se encuentran potencialmente disponibles 295.21 ton/ha año de suelo a perderse en toda la cuenca.



a. Promedio potencial de erosión

Figura 24. Estimación de pérdida de suelo en la Cuenca Alta del Río Catamayo.

La estimación de la pérdida de suelo por unidad de área potencialmente disponible a erosionarse por división oscilan entre 18.45 a 295.21 ton/ha año (figura 24). Según Pérez (2001), establece que los valores de la pérdida de suelo mayores a 200 ton/ha año están clasificados con el nivel de erosión muy fuerte.

El módulo RUSLE realizó el análisis considerando a cada división generada en la cuenca como si fuera un microcuenca, dependiendo de las características del área de estudio, realiza subdivisiones durante el proceso de cálculo.

Para poder analizar los resultados obtenidos en la Cuenca Alta del Río Catamayo, se procedió a comparar el valor de pérdida de suelo obtenido, con otros estudios similares, que haya empleado la misma metodología y el mismo programa de SIG. En la siguiente tabla se describió la información recopilada de otras zonas similares, con el fin de contrastar los resultados obtenidos.

Tabla 10. Comparación de resultados de pérdida de suelo de La Cuenca Gavía con la cuenca alta del río Catamayo.

ZONA DE ESTUDIO	PÉRDIDA DE SUELO ton/ha año	SUPERFICIE Km^2
Cuenca Alta del Río Catamayo	295.21	1318.7
Cuenca La Gavía, Estado de México	23	166.99

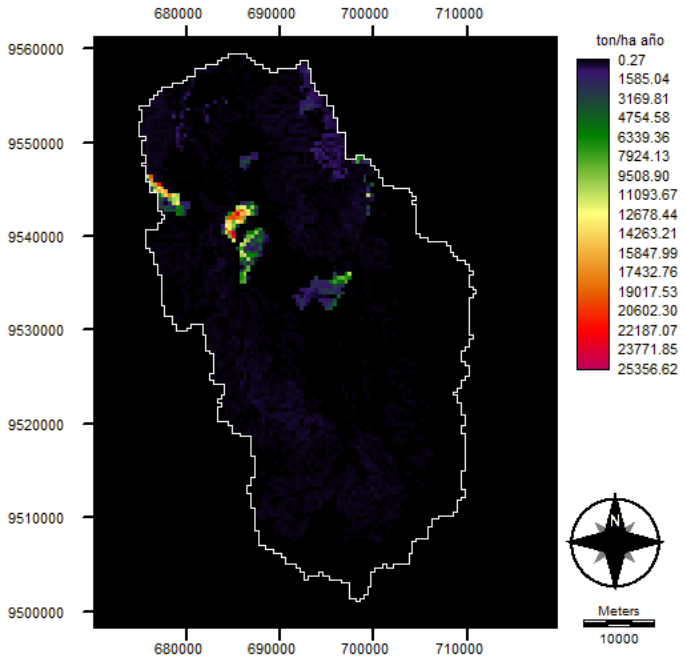
Fuente: Los Autores

En una superficie de 1 328.7 km^2 La Cuenca Alta del Río Catamayo, presenta una estimación de pérdida de suelo de 295.21 ton/ha año, a diferencia de la cuenca La Gavía ubicada en el Estado de México, que presenta 23 ton/ha año es decir 12 veces menos pérdida de suelo que la cuenca en estudio, por lo que fue lógico ya que se encuentra en relación con el área de cada una de las cuencas, teniendo en cuenta las condiciones climáticas, topográficas, edafológicas y de cobertura vegetal presentan similares características.

Tabla 11. Otras investigaciones realizadas en cuencas hidrográficas, sobre pérdida de suelo mediante simulación en SIG.

TEMA DE ESTUDIO	LUGAR	PROGRAMA DE SIG	ÁREA Km^2	RESULTADO ton/año
Modelo para evaluar la erosión hídrica, utilizando sistemas de información geográfica.	Colombia, a nivel nacional	Arc-Gis	1 141 748	170 000 a 200 000
Modelo de riesgo de la erosión en suelos en cuatro micro-cuencas, de la Cordillera Los Maribios.	Nicaragua	Arc-Gis	380.8	120
Metodología para el riesgo de evaluación del riesgo de la erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos	Zapotillo, Ecuador	Arc-View	22.5	850
Metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando un SIG.	Querétaro, México	Idrisi, 1997	197.9	80

En la figura 25, se muestra las zonas vulnerables a erosión hídrica y potencialmente productoras de sedimentos, por división de la cuenca.



a. Pérdida de suelo promedio por división

Figura 25. Pérdidas de suelo por división de la cuenca (microcuencas)

La pérdida de suelo por unidad de área potencialmente disponible a erosionarse por división oscilan de 1 585 a 25 356 ton/ha año. El RUSLE realiza el análisis considerando a cada división generada en la cuenca como si fuera una microcuenca, que a su vez, dependiendo de las características de la zona de estudio, nuevamente se subdividen (subdivisiones), lo cual se lleva a cabo durante el proceso de cálculo.

Las zonas expuestas en la imagen son vulnerables a erosión hídrica, se ubican en la parte media de la cuenca, en sitios donde la agricultura es intensiva y la cobertura vegetal natural es mínima, presenta problemas de pérdida y arrastre de partículas de suelo, siendo potencialmente productoras de sedimentos, esto se pudo evidenciar con la visita de campo, denotando que las prácticas agrícolas son inadecuadas.

5.2.4. Sedimentación y Entrega de Sedimento

5.2.4.1. Parámetro numérico coeficiente de entrega de sedimentos (SDR)

Se aplicó la fórmula de Vanoni se obtiene que el coeficiente de entrega de sedimentos (SDR) de la Cuenca Alta del Río Catamayo es 0.1914.

5.2.4.2. Sedimentación y pérdida total de suelo de la cuenca

La Imagen 26, representa la simulación de estimación de producción de sedimentos a nivel de cuenca.

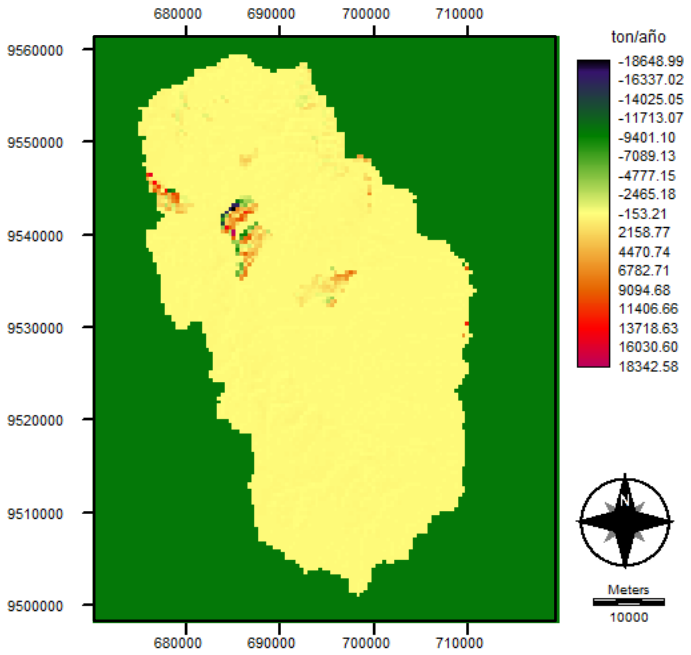


Figura 26. Producción de sedimentos a nivel de cuenca en la Cuenca Alta del Río Catamayo.

En la figura 26, se muestran los resultados de la estimación de producción de sedimentos que se originan en la Cuenca Alta del Río Catamayo, bajo las condiciones de los parámetros numéricos y digitales, requeridos e introducidos al modelo. Se simula que la pérdida de suelo anual neta por unidad de área más alta es de 18 342.58 ton/año.

Según Silva, (1999) de acuerdo con la curva hipsométrica, la cuenca en estudio se encuentra en etapa de equilibrio; está es una cuenca geológicamente madura de pie de montaña, con efecto de erosión geológica natural elevada; zona donde predomina el transporte de sedimentos, al tener una pendiente débil revela que es valle encajonado.

Tabla 12. Diferencia de Sedimentación y pérdida total del suelo en la Cuenca Alta del Río Catamayo.

ZONA DE ESTUDIO	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS ton/año	SUPERFICIE Km^2
Cuenca Alta del Río Catamayo	18 342.58	1318.7
Cuenca La Gavía, Estado de México	1 566.59	166.99

Fuente: Los Autores

Se comparó los resultados obtenidos de la Cuenca La Gavía, está posee una producción de sedimentos a nivel de cuenca de 1 566.59 ton/año, siendo su producción 12 veces menor que la cuenca en estudio, La Cuenca Alta del Río Catamayo, produce un valor 18 342.58 ton/ha año.

La imagen 27, representa la acumulación de la producción de pérdida de suelo anual neta en los cauces de La Cuenca Alta del Río Catamayo.

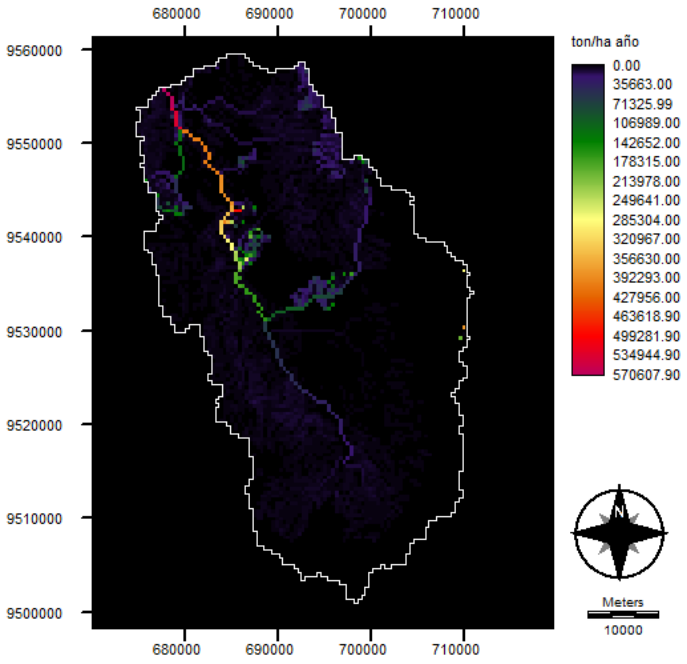


Figura 27. Acumulación de la producción de pérdida de suelo anual neta en los cauces de la cuenca.

La figura 27, representa la acumulación de la entrega de sedimentos en los cauces de agua que prevalecen en la zona de estudio, el agua es el principal factor causante de la degradación de suelos, pero a su vez es el recurso más afectado por dicha degradación, pues la acumulación de sedimentos resalta en el cauce principal, desde la parte media hasta la desembocadura, se supone que se encuentra contaminado de una manera físico-químico. Las áreas vulnerables a erosión tienen mayor intensidad de entregas de sedimentos, zonas ubicadas en la parte media de la cuenca, donde las actividades de agrícolas y de barbecho se intensifican.

5.3. COMPARARCIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO RUSLE Y SEDIMENTATION EN SIG, EN EL CAMPO.

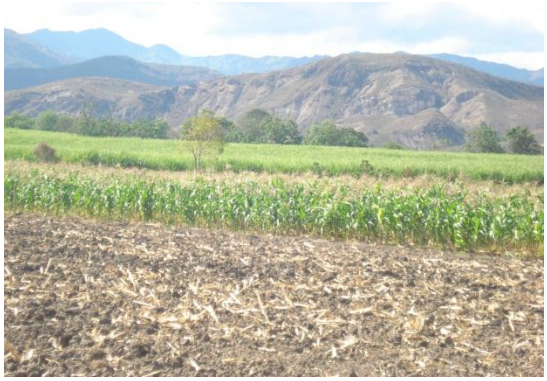
5.3.1. Observaciones en Campo

A continuación se detallan algunas de las observaciones realizadas en campo de las diferentes paradas realizadas en la zona de estudio, con el fin de verificar los resultados obtenidos en SIG.

Tabla 13. Imágenes verificación en campo, Cuenca Alta del Río Catamayo.

 Figura 28. Vista panorámica del sector Ventanas **Figura 29.** Perfil del suelo	**Sector:** Ventanas **Coordenadas:** E 693805 N 9558235 **Altitud:** 2 590 msnm **Profundidad del suelo:** 1 m **Pendiente:** 45 % Pendientes pronunciadas y escarpada. **Caracterización de cobertura vegetal:** Pastizal con pendientes fuertes, regeneración natural y plantaciones de pino (*Pinus patula*). Las especies representativas de la zona de estudio se describen a continuación, Estrato herbáceo: holco (*Holcus lanatus*), kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), oreja de perro (*Achyrocline hallii*), paja de cerro (*Stipa ichu*), y paja de monte (*Calamagrotis intermedia*) Estrato arbustivo: pumamaqui (*Oreopanx rosei*), tunashi (*Gynoxis obtusifolia*), duco (*Clusia elliptica*), salapa (*Gaultheria erecta*) y arrayan (*Myrcianthes rhopaloides*).

Continuación tabla 11…

Parte baja de La Cuenca Alta del Río Catamayo, acumulación de sedimentos.	
 **Figura 30.** Cultivos de maíz y caña de azúcar **Figura 31.** Medición de la profundidad del suelo. **Figura 32.** Terreno en etapa de preparación (arado)	**Sector**: La Vega **Coordenadas:** N 678282 E 9556693 **Altitud**: 1 142 msnm **Profundidad del suelo:** 0.50 m **Pendiente:** 0-5 % Pendiente suavemente inclinado Topografía plana. Sector de alta producción agrícola. Consistencia compacta. **Caracterización de cobertura vegetal:** Grandes extensiones de plantaciones de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), maíz (*Zea mays*), guineo (*Musa sapientum*), yuca (*Manihot esculenta*), tomate de mesa (*Solanum lycopersicum*) y cítricos (*Citrus medica*). Cultivos realizados con labranza tradicional y maquinaria agrícola.

Continuación tabla 11…

 Figura 33. Vegetación xerofita caracteristica. **Figura 34.** Pendientes con escaza cobertura vegetal. **Figura 35.** Materiales empleado en medición de profundidad del suelo.	**Sector:** La Era **Coordenadas:** N 689027 E 9540065 **Altitud**: 1 608 msnm **Profundidad del suelo:** 0.23 m **Pendiente:** 28 % Pendiente escarpado Topografía irregular **Caracterización de cobertura vegetal:** Vegetación xerofita, donde sobresalen el faique (*Acacia macracantha*), moshquera (*Croton wagneri*), molle (*Schinus molle*) y zapote de perro (*Capparis scabrida)* Presencia de cultivos anuales; tomate de mesa (*Solanum lycopersicum*), pepino (*Cucumis sativus*) y pastizales con escaza cobertura vegetal; Kikuyo *(Pennisetum clandestinum)*. En las partes altas, presencia de escaza cobertura vegetal. En las partes altas se observó que existe escaza presencia de cubierta vegetal, erosión hídrica.

Continuación tabla 11…

Figura 36. Vegetación xerofita representativa

Figura 37. Perfil del suelo

Figura 38. Pendientes sin cobertura vegetal

Sector: La Merced
Coordenadas:
N 696209
E 9520463
Altitud: 1 614 msnm
Profundidad del suelo: 0.32 m
Suelo pedregoso
Escasa presencia de materia orgánica
Pendiente: 48 % parte baja
Pendiente escarpado
Caracterización de cobertura vegetal:
Vegetación xerofita, donde sobresalen el faique (*Acacia macracantha*) y la mosquera (*Croton wagneri*), molle (*Schinus molle*) y zapote de perro (*Capparis scabrida.*

Las especies herbáceas relevantes de sector son: holco (*Holcus lanatus*), kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), oreja de perro (*Achyrocline hallii*), paja de cerro (*Stipa ichu*), y paja de monte (*Calamagrotis intermedia*)

Presencia de cultivos anuales; maíz (*Zea mays*), pepino (*Cucumis sativus)*, cebolla (*Allium cepa*), pimiento (*Capsicum annum*) y cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

Se observó que en las partes altas no existe presencia de cobertura vegetal, suelo desnudo.

Continuación tabla 11…

 Figura 39. Presencia de erosión hidrica. **Figura 40.** Medición de la profundidad del suelo. **Figura 41.** Suelo con escaza cobertura vegetal.	**Sector:** Quinara **Coordenadas:** N 694944 E 9521312 **Altitud**: 1 698 msnm **Profundidad del suelo:** 0.15 m Suelo pedregoso Textura suelta. **Pendiente:** 45 % Pendiente escarpada. **Caracterización de cobertura vegetal:** Vegetación xerofita, donde sobresalen el faique (*Acacia macracantha*) y la mosquera (*Croton wagneri*) Las especies herbáceas relevantes de sector son: holco (*Holcus lanatus*), kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), oreja de perro (*Achyrocline hallii*) y cabuya (*Furcraea andina* Trel.) Presencia de grandes extensiones de cultivos anuales; maíz (*Zea mays*), y cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Se observó que en las partes altas no existe presencia de cobertura vegetal (suelo desnudo).

Continuación tabla 11…

 Figura 42. Parte Alta de la Cuenca del Río Catamayo. **Figura 43.** Bosque nublado presente en el área de estudio. **Figura 44.** Medición de profundida del suelo en la parte alta.	**Sector:** Quebrada Honda **Coordenadas:** N 705450 E 9540065 **Altitud**: 2 485 msnm **Profundidad del suelo:** 0.15 m **Pendiente:** 68 % Pendiente muy escarpado Suelos poco profundos. Presencia de materia orgánica. **Caracterización de cobertura vegetal:** Vegetación natural presencia de bosque nublado. Cascarilla (*Cinchona officinalis*) Huicundo (Tillandsia confinis) Cedro blanco (*Cedrela montana*) Aliso (*Alnus acuminata*) Laurel (*Nectandra sp.)* En la parte alta la vegetación natural es frondosa y presenta un buen estado de conservación.

Continuación tabla 11…

Figura 45. Cultivo relevantes de la zona.

Figura 46. Medición de la prfundidad del suelo

Figura 47. Perfil de suelo.

Sector: Taxiche
Coordenadas:
N 695886
E 9533586
Altitud: 1 576 msnm
Profundidad del suelo: 0.60 m
Pendiente: 10 %
Pendiente inclinado
Caracterización de cobertura vegetal:
Vegetación secundaria, y cultivos maíz (*Zea mays*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), guineo (*Musa sapientum*) y especie herbáceas como el Kikuyo *(Pennisetum clandestinum)*.

En las imágenes expuestas anteriormente, se evidenció que las características generales del suelo permiten testificar que cada sitio visitado presenta características fisiográficas diferentes; la variación de la pendiente, el tipo de cobertura vegetal y las actividades agrícolas son factores determinantes de erosión.

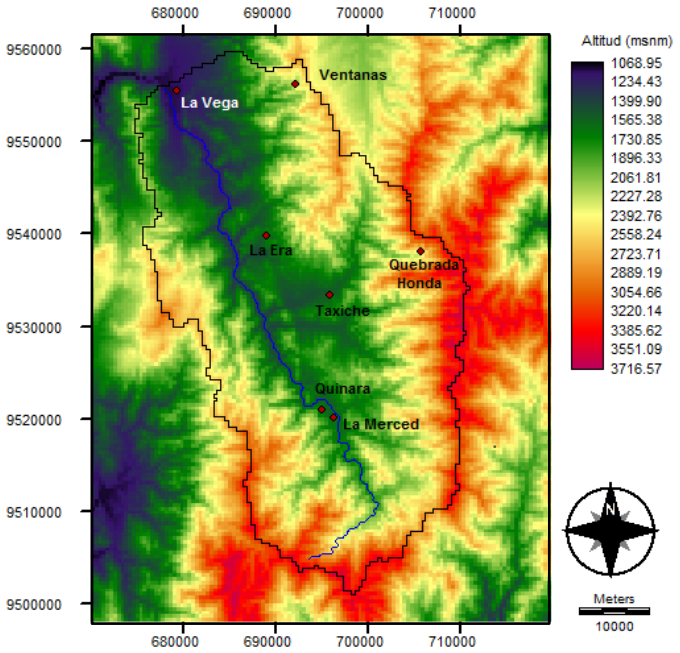


Figura 48. Puntos GPS de los lugares visitados en campo.

En el sector Ventanas existe pendientes fuertes y precipitaciones constantes lo que podría ocasionar pérdida del suelo, sin embargo la vegetación natural existente, la escaza actividad agrícola, las condiciones climáticas y el relieve ayudan a controlar este proceso de erosión. (Vélez, 2008)

En el sector La Era, La Merced y Quinara, se observó áreas en riesgo, que presentan procesos de degradación del suelo, evidenciándose erosión en surcos y cárcavas. Las partes altas de estos sitios tienen escaza cobertura vegetal, existe sobre pastoreo, prácticas agrícolas inadecuadas, fuertes pendientes y escaza profundidad del suelo. En los lugares de baja altitud existen extensas zonas de cultivos de ciclo corto, y monocultivo de caña de azúcar, esto se debe a que la temperatura es favorable, y existe sistemas de riego.

La parte Alta de la Cuenca del Río Catamayo, específicamente el sitio Quebrada Honda, no presenta problemas graves de erosión, debido a que la cobertura natural es densa; se debe señalar que en este sector existen fuertes pendientes mayores al 50 %, y la profundidad del suelo es mínima, está entre 0.10-0.20 m, existe un capa gruesa de materia orgánica mayor al 0.05 m esto debido a las condiciones climáticas de la zona. Según caracterización territorial realizada por el Proyecto Binacional Catamayo-Chira (2005), la parte alta de la zona de estudio abarca 1.4 % del Parque Nacional Podocarpus del área total (146.280 hectáreas).

Tabla 14. Verificación y comparación de los sitios (testigos) vulnerables a erosión hídrica simulados en SIG e identificados en campo.

CUENCA	SITIOS EN LA IMAGEN	SITIOS VISITADOS	UBICACIÓN				ALTITUD		PENDIENTE		VEGETACION	
			imagen		Campo		SIG	CAMPO	IMAGEN	CAMPO %	SIG	CAMPO
			X	Y	X	Y						
ALTA	La Tuna	La Tuna	707477	9520220	705450	9540065	3133	2485	42%	68	Bosque natural	Bosque natural
	Guaycupamba	Ventanas	695985	9506321	693805	9558235	2591	2590	26%	45	Bosque natural	Arbustos, y hierbas
MEDIA	La Era	La Merced	685550	9542592	696209	9520463	1684	1142	41%	10	Huertos de subsistencia	Cultivos, pastizales
	La Merced		685124	9540625			1558	1614	43%	48	Huertos de subsistencia	Cultivos, pastizales, escaso bosque natural
	Chorillos	Taxiche	694129	9535172			1611	1576	13%	10	Huertos de subsistencia	Cultivos, pastizales
	La calera		697164	9535767	695886	9533586	1751		32%		Huertos de subsistencia	
BAJA	Desembocadura río Boquerón	La Vega	695110	9553021	678282	9556693	2535	1142	18%	3	Cultivo perenne	Cultivos

Fuente: Los Autores

En la tabla 14, se muestra los datos obtenidos en la imagen de SIG directamente en el campo, las coordenas que se obtuvieron de la parte alta, media y baja de la cuenca no son iguales en el campo pero si se aproximan, como se observa en la tabla los lugares visitados no fueron los mismos (en muchos casos), pero sí estuvieron dentro de la zona de influencia y están cerca de los sitios señalados en la imagen.

La imagen de pérdida de suelo (ver figura 24), indica que la parte alta de la cuenca presentó baja erosión, en la parte media y baja, existe alta erosión; al salir al campo se pudo evidenciar por medio de observación directa que los datos obtenidos en la simulación del módulo RUSLE son reales, al menos en forma cualitativa, mientras que de forma cuantitativa, no existió información, pues se debió realizar un estudio minucioso en campo, con alguna metodología que permita obtener valores de perdida de suelo reales .

Al corroborar la imagen de cultivo (ver figura 13), durante la visita de campo, se verificó que en algunos sectores conservan la cobertura vegetal descrita en el 2005, sin embargo el avance de la frontera agrícola y zonas de pastizales han aumentado en superficie; la parte alta de la zona de estudio conserva la cobertura vegetal natural, esto fue por el difícil acceso y porque está dentro de la zona de amortiguamiento de Parque Nacional Podocarpus.

Para identificar la vegetación se hizo mediante observación visual de una forma rápida y de acuerdo a los sitios asignados, se tomó en cuenta la parte vegetal porque permite identificar los distintos ecosistemas y zonas degradadas, y por la estrecha relación existente entre cobertura vegetal y erosión hídrica, debido a la protección que brinda al suelo.

5.4. ALTERNATIVAS ADECUADAS PARA LA DISMINUCIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO CATAMAYO”

5.4.1. Alternativas Adecuadas para la Disminución de la Erosión Hídrica en la Cuenca Alta del Río Catamayo

Con el fin de proponer alternativas adecuadas de manejo y uso del suelo, encaminadas a la disminución de la erosión hídrica en la zona de estudio, se simuló el cambio de cobertura vegetal (factor C) y se agregó valores de factor P que se utilizó para prácticas de conservación agrícola, en las zonas identificadas como vulnerables a erosión hídrica.

Tabla 15. Diferencia de Estimación de la erosión hídrica en la Cuenca Alta del Río Catamayo, ton/ha año

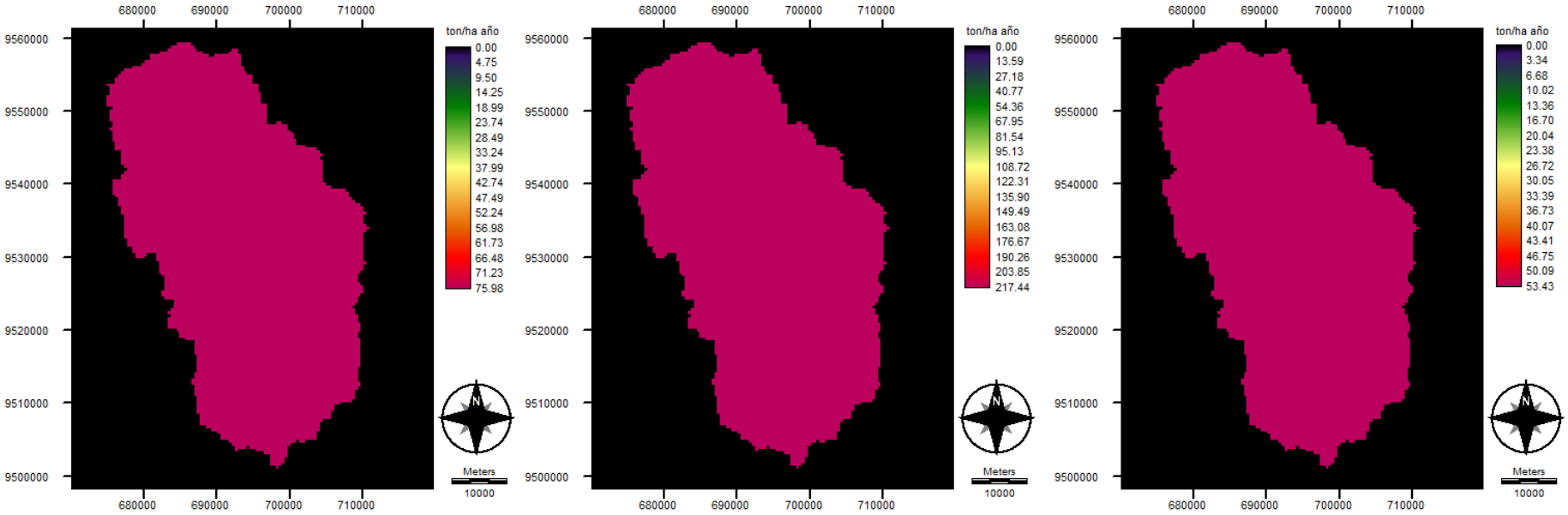
ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO			
Pérdida de suelo	**Modificación Factor C**	**Modificación Factor P**	**Modificación Factores C y P**
295.21	75.98	217.44	53.43

Fuente: Los Autores

En la tabla 15, se muestra los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el módulo RUSLE, con el objetivo de conocer los valores de perdida de suelo con cada uno de los factores modificados. El resultado obtenido de la ejecución del módulo con el factor C y P, presentó el valor más bajo 53.43 ton/ha (erosión fuerte), a diferencia del valor inicial de 295.21 ton/ha año, el proceso erosivo se redujo en 82 %, se puso énfasis en estas dos variables pues si existe cobertura natural, y agricultura sostenible; a largo plazo contribuye a mejorar la calidad ambiental y conservar los recursos agua y suelo, optimizando la calidad de vida de las personas que dependen de esta actividad. Los factores C y P tienen estrecha relación, La vegetación juega un papel muy importante en el proceso de erosión hídrica controlando la energía con la que inciden las gotas de lluvia (impacto); mejorando la capacidad de infiltración y por tanto disminuyendo la escorrentía; influyendo en la circulación de la escorrentía, disminuyendo su velocidad, aumentando la rugosidad del suelo y reduciendo la

capacidad erosiva del flujo. En conjunto, disminuye la capacidad erosiva de la lluvia y protege al suelo contra la erosión.

A continuación se presentan las siguientes imágenes con los resultados de pérdida se suelo con modificaciones realizadas en los factores C y P.



a. Pérdida de suelo por división de la cuenca, factor C modificado

b. Pérdida de suelo por división de la cuenca, factor P modoficado

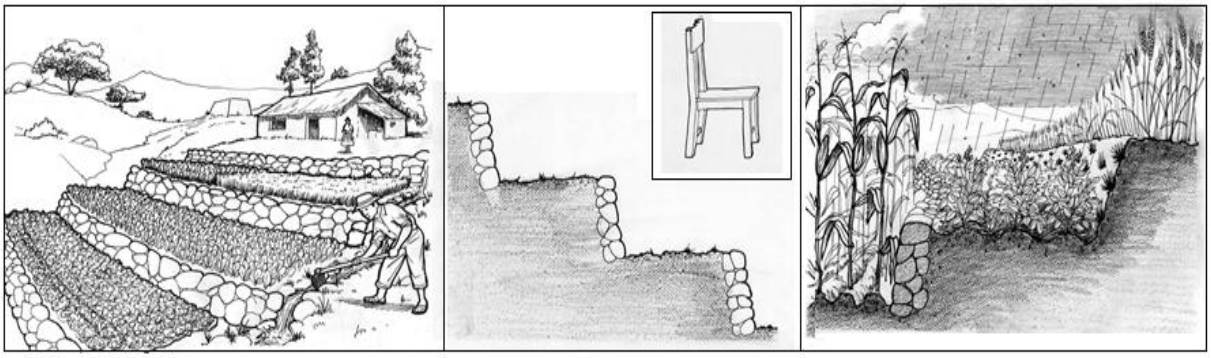
c. Pérdida de suelo por división de la cuenca, factor C y P modoficado

Figura 49. Pérdidas de suelo por división de la cuenca con los factores C y P modificados

En la figura 49, muestran los resultados de la estimación de la erosión hídrica generados en el módulo RUSLE, es evidente que existen diferencias entre los valores obtenidos, al modificar el factor P y C.

La vegetación es un elemento muy efectivo en el control de la erosión. La dificultad se presenta cuando se ha eliminado la vegetación y se desea recuperar la situación inicial (vegetación natural). Generalmente la vegetación original con su biodiversidad es una protección mucho más eficiente que la vegetación reforestada (Suárez, 2001)

Al modificar el tipo de cobertura vegetal (factor C), el promedio estimado de la erosión potencial disponible disminuye en un 74 % del valor total (295.21 ton/ha año), a diferencia de las 75 ton/ha año (erosión moderada) que se perderían si se modifica los cultivos que tienen un alto valor de C y que estén estrechamente relacionados con la pendiente, la producción de maíz en la zona de estudio se la realiza en pendientes mayores a 25 %, actividad agrícola que se realiza con frecuencia. Se establece que en estas áreas se desarrolle vegetación natural, porque presentan un valor de C bajo, que en lo posible no se realice ningún tipo de actividad agrícola o ganadera con el fin de evitar que el suelo no se pierda por dichas actividades.
Es importante conocer las posibilidades del software, en el caso de contar con información para validar en el campo.



a. Terrazas con pendiente mayor al 13 % **b.** Terraza de banco pendiente mayor a 25 % **c.** terraza con cultivos, de ciclo corto

Figura 50. Tipos de terraza a implementarse en la Cuenca Alta del Río Catamayo

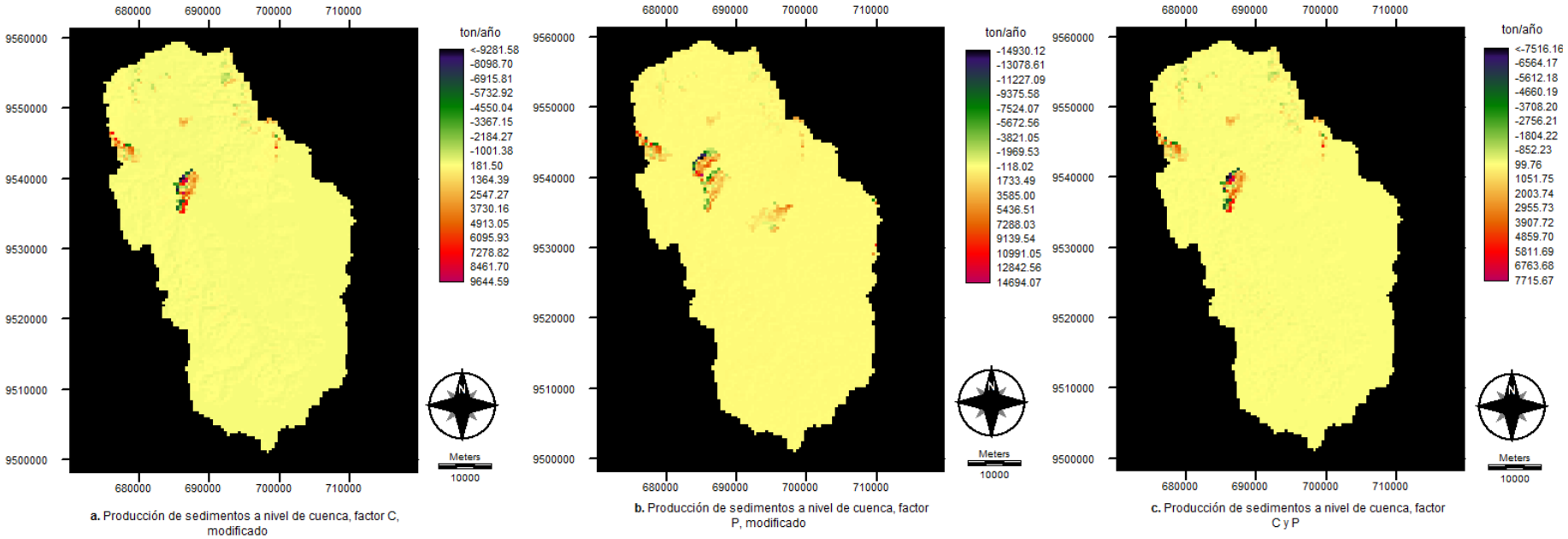
El factor P de prácticas de conservación se modificó de acuerdo a los parámetros establecidos por la USDA, 2005. Al adicionar dichos valores el promedio estimado de la erosión potencial disponible disminuye en un 26 % del valor total inicial (295 ton/ha año), a diferencia de las 217 ton/ha año, (erosión muy fuerte) que se perderían, se debe realizar terrazas en áreas donde la pendiente sea mayor al 13 % y terrazas en banco donde la pendiente sobrepase el 25 %, se debe construir en lugares donde la cobertura vegetal sea escaza y el suelo presente profundidad adecuada, donde se evidencia zonas potencialmente erosionables, de esta manera se lograra disminuir el proceso erosivo.

Al obtener los valores de la simulación en el módulo RUSLE, con modificación en los factores C y P, la erosión disminuye en un 82 %, (295 ton/ha año) del valor inicial, de las tres ejecuciones realizadas presentan un valor bajo, de esta manera se estableció que si existe cobertura vegetal adecuada y prácticas de conservación agrícolas en las zonas con riesgo a erosión hídrica, se logra contrarrestar y disminuir los procesos erosivos. Se debe poner énfasis en estos sitos implementando prácticas de conservación eficientes y tecnología adecuada, para evitar que el proceso de erosión avance y llegue hasta niveles irreversibles.

A la hora de formular proyectos para revertir la información de esos lugares, se debería tomar en cuenta a la población, con el fin de no afectar sus actividades agropecuarias.

5.4.2. Estimación Potencial de la Erosión Hídrica de la Cuenca Alta del Río Catamayo

A continuación se presentan las siguientes imágenes con los resultados de producción de sedimentos a nivel de cuenca con modificaciones realizadas en los factores C y P



a. Producción de sedimentos a nivel de cuenca, factor C, modificado

b. Producción de sedimentos a nivel de cuenca, factor P, modificado

c. Producción de sedimentos a nivel de cuenca, factor C y P

Figura 51. Producción y entrega de sedimentos a nivel de cuenca la cuenca con los factores C y P modificados

Así mismo en la figura 54, se muestran la estimación de producción de sedimentación a nivel de cuenca, con resultados de los valores de cobertura vegetal modificados y prácticas agrícolas. Oñate (2006) asegura que la erosión hídrica es uno de los factores más importantes a considerar en la pérdida de suelos en cuencas hidrográficas y es la principal fuente de producción de sedimento.

Cuando la velocidad de escurrimiento disminuye, la depositación se inicia. En forma selectiva, primero se depositan los agregados y la arena, luego a mayor distancia, el limo y la arcilla. Consecuentemente, la medición de la pérdida de suelos puede realizarse interceptando el flujo superficial, antes que llegue a un cauce natural. (Oñate, 2006)

Tabla 16. Diferencia de estimación de la producción de sedimentos en la Cuenca Alta del Río Catamayo, ton/año

ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS ton/año			
Producción de sedimentos	Modificación Factor C	Modificación Factor P	Modificación Factores C y P
18 342.58	9 644.59	14 699.07	7 715.67

Fuente: Los Autores

6. CONCLUSIONES

Del presente proceso investigativo se concluye lo siguiente:

- La estimación de la erosión en la Cuenca Alta del Río Catamayo, se determinó mediante información secundaria pertinente, de acuerdo a parámetros requeridos por RUSLE, los resultados obtenidos dependen de cuan actualizada y real sea la misma.

- Al Modificar el tamaño de resolución del pixel de 100 m a 400 m, se produce pérdida de datos por lo que la información obtenida no está a detalle. La modificación se efectúa debido a la limitante de 32 000 subdivisiones que acepta módulo RUSLE y SEDIMENTATION, restricción establecida por el programa.

- La limitante al determinar el factor R para RUSLE, fue la escasez y ausencia de datos pluviométricos registrados en las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro y fuera de la cuenca.

- Las partes media y baja de la Cuenca Alta del Rio Catamayo presentan, mayor erosividad, por lo que se estable que estos suelos son más susceptibles al desprendimiento y arrastre de sus partículas.

- El riesgo de erosión fuerte y muy fuerte se encontró, en la parte media-baja de la zona en estudio, debido a que están presentes valores altos de erosividad, erodabilidad y menor cobertura de suelo.

- La validación de los resultados en campo, permitió verificar la pérdida de suelo establecida en la imagen, además se constató otros sitios potencialmente vulnerables a erosión hídrica.

- Al modificar los valores de los factores, creando una cobertura natural apropiada C, y señalando prácticas de conservación adecuada, se comprobó que la erosión disminuye en un 82 %.

- A través de esta investigación fue posible demostrar que los SIG son compatibles con la aplicación RUSLE para predecir el riesgo de erosión del suelo. Aunque no fue posible cuantificar pérdida de suelo en el área de estudio, la clasificación del riesgo de erosión usada en el mapa final puede ayudar a identificar alternativas de conservación de suelos u otras prácticas que permitan prevenir la erosión en esta área.

7. RECOMENDACIONES

Para finalizar la presente investigación se recomienda lo siguientes:

- Para optimizar los resultados se recomienda trabajar con información sobre edafología, cobertura vegetal y precipitación a mayor detalle; para que la imagen de resultados sea precisa y los valores de erosión se ajusten a la realidad.

- Para facilitar el manejo, desarrollo y ejecución del programa se debe conocer el tamaño de pixel y los módulos RUSLE Y SEDIMENTACION del SIG IDRISI edición TAIGA, con el fin de obtener información precisa y a detalle.

- Es importantes que los entes encargados, gobiernos nacionales y locales del país, presten interés a la implementación y monitoreo de estaciones meteorológicas, que abarquen todo el territorio; facilitando información para las diferentes investigaciones.

- Para disminuir la erosión es necesario implementar prácticas agrícolas que contribuyan a la reducción del proceso erosivo, mediante implementación de surcos, labranza en áreas específicas, rotación de cultivos, policultivos, cultivos en contorno, terrazas y riego tecnificado.

- Las entidades públicas, privadas y ONG pueden realizar estudios a detalle sobre la presente investigación, con el fin de verificar de manera cuantitativa, determinando esta manera la veracidad del programa IDRISI edición TAIGA.

- Se recomienda la protección de la parte alta de la cuenca, debido a que es un ecosistema frágil (bosque primario), con el objetivo de asegurar y mantener el régimen hídrico.

- Es importante seguir trabajando en estos temas, promoviendo estas metodologías que son necesarias para establecer una radiografía general de las cuencas hidrológicas, importantes para las actividades naturales y humanas, pues en estas se encuentran una invaluable cantidad de recursos naturales.

- Será necesario realizar otra investigación donde se calibre y valide los datos obtenidos en la presente investigación, con el fin de que los resultados a obtener se ajusten a la realidad.

8. BIBLIOGRAFÍA

ALMOZA, Y.; SCHIETTECATTE, W; HANOI, G. 2004. Metodología para la Estimación del Factor Erosividad de las Precipitaciones en el Modelo (RUSLE). CU, Universidad Agraria de la Habana. 17 p.

ARSENAULT; BONN. 2005. Evaluación de la cubierta protectora de la erosión de suelos por residuos de cultivos empleando índices de vegetación y un análisis de combinación espectral de datos multiespectrales e hiperespectrales. CATENA 62: p. 157-172.

BECERRA, A. 1994. Erosión de Suelos, apuntes de la primera parte del curso de Conservación de Suelos. Tesis Mag. Sc., Mx, Universidad Autónoma de Chapingo. 105 p.

CAMAREN (Sistemas de capacitación para el manejo de los recursos naturales renovables, EC.); LLORET, P. 2005. Cuenca, Ec., Agua para consumo humano. Editorial. 90 p.

CAMPOS, D. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma San Luis De Potosí, Facultad de Ingeniería. 3 ed. Potosí, Mex., Imprenta universitaria potosina. p.12-15

CECN (Centro Experimental de Café del Norte); UNICAFE (Unión Nicaragüense de Cafetaleros). 2005. Métodos Sencillos para estimar Erosión Hídrica. Ed. UAP- PASOLAC. 45 p.

Centro de Recursos Idrisi México; Centro Interamericano de Recursos del Agua. 2009. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. (en línea) Toluca, Mx. Consultado 29 nov. 2010. Disponible en http://idrisi.uaemex.mx/,idrisi.mexico@gmail.com

CHAMBA, E; CHUNCHO, J. 2011. Estudio de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación y temperatura, ligado al cambio climático en la provincia de Loja. Tesis Ing. For. Loja, Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. 118 p.

CHERRES, N. 2000. Características físicas de los suelos, en caracterización de los suelos, ecosistemas y las cuencas hidrográficas. CAMAREN. p. 7-15.

CHOW, Ven T. 1959, Hidráulica aplicada. New York, EU. Ed. Mc Graw Hill. 572. p

CLÉRICI, C; GARCÍA, P. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. AGROCIENCIA (UY) (5): 92-103.

DE NONI, G; TRUJILLO, G. 1985. La erosión actual y potencial en el Ecuador: Localización, manifestación y causas. Quito Ecuador, p 1-15

DÍAZ, *et al*. 1999. Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con ayuda de los SIG y MDE: Curso río Lerma: Toluca, Edo de México. Revista Ciencia Ergo Sum. 6 (2): Toluca, 124-134. p.

EASTMAN, R. 2006. IDRISI Andes. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Trad. AN Ravelo. Córdoba, Ar., Universidad Nacional de Córdoba. 303 p.

FAO-UNESCO 1985 Soil Map of the Wold revised legend. Wold Soil Resour. Rep. 60; FAO, Roma.

FIGUEROA, B. 1975. Pérdida de suelo y nutrimentos y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Texcoco. Tesis Mag. Sc., Colegio de Posgraduados. Chapingo, Mx. p. 209.

FRANCO, R. 2008. Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos. Tesis de Doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Toluca, Mx, Universidad Autónoma del Estado de México.

GALINDO, M. 1998. Módulo: Manejo y conservación de suelo. Loja, Ec., GRADIMAR. 180 p.

GEO Loja. 2007. Perspectivas del Medio Ambiente Urbano. Loja, Ec.

LIANES, E.; *et al.* 2009. Evaluación del factor C de la RUSLE para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del río Birrís. Revista Agronomía Costarricense 33(2): 217-235. , Pacayas, CR. Consultado 24 febrero. 2011. Disponible en http://www.cia.ucr.ac.cr

LIMA, E; NERA, V. 2004. Identificación de los impactos ambientales en el sendero ecológico Loja/Vilcabamba. Tesis Ing. Amb. Loja, Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. 224 p.

LONDOÑO, C. 2001. Cuencas Hidrográficas: Bases conceptuales caracterización, planificación y administración. Ibagué, Co., Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal 365 p.

LOZANO, D; SARANGO, S. 2005. Caracterización de la cobertura pionera posterior a los derrumbes naturales en la franja occidental del Panque Nacional Podocarpus. Tesis Ing. Amb. Loja, Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. 168 p.

MAE (Ministerio del Ambiente, EC) / MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca) / Proyecto binacional Catamayo-Chira: Plan de ordenamiento manejo y desarrollo de la cuenca Catamayo-Chira, EC.

MANTILLA, *et al*. 2005. Geometría, topología y morfometría de las cuencas Magdalena, Cauca a partir de modelos digitales de elevación, Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, CO. 2-1 p.

MARTÍNEZ, H. 2007. Desarrollo de una metodología hidrogeomática para estimar la contaminación difusa en aguas superficiales de una cuenca. Tesis Doctoral, aún no publicada, Toluca, Mx, Universidad Autónoma del Estado de México.

Ministerio de Agricultura y Ganadería. 2005. Mapas de suelos, sierra de Ecuador. Programa de Regionalización Agraria-PRONAREG. Edición 19. Ecuador.

MONTES *et al*. 2007. Metodología para la estimación del riesgo de la erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando SIG. México.

MORGAN, R. 1997. Erosión y conservación del suelo. Trad. por Urbano PJ URBANO. Madrid, ES. Mundi Prensa. 343 p.

MUÑIZ, M. 2001. Diseño de sedimentadores-espesadores en régimen transitorio: aplicación de un método conductimétrico a la determinación de perfiles de concentración. Tesis Ing. Quim. Asturias, Universidad de Oviedo, Facultad de Química. 150 p.

OEA. Secretaría General. República de Venezuela. CIDIAT. Evaluación de Impacto Ambiental del Proyecto de Drenaje de la Región de Desarrollo Integral del Programa Guanare-Masparro (Venezuela). Mérida, Venezuela, CIDIAT, 1980.

OÑATE, F. 2006. Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. REDLACH (EC) (1): 1-30.

OSINAGA, R; VILLANUEVA, G. 2004**.** Uso Sustentable de los Suelos: informe preliminar de Uso Sustentable de los Suelos. En informe anual 2003. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Ar. p. 25-28.

PELÁEZ, J. 2001. Métodos experimentales para el seguimiento y estudio de la erosión hídrica. Medellín, Co., Universidad Nacional de Colombia. 568 p.

PÉREZ, S. 2001. Modelo para evaluar la erosión hídrica, utilizando sistemas de información geográfica. Tesis Ing. Amb. Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander. Co. 74 p.

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) 2000. Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. Madrid, Es, Ed. Mundi-Prensa.

Proyecto Binacional Catamayo Chira (2005, Loja, Ec.; Piura, Pe.) Plan de Ordenamiento y Desarrollo de la Cuenca Catamayo-Chira POMD: Estudios de la cuenca, Sistemas de información geográfica. 3 disco compacto, 8mm.

RAMÓN, C; REYES, F. 2005. Determinación del grado de erosión actual y potencial de los suelos del cantón Catamayo. Tesis Ing. Amb. Loja, Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables. 120 p.

ROJAS, L. 1999. Estudio experimental del transporte de fondos en mezclas de sedimentos: movimiento incipiente y transporte parcial en mezclas de arena y grava. Tesis Ing. Civil, Universidad Politécnica de Madrid. 112 p.

RUÍZ, A. 2005. Protección del cuenco amortiguador de la presa Poechos**.** (en línea) Consultado. 17 agosto. 2011. Disponible en http://www.chirapiura.gob.pe/principal.php

SAAVEDRA, C; MANNAERTS, C. 2003. Evaluación y monitoreo de modelos de erosión y sedimentación a escala regional usando sensores remotos y SIG: Caso de estudio en la región Andina. Cochabamba, BO. 17 p.

SIERRA, R. (ed.). 1999. Propuesta preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental. Proyecto INEFAN/GEF-BIRF y Ecociencia. Quito, Ec.

SILVA, G. 1999. Análisis hidrográfico e hipsométrico de la cuenca alta y media del río Chama. Revista Geográfica Venezolana. Vol. 40(1):9-49. Estado Mérida, Venezuela.

STRAHLER, A. 1952. Hypsometric area-altitude analysis of erosional topography. Bulletin of the Geological Society of America 63: 1117-1142.

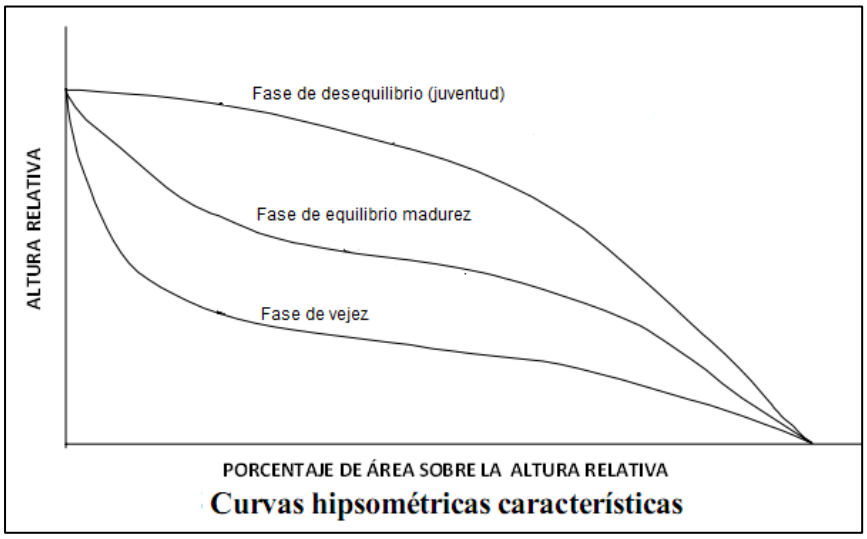
SUÁREZ, J. 2001. Control de Erosión en Zonas Tropicales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, CO. 555 p.

TEJERINA, F. 2010. Determinación de la Erosión Hídrica Potencial de los Suelos de la Alta Cuenca del Río Bermejo (Salta) Implementado en Formato SIG. Tesis Ing. Recursos Naturales y Medio Ambiente, Ag., Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Naturales. s.p.

VÉLEZ, J. 2008. Reconocimiento de zonas de vida en el transecto Loja-Villonaco-(explicación en clase) Catamayo. Loja, Ec., Universidad Nacional de Loja

9. ANEXOS

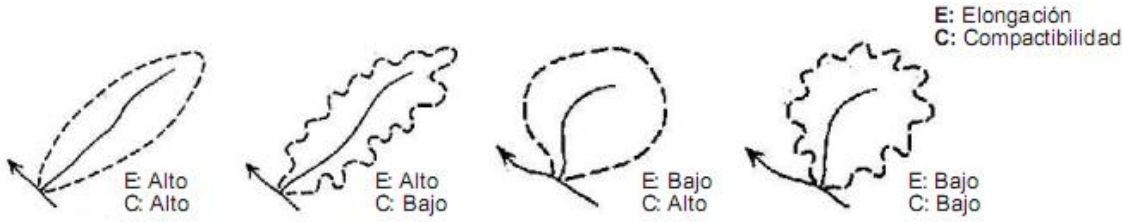
Anexos 1. Curva hipsométrica.



Anexos 2. Clasificación del tamaño de la cuenca según INEFAN, 1993.

CLASIFICACIÓN	SUPERFICIE
Sistema hidrográfico	> a 300 000 ha (3 000 km2)
Cuenca	100 000 a 300 000 ha (1 000 a 3 000 km2)
Subcuenca	15 000 a 100 000 ha (150 a 1 000 km2)
Microcuenca	4 000 a 15 000 ha (40 a 150 km2)

Anexos 3. Atributos de la forma de una cuenca, Gardiner, 1974.



Anexos 4. Valores del factor de cobertura del suelo (C), que se emplean para estimar la pérdida de suelo (USEPA, 2005).

CULTIVOS	Valores de C		
	Nivel de productividad		
	Alto	**Moderado**	**Bajo**
Agua	0		
Alfalfa	0.020	0.050	0.100
Algodón	0.300	0.420	0.490
Algodón, tabaco	0.500 a 0.700		
Arroz	0.100 a 0.200		
Bosque degradado	0.037		
Bosque denso	0.004		
Bosque natural	0.001	0.010	0.100
Bosque primario			0.0001
Bosque semidenso	0.007		
Aguacate	0.400 a 0.800		
Caña de azúcar		0.263	
Cultivo de ciclo corto (1-6 meses)		0.30	
Cultivos anuales		0.495	
Cultivos perenne		0.079	
Huerto de subsistencia	0.300-0.900		
Maíz	0.240	0.620	0.800
Maíz labranza cero	0.050	0.100	0.150
Maíz rastrojo	0.100	0.150	0.200
Maíz-soya, mijo	0.400 a 0.900		
Matorral	0.003		
Palma, cacao, café	0.100 a 0.300		
Páramo		0.003	
Pastizal	0.005	0.010	0.100
Piña	0.100 a 0.300		
Potrero	0.013		
Sabana en buenas condiciones	0.010	0.540	
Sabana sobre pastoreada	0.100	0.220	
Sorgo grano	0.430	0.550	0.700
Sorgo grano rastrojo	0.110	0.180	0.250
Soya	0.480		
Soya después de maíz co rastrojo	0.180		
Tomate de mesa		0.502	
Trébol	0.025	0.050	0.100
Trigo	0.150	0.380	0.530
Trigo rastrojo	0.100	0.180	0.250
Zona rural	0.030		
Zona urbana	0.001		

Fuente: Revista Agronomía Costarricense, 2009.

Anexos 5. Valores del factor de prácticas de conservación del suelo (P), que se emplean paraestimar la pérdida de suelo (USEPA, 2005).

PRÁCTICA	Valor de P
Surcado al contorno	0.750-0.900
Surcos rectos	0.800-0.950
Franjas al contorno	0.600-0.800
Terrazas (2-7 %)	0.500
Terrazas (7-13 %)	0.600
Terrazas (mayor al 13 %)	0.800
Terrazas de banco	0.110
Terrazas de banco en contra pendiente	0.050

Anexos 6. Rangos para clasificar el grado de erosividad del factor de precipitación y escorrentía (R).

CLASE	R (100 ft tf/acre inch/h)	R (MJ/ha mm/h)
Muy baja	< 30	< 500
Baja	30-60	500-1000
Mediana	60-180	1000-3000
Alta	180-350	3000-6000
Muy alta	> 350	> 6000

Anexos 7. Rangos de la erosión de acuerdo al área de la cuenca.

NIVEL DE EROSIÓN	SUPERFICIE en Ha
Leve	(<10 ton/ha año)
Moderada	(10-50 ton/ha año)
Fuerte	(50-200 ton/ha año)
Muy fuerte	(>200 ton/ha año)

Anexos 8. Datos de precipitación de estaciones meteorológicas.

Estación : **CAJANUMA** Latitud N : 9548762
Código : M-207 Longitud E : 699492
Institución : INAMHI Altitud : 2380 msnm

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1990	134.3	204.4	154.2	129.3	85.3	73.6	40.4	24.8	26.6	129.6	125.8	132.0	1260.3	105.0
1991	99.9	209.9	270.6	144.3	99.1	90.0	23.4	78.8	27.0	64.6	68.4	106.4	1282.4	106.9
1992	114.1	132.5	110.3	121.2	64.1	51.3	49.7	7.8	52.8	44.0	106.1	68.4	922.3	76.9
1993	102.9	99.2	341.1	101.5	27.6	61.0	65.4	28.6	43.2	151.4	87.5	251.7	1361.1	113.4
1994	300.0	74.1	197.4	116.8	87.3	65.9	58.6	96.6	31.8	59.9	39.3	117.7	1245.4	103.8
1995	57.6	121.9	97.1	50.3	92.3	6.7	31.8	10.2	18.4	28.5	89.1	127.6	731.5	61.0
1996	114.7	178.7	148.7	108.0	41.9	38.7	26.3	28.8	16.0	43.8	19.7	43.2	808.5	67.4
1997	160.2	106.8	185.0	141.7	97.1	13.3	69.4	18.8	45.7	72.2	119.5	166.6	1196.3	99.7
1998	64.3	180.0	145.0	126.1	64.5	86.4	66.4	37.8	22.4	115.5	92.9	63.0	1064.3	88.7
1999	234.9	347.1	233.0	135.4	164.2	67.9	81.8	58.9	93.0	49.0	31.8	176.8	1673.8	139.5
2000	149.9	285.0	275.3	169.8	97.4	92.6	31.8	57.8	90.0	25.3	33.2	72.3	1380.4	115.0
2001	101.5	181.6	69.1	96.0	80.9	115.6	82.9	56.2	47.5	36.9	110.2	80.2	1058.6	88.2
2002	126.2	189.2	63.8	204.5	73.9	56.9	76.8	10.5	17.3	102.3	79.0	124.8	1125.2	93.8
2003	97.2	176.1	176.5	83.3	115.4	80.0	38.3	8.2	28.1	71.4	49.3	149.7	1073.5	89.5
2004	56.7	130.8	254.3	150.8	74.2	91.3	46.0	11.9	26.0	113.6	128.7	148.2	1232.5	102.7
2005	53.5	176.9	234.4	210.6	47.6	106.2	19.2	7.8	27.5	81.4	70.4	170.3	1205.8	100.5
SUMA	**1967.9**	**2794.2**	**2955.8**	**2089.6**	**1312.8**	**1097.4**	**808.2**	**543.5**	**613.3**	**1189.4**	**1250.9**	**1998.9**	**18621.9**	**1551.8**

Estación : **EL TAMBO** Latitud N : 9549562
Código : M-759 Longitud E : 588727
Institución : INAMHI Altitud : 1580 msnm

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1990	84.9	135.6	203.3	209.8	29.1	0.0	12.0	0.0	0.0	40.8	90.0	33.0	838.5	69.9
1991	97.0	75.3	418.0	17.0	51.0	9.0	0.0	0.0	57.0	9.0	78.0	60.0	871.3	72.6
1992	62.5	92.7	77.0	60.2	105.0	0.0	0.0	0.0	28.0	33.0	61.0	93.0	612.4	51.0
1993	66.0	143.0	456.0	479.0	26.0	5.0	0.0	0.0	51.5	267.0	32.0	288.0	1813.5	151.1
1994	286.0	242.8	200.0	197.8	12.0	0.0	0.0	17.0	140.4	22.0	87.5	19.0	1224.5	102.0
1995	29.5	97.0	97.9	82.5	74.2	0.0	3.5	0.0	8.8	112.0	109.1	110.9	725.4	60.5
1996	105.0	194.3	148.9	144.2	27.8	86.0	50.0	12.0	3.2	92.9	20.9	4.3	889.5	74.1
1997	91.9	33.1	29.0	137.1	3.0	6.8	4.0	0.0	15.2	108.6	133.0	110.3	672.0	56.0
1998	36.0	156.0	252.5	118.5	48.6	0.0	3.6	38.4	11.2	97.5	69.4	33.3	865.0	72.1
1999	95.8	310.5	327.2	30.5	126.5	22.3	3.7	8.1	101.5	42.9	48.0	205.4	1322.4	110.2
2000	126.0	282.5	423.5	108.5	25.9	23.8	0.0	0.0	42.9	2.3	1.2	55.9	1092.5	91.0
2001	92.0	69.2	139.1	29.5	44.0	13.1	4.6	7.5	7.8	8.4	99.3	81.6	596.1	49.7
2002	86.0	67.7	55.8	111.6	53.8	0.0	10.1	0.0	53.6	100.8	191.2	52.8	783.4	65.3
2003	53.8	58.3	176.5	287.9	2.8	20.2	7.4	0.0	28.3	83.9	74.0	26.1	819.2	68.3
2004	13.4	74.6	31.5	136.6	25.3	2.6	0.0	0.0	70.7	52.3	103.0	118.1	628.1	52.3
2005	31.9	137.6	216.0	82.1	52.3	10.5	4.0	0.0	0.0	55.1	38.5	151.4	779.4	65.0
SUMA	**1357.7**	**2170.2**	**3252.2**	**2232.8**	**707.3**	**199.3**	**102.9**	**83.0**	**620.1**	**1128.5**	**1236.1**	**1443.1**	14533.2	**1211.1**

Estación :	**GONZANAMÁ**	Latitud N :	9532642
Codigo :	M-149	Longitud E :	674205
Institución :	INAMHI	Altitud :	2060 msnm

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1990	98.9	167.5	110.7	254.7	35.4	2.6	48.3	2.8	0.0	75.2	79.3	68.2	943.5	78.6
1991	63.5	214.0	382.3	93.9	93.1	8.0	20.3	1.8	19.8	18.5	34.2	69.0	1018.4	84.9
1992	70.5	162.8	138.3	190.8	83.3	3.9	0.0	4.8	55.2	42.1	76.1	77.1	904.8	75.4
1993	96.3	243.2	417.6	192.4	45.7	0.0	0.0	0.0	63.9	46.0	63.9	149.2	1318.0	109.8
1994	320.6	192.7	280.4	191.5	4.0	0.0	0.0	6.7	4.8	22.2	68.5	7.0	1098.4	91.5
1995	18.8	177.1	71.8	89.8	65.3	0.0	1.1	0.0	0.0	53.3	63.7	144.4	685.4	57.1
1996	57.4	167.5	308.6	168.1	65.3	7.8	1.6	4.6	32.7	61.5	63.7	68.8	1007.5	84.0
1997	45.9	103.4	70.1	90.2	22.2	3.0	0.0	0.0	69.4	51.3	289.3	98.5	843.3	70.3
1998	67.0	103.9	235.6	154.1	76.3	2.8	0.0	23.4	57.2	0.0	84.7	68.3	873.4	72.8
1999	173.9	260.6	415.3	68.5	179.3	56.0	3.7	3.0	58.0	49.6	33.4	212.5	1513.8	126.2
2000	100.5	335.6	425.6	180.8	82.0	17.1	0.0	0.0	71.7	6.6	0.0	96.6	1316.5	109.7
2001	246.6	178.1	288.3	178.1	78.6	3.4	0.0	11.6	21.9	7.8	140.7	164.0	1319.1	109.9
2002	121.6	221.9	200.4	343.0	46.6	35.0	10.5	0.0	27.2	37.8	151.4	52.1	1247.5	104.0
2003	88.4	27.7	288.3	178.1	78.6	27.0	31.3	0.0	51.1	42.2	68.7	23.7	905.1	75.4
2004	112.1	217.7	288.3	219.6	98.6	0.0	49.6	0.0	64.4	37.8	152.1	39.8	1280.0	106.7
2005	112.1	188.2	691.8	255.5	178.2	9.3	0.0	0.0	0.0	52.7	70.9	233.7	1792.4	149.4
SUMA	**1794.1**	**2962.0**	**4613.4**	**2849.0**	**1232.7**	**175.8**	**166.4**	**58.6**	**597.3**	**604.5**	**1440.6**	**1572.9**	**18067.1**	**1505.6**

Estación :	**LA ARGELIA**	Latitud N :	9553464
Código :	M-033	Longitud E :	699403
Institución :	INAMHI	Altitud :	2165 msnm

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1990	131.7	161.3	142.8	131.1	77.1	83.0	43.8	33.2	27.1	85.4	107.8	115.0	1139.3	94.9
1991	113.1	153.5	197.0	59.6	70.1	64.0	39.2	61.9	30.9	61.0	22.6	66.5	939.4	78.3
1992	83.5	125.3	94.1	97.0	57.6	47.7	50.4	15.7	39.4	47.1	103.6	64.5	825.9	68.8
1993	85.4	105.4	317.2	93.4	23.4	50.3	62.7	29.2	45.6	91.5	48.0	198.1	1150.2	95.9
1994	213.8	77.6	285.5	123.3	54.1	53.8	81.5	69.3	37.0	29.6	42.8	104.6	1172.9	97.7
1995	59.8	88.0	93.4	52.8	64.7	10.1	33.6	19.9	22.3	36.8	129.0	121.3	731.7	61.0
1996	98.3	126.9	153.2	97.8	30.7	46.5	38.6	34.4	37.1	57.9	13.0	27.0	761.4	63.5
1997	68.1	109.2	101.2	69.9	46.2	20.7	50.2	35.2	42.0	59.9	73.6	123.9	800.1	66.7
1998	40.4	101.9	136.2	88.5	51.2	75.2	49.5	35.7	31.4	116.7	85.8	39.2	851.7	71.0
1999	124.3	299.1	132.2	83.7	120.2	58.9	59.8	50.2	81.7	27.8	48.1	116.7	1202.7	100.2
2000	152.1	178.5	192.1	104.5	81.8	86.8	37.1	50.3	67.7	31.6	25.4	57.6	1065.5	88.8
2001	82.8	116.6	68.3	74.7	76.5	86.9	81.2	52.1	51.5	33.5	53.1	65.7	842.9	70.2
2002	102.0	98.4	48.5	126.7	68.2	38.2	62.8	5.9	18.2	67.7	71.4	70.6	778.6	64.9
2003	80.3	113.3	188.0	68.8	92.4	53.9	34.1	6.9	25.0	73.3	56.5	106.8	899.3	74.9
2004	48.1	117.8	177.6	198.7	46.5	85.4	47.5	12.1	25.2	125.8	95.3	96.3	1076.3	89.7
2005	46.4	134.5	173.6	157.6	33.0	79.0	15.3	31.6	35.9	58.4	60.2	84.8	910.3	75.9
SUMA	**1530.1**	**2107.3**	**2500.9**	**1628.1**	**993.7**	**940.4**	**787.3**	**543.6**	**618.0**	**1004.0**	**1036.2**	**1458.6**	**15148.2**	**1262.4**

Estación : **MALACATOS** Latitud : 9533892

Código : M-143 Longitud : 691965

Institución : INAMHI Altitud : 1500 msnm

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1990	105.2	129.4	22.4	279.8	13.2	7.6	21.3	4.1	21.4	70.6	101.9	37.2	814.1	67.8
1991	103.2	30.7	233.8	72.6	94.3	0.6	12.1	5.3	51.9	27.4	26.4	15.8	674.1	56.2
1992	44.4	22.7	147.2	28.8	17.6	3.3	0.0	0.1	40.8	70.6	52.5	80.1	508.1	42.3
1993	64.5	187.7	187.0	68.2	28.5	6.4	9.6	5.3	20.1	134.6	18.9	98.5	829.3	69.1
1994	102.2	74.6	78.3	43.0	30.7	8.2	9.6	18.6	4.8	41.8	42.8	63.7	518.3	43.2
1995	10.4	81.2	118.5	8.4	2.6	0.0	0.0	3.5	21.4	8.6	62.5	38.8	355.9	29.7
1996	38.7	84.1	15.1	41.8	16.2	8.2	9.6	5.3	17.7	68.4	35.7	56.0	396.7	33.1
1997	68.1	4.1	40.0	98.6	29.6	7.1	9.6	5.3	18.8	72.1	119.6	41.6	514.5	42.9
1998	49.7	136.4	108.6	79.2	10.6	8.2	9.6	5.3	21.4	141.1	35.7	56.0	661.7	55.1
1999	176.5	305.5	330.3	305.9	86.4	18.8	26.2	13.6	60.8	313.3	185.3	134.5	1957.2	163.1
2000	111.9	432.2	196.7	309.8	65.4	17.9	19.7	6.1	33.6	373.5	171.7	309.5	2048.0	170.7
2001	68.8	47.6	93.9	57.3	28.5	5.4	5.8	0.0	0.0	72.2	19.8	129.4	528.7	44.1
2002	44.4	59.1	34.0	154.6	4.5	0.0	0.0	4.4	19.1	83.9	28.2	127.3	559.5	46.6
2003	17.6	100.0	108.2	84.7	2.1	0.0	8.1	0.0	0.1	164.8	19.8	27.3	532.7	44.4
2004	21.8	29.1	20.4	143.9	31.9	5.1	14.6	4.4	29.4	115.6	151.2	107.4	674.8	56.2
2005	21.7	91.4	228.5	41.7	51.4	15.3	0.0	0.0	0.0	103.3	29.2	55.9	638.4	53.2
SUMA	**1049.1**	**1815.8**	**1962.9**	**1818.3**	**513.5**	**111.9**	**155.8**	**81.1**	**361.3**	**1861.7**	**1101.1**	**1379.0**	**12211.7**	**1017.6**

Estación : **NAMBACOLA** Latitud: 9542159

Código : M-763 Longitud: 673845

Institución : INAMHI Altitud : 1822 msnm

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1990	133.7	270.7	416.7	332.2	20.0	13.0	0.0	52.0	104.0	68.0	73.0	77.0	1560.3	130.0
1991	111.0	112.9	378.0	69.0	56.0	10.0	0.0	0.0	30.0	90.0	50.0	79.0	985.9	82.2
1992	61.0	223.0	231.2	68.6	76.0	0.0	0.0	0.0	78.0	46.0	101.5	39.4	924.7	77.1
1993	115.0	215.3	310.0	305.0	57.0	0.0	0.0	0.0	37.0	70.0	65.0	273.7	1448.0	120.7
1994	196.9	147.0	273.8	138.0	2.4	0.0	0.0	10.0	6.0	0.0	26.3	180.5	980.9	81.7
1995	133.5	96.0	109.8	171.5	87.4	2.5	23.0	0.0	9.5	48.5	42.0	61.0	784.7	65.4
1996	40.0	197.8	282.0	167.2	10.3	32.0	0.0	0.0	6.5	66.3	13.4	7.4	822.9	68.6
1997	95.6	78.8	83.5	203.0	0.0	10.5	0.0	4.0	19.9	131.3	106.1	82.4	815.1	67.9
1998	66.0	123.4	393.5	547.5	111.6	0.0	0.0	24.3	14.5	100.7	83.6	59.3	1524.4	127.0
1999	160.7	783.5	470.7	5.5	50.7	22.8	19.2	0.0	47.2	25.5	14.0	154.4	1754.2	146.2
2000	113.4	116.8	341.3	254.7	16.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	865.2	72.1
2001	161.4	362.9	372.8	30.6	17.2	6.0	2.3	0.0	4.2	0.0	103.9	117.6	1178.9	98.2
2002	76.6	24.5	183.4	45.4	32.3	3.0	2.2	0.0	11.7	32.7	64.4	88.3	564.5	47.0
2003	21.2	33.9	163.1	221.1	17.1	0.0	0.0	0.0	0.0	60.7	42.6	77.1	636.8	53.1
2004	9.2	31.4	192.7	123.5	50.9	74.9	7.2	0.0	58.6	9.5	15.5	61.5	634.9	52.9
2005	14.0	146.4	361.0	73.0	23.4	12.3	0.5	0.0	0.0	33.8	20.0	126.2	810.6	67.6
SUMA	**1509.2**	**2964.3**	**4563.5**	**2755.8**	**628.3**	**202.0**	**54.4**	**90.3**	**427.1**	**783.0**	**829.3**	**1484.8**	**16292.0**	**1357.7**

Estación :	**QUILANGA**	Latitud N :	9524366
Código :	M241	Longitud E :	677664
Institución :	INAMHI	Altitud :	1819 msnm

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1990	114.9	232.2	352.5	250.1	57.7	6.4	21.8	0.0	1.0	58.2	53.4	102.3	1250.5	104.2
1991	85.4	217.2	270.1	29.7	76.5	22.5	12.0	0.0	3.6	20.2	36.6	78.8	852.6	71.1
1992	152.4	133.6	169.3	83.6	30.5	9.5	2.4	1.0	14.9	29.6	47.6	165.2	839.7	70.0
1993	111.8	234.1	474.9	222.3	31.9	0.0	14.5	0.0	79.4	119.7	179.5	357.6	1825.7	152.1
1994	334.6	325.3	501.1	196.3	29.7	2.4	0.0	1.8	6.0	7.8	60.0	174.8	1639.8	136.7
1995	79.0	253.8	280.2	157.1	46.4	4.0	1.5	0.0	2.2	61.6	111.7	222.4	1219.9	101.7
1996	156.9	219.5	367.3	156.2	22.5	92.1	0.0	0.0	7.4	74.3	23.8	27.9	1147.9	95.7
1997	145.8	120.1	147.0	220.0	22.2	7.5	1.0	0.0	60.5	47.9	198.7	223.4	1194.1	99.5
1998	164.9	393.1	296.3	230.8	158.1	0.3	0.0	15.7	21.3	116.4	88.8	79.2	1564.9	130.4
1999	170.7	577.1	405.3	57.5	129.0	54.1	2.0	0.0	84.4	30.4	51.8	309.0	1871.3	155.9
2000	250.3	258.9	488.5	179.4	71.4	32.3	0.9	0.0	58.5	20.0	0.0	88.8	1449.0	120.7
2001	167.7	258.9	249.2	72.5	49.5	0.8	0.8	0.0	5.0	20.6	149.5	137.0	1111.5	92.6
2002	51.8	91.2	200.5	220.0	32.0	5.0	1.5	7.0	25.3	128.0	180.5	48.0	990.8	82.6
2003	101.5	258.9	352.5	61.0	6.5	30.5	2.5	1.1	16.1	32.1	51.6	88.0	1002.5	83.5
2004	77.0	131.8	168.0	78.8	28.2	9.9	2.2	1.0	0.0	47.3	98.1	97.1	739.3	61.6
2005	49.0	184.3	549.5	55.4	120.4	0.0	0.0	0.0	0.0	67.1	52.3	172.1	1250.1	104.2
SUMA	**2213.7**	**3890.0**	**5272.2**	**2270.7**	**912.5**	**277.3**	**63.1**	**27.6**	**385.6**	**881.2**	**1384.0**	**2371.6**	**19949.6**	**1662.5**

Estación :	**QUINARA**	Latitud N :	9523236
Código :	M-764	Longitud E :	695345
Institución :	PREDESUR	Altitud :	1595 msnm

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1990	73.5	243.1	60.4	141.3	68.9	12.5	5.4	6.0	4.1	52.2	59.2	34.6	761.2	63.4
1991	151.3	180.7	161.2	85.0	32.0	24.6	0.1	1.5	12.7	43.0	68.7	81.5	842.3	70.2
1992	71.5	78.9	104.5	90.5	40.7	6.1	0.0	5.3	46.3	85.9	99.9	87.3	716.9	59.7
1993	110.0	165.5	290.3	103.6	51.8	0.3	0.7	0.3	127.1	128.7	72.3	300.2	1350.8	112.6
1994	144.5	181.6	184.8	137.5	27.5	4.1	2.7	11.1	7.9	221.1	50.7	42.3	1015.7	84.6
1995	30.8	136.2	130.7	107.4	32.6	0.0	4.0	0.0	4.8	74.7	85.7	100.7	707.6	59.0
1996	159.0	70.2	193.6	114.1	37.6	59.8	0.8	1.3	2.7	44.8	31.4	21.9	737.2	61.4
1997	112.0	67.5	106.4	9.1	25.7	0.0	0.0	71.1	69.2	125.7	127.0	81.3	795.0	66.3
1998	75.4	80.9	144.4	169.7	97.5	7.6	0.7	13.4	3.7	0.0	3.1	39.9	636.3	53.0
1999	100.1	312.2	181.2	30.4	113.3	25.6	9.3	7.2	50.2	17.6	114.2	156.2	1117.5	93.1
2000	131.5	239.1	310.9	87.9	90.3	30.1	0.8	7.6	39.9	3.7	10.8	76.3	1028.9	85.7
2001	131.9	110.3	118.5	81.6	38.4	10.3	3.2	0.3	11.0	102.4	13.4	118.5	739.8	61.7
2002	19.8	98.8	145.6	126.5	42.8	8.5	1.1	12.6	0.0	100.2	77.6	87.6	721.1	60.1
2003	76.1	94.2	191.8	92.8	15.1	3.4	1.5	0.0	27.5	121.9	79.9	73.2	777.4	64.8
2004	66.1	91.2	76.3	110.2	34.2	12.4	11.6	0.0	23.7	61.5	162.4	163.3	812.9	67.7
2005	61.2	174.9	351.3	116.6	58.7	16.1	3.3	10.8	33.8	92.8	82.8	114.8	1117.1	93.1
SUMA	**1514.7**	**2325.3**	**2751.9**	**1604.3**	**807.1**	**221.4**	**45.2**	**148.5**	**464.5**	**1276.2**	**1139.1**	**1579.6**	**13877.7**	1156.5

Estación :	**YANGANA**	Latitud :	9516982
Código :	M147	Longitud :	702487
Institución :	NAMHI	Altitud :	1860 msnm

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	MEDIA
1990	64.2	197.6	84.5	127.0	59.1	20.4	9.2	9.6	12.2	112.2	63.9	82.2	842.1	70.2
1991	53.0	110.8	190.8	97.4	73.8	28.1	4.0	2.1	41.4	28.9	125.9	74.1	830.3	69.2
1992	49.9	112.5	87.2	71.2	51.5	2.6	0.8	5.8	47.4	38.2	129.2	141.0	737.3	61.4
1993	174.2	221.5	337.7	127.9	35.8	1.2	45.3	0.3	82.2	103.6	119.6	256.4	1505.7	125.5
1994	147.4	205.0	204.6	139.2	26.3	5.5	5.9	12.8	9.1	222.0	73.3	46.8	1097.9	91.5
1995	19.0	111.5	111.2	162.4	35.2	2.2	11.6	2.8	7.8	85.5	175.4	127.0	851.6	71.0
1996	113.9	162.0	247.9	101.3	26.2	10.9	0.0	4.1	11.6	52.9	47.0	50.9	828.7	69.1
1997	112.2	75.8	63.3	106.4	11.1	6.7	3.0	9.7	90.9	99.8	89.6	87.4	755.9	63.0
1998	47.7	136.9	148.7	169.7	92.0	11.4	1.6	16.4	4.6	116.6	4.2	43.0	792.8	66.1
1999	188.8	416.8	118.3	101.9	176.6	58.3	62.6	27.1	36.3	15.6	91.4	201.3	1495.0	124.6
2000	181.5	294.1	321.6	86.5	137.3	66.3	19.5	47.9	76.5	8.9	7.3	78.4	1325.8	110.5
2001	148.7	193.6	181.9	127.3	78.8	32.3	22.5	100.4	51.2	156.9	74.5	90.4	1258.5	104.9
2002	57.8	127.6	161.3	177.3	96.5	33.7	55.2	14.5	36.3	52.1	89.6	172.0	1073.9	89.5
2003	94.8	94.5	176.9	96.7	201.3	59.3	18.8	3.7	10.2	104.5	129.5	102.5	1092.7	91.1
2004	60.5	91.9	147.4	158.5	59.2	87.8	73.1	16.4	24.7	136.2	128.6	191.1	1175.4	98.0
2005	63.0	126.0	233.8	120.1	59.8	73.9	15.1	8.1	5.9	286.0	35.6	163.9	1191.2	99.3
SUMA	**1576.6**	**2678.1**	**2817.1**	**1970.8**	**1220.5**	**500.6**	**348.2**	**281.7**	**548.3**	**1619.9**	**1384.6**	**1908.4**	**16854.7**	**1404.6**