Caracterización y evaluación de la Cuenca Alta del Río Santa Rosa

Gilberto Concha Egas
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, FICT
Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL
Guayaquil, Ecuador
gconcha@geologist.com

Director de Tesis: Ing. Gastón Proaño

Resumen

El presente trabajo desarrolla una metodología modelo para la caracterización y evaluación de cuencas hidrográficas en Ecuador, usando los Sistemas de Información Geográfica (SIG). La cuenca del presente estudio es la cuenca alta del Río Santa Rosa, ubicada en la provincia de El Oro. Inicialmente se presenta la aplicación de los SIG con técnicas Geoestadísticas para generar el Modelo Digital del Terreno (MDT) y determinar las características generales de la cuenca. Luego, se presenta la caracterización de la cuenca desde diferentes puntos de vista, y con esta información se calcula la erosión del suelo con la ayuda del GIS, con el objetivo de determinar el estado y el uso de los recursos naturales dentro de la cuenca. Finalmente, se compara los valores obtenidos de la erosión hídrica a partir de los SIG con los sedimentos en suspensión estimados a partir de la estación hidrométrica en el Río Santa Rosa.

Palabras Claves: *Cuenca, caracterización, erosión, SIG.*

Abstract

The present work develops a methodological model for the characterization and evaluation of watershed in Ecuador, using Geographic Information Systems (GIS). The watershed of the present work is the top watershed of Santa Rosa River, located in El Oro province. Initially the application of the GIS is presented with Geostatistical techniques to generate the Digital Elevation Model (DEM) and to determine the general characteristics of the watershed. Consequently, the watershed characterization is presented from different points of view and with this information the soil erosion is calculated with GIS help, with the objective of determining the state and the use of natural resources within the watershed. Finally, a comparison is made between the values obtained from the hydric erosion with GIS help with the silts in suspension estimated from hydrometric station in Santa Rosa River.

Key Words: *Watershed, characterization, erosion, GIS.*

1. Introducción

La disponibilidad de recursos hídricos y edáficos en una cuenca hidrográfica, depende de las tendencias dinámicas del funcionamiento de este tipo de sistemas, en particular los procesos de erosión incluida su cuantificación, la influencia de tratamientos integrados de producción y protección aplicados en la región y del ordenamiento territorial a partir de las limitantes de riesgo ambiental más comunes.

La crisis económica y social en las comunidades rurales, va de la mano con el uso intensivo de los recursos naturales, poniendo en serio peligro el futuro de las nuevas generaciones y el equilibrio de los ecosistemas naturales. Si bien es cierto que, los recursos naturales son la principal fuente de subsistencia para las comunidades rurales, la mala utilización de éstos, está provocando problemas ambientales como: disminución de caudales, alteración de ciclos hidrológicos, degradación de suelos, erosión, contaminación, disminución del potencial productivo de las tierras, entre otros.

Ante el incremento de la población y del mejoramiento de los niveles de vida, el agua se viene convirtiendo en un recurso escaso en muchos países del mundo, lo cual también ocurre en Ecuador. Existe un reconocimiento creciente de que la cantidad de agua con que se cuenta en una región dada es finita y puede convertirse en elemento limitante para su desarrollo.

Las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco referencial y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sostenible. Bajo esta concepción la cuenca hidrográfica representa un espacio físico, tangible pues permite la concurrencia de los distintos factores físicos, intereses humanos y actividades económicos y constituye un instrumento valioso del estado y la sociedad para administrar su actividad, conciliar intereses, conservar la biodiversidad y permitir un uso sostenido de los recursos naturales.

Para la caracterización y evaluación de cuencas hidrográficas a nivel mundial, se viene aplicando ampliamente los SIG, los cuales se definen según los siguientes criterios:

1. Los SIG son el resultado de importantes líneas de investigación y desarrollo en diferentes frentes, tanto en el plano conceptual y teórico como en el plano tecnológico. Confluyendo ambos en este producto que se ha dado a llamar SIG.
2. Herramienta compleja, con grandes potencialidades y que requieren una serie de conocimientos y estudios en profundidad para obtener de ella conocimiento adecuados.
3. Herramienta muy versátil con un potencial suficiente como para manejar grandes volúmenes de información y modelos.

1.1. Ubicación del área de estudio.

La Cuenca Alta del Río Santa Rosa se encuentra localizada en la parte central de la provincia de El Oro, al suroccidente de Ecuador. La cuenca constituye una prolongación de la Cordillera de Daucay en su extremo occidental a una altitud de 2200 m.sn.m hasta el sitio de captación de agua potable que abastece a la ciudad de Santa Rosa (UTM 617.758 E y 9606743 N), aguas abajo de la población de El Recreo de cota 100 m.s.n.m. Las coordenadas geográficas de la cuenca alta del Río Santa Rosa se muestran en la Tabla 1., y en la Figura 1. se observa la ubicación geográfica de la cuenca .

Tabla 1. Delimitación de la cuadrícula que contiene la cuenca alta del Río Santa Rosa en Coordenadas UTM

Coordenada ESTE	Coordenada NORTE
616000	9600000
641000	9600000
616000	9608000
641000	9608000

La cuenca cubre los territorios de las parroquias La Avanzada (15,24%) y Torata (69,10%) pertenecientes al Cantón Santa Rosa, Ayapamba (15,02%) – Cantón Atahualpa y la parroquia Piedras (0,64%) – Cantón Piñas.

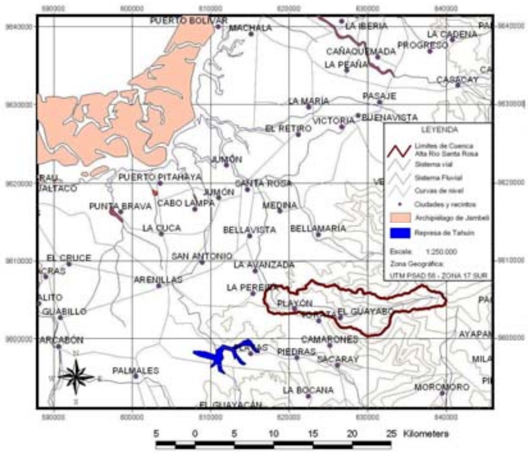

Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca alta del Río Santa Rosa en la Provincia de El Oro.

2. Objetivo.

El objetivo principal del presente estudio es aplicar una metodología modelo para la caracterización y evaluación de cuencas hidrográficas en Ecuador, utilizando como herramienta los SIG.

3. Metodología.

3.1. Recopilación de información.

Se requiere la búsqueda de información básica para iniciar el estudio de Caracterización y Evaluación de la Cuenca Alta del Río Santa Rosa, demandando una investigación profunda en las entidades públicas y privadas que tienen relación con la región donde se localiza la cuenca. Se requiere la utilización de una serie de datos topográficos, climáticos e hidrológicos y de información fisiográfica incluyendo red de drenaje, vegetación, litología y suelos, y demás información asociada al dominio de la cuenca. Mediante esta investigación se hizo un inventario que incluye los siguientes aspectos:

- Información Topográfica
- Información Hidrometeorológica
- Información Geológica, Geomorfológica, Riesgos Naturales
- Fotografías Aéreas
- Uso de Suelo

3.1.1. Información topográfica. La entidad encargada de la elaboración de las cartas topográficas en Ecuador, es el Instituto Geográfico Militar (IGM).

3.1.2. Hidrometeorología. Este tipo de datos comprende información climatológica e hidrométrica. La información climatológica incluye registros de precipitación, temperatura, humedad atmosférica, evaporación y vientos en la cuenca de estudio y en cuencas vecinas de la misma región.

La información hidrométrica comprende los registros de los caudales líquidos y sólidos en tramos seleccionados de las corrientes de drenaje. Estos caudales constituyen información valiosa con que se puede contar en los estudios hidrológicos; desafortunadamente, es la más escasa. Cuando existen los registros, la información que se debe recolectar son: a) caudales medios diarios, b) caudales máximos instantáneos, c) registro de aforos líquidos y sólidos y d) uso de la tierra

En el Ecuador, el estudio de la evaluación de la disponibilidad, calidad y administración de usos del agua en todo el territorio nacional, cuenta con varias instituciones encargadas de esas tareas, pero entre las principales están el INAMHI, y el Consejo Nacional de Recursos Hidrológicos (CNRH).

3.1.3. Uso y tipo de suelo. Para establecer el uso del suelo, se procedió a la revisión y análisis, de la información disponible, acerca del uso del suelo que ha sido publicada por Programa Nacional de Regionalización Agraria -PRONAREG- en 1985, a escala 1:200.000, en base a la interpretación de fotografías aéreas tomadas entre 1976 a 1983. También se consultó el trabajo de Vera (1996), quién empleó información del CLIRSEN (1989) para elaborar cartografía temática de varias cuencas en la Provincia de El Oro. Además se consultó el muestreo y análisis de suelos realizado por Fuentes y Pacheco (1998).

Como en ambos trabajos, el nivel de detalle, no es el requerido para el presente estudio y al no disponer de fotografías aéreas recientes, ni de imágenes satelitales en buen estado, se optó por adquirir las fotografías aéreas disponibles en IGM, a escala 1:60.000 con fecha de toma de los años 83 y 86, procediendo a una fotointerpretación del tipo de uso del suelo y cobertura vegetal existente.

3.1.4. Información geológica, geomorfológico y riesgos Naturales. Para establecer esta información, se procedió a la revisión y análisis, de la documentación disponible en los Municipios de Santa Rosa, Atahualpa y Piñas; los estudios de las Compañías Mineras Zambrano y Ecuava, así como de la cartografía existente acerca de las características morfopedológicas, a escala 1:200.000 (PRONAREG, 1985), el mapa geomorfológico y de riesgos de erosión a escala 1:100.000 (CLIRSEN, 1989) y el mapa geológico a escala 1:100.000. Además de la fotointerpretación de las fotografías aéreas a escala 1:60.000 con fecha de toma 83 y 86.

3.2. Generación de información.

3.2.1. Procesamiento. La gestión integral de la información en una cuenca es un punto fundamental, para lo cual es necesario la aplicación de una herramienta que permita capturar, almacenar, validar, integrar, manipular, analizar y representar datos referenciados sobre la tierra, de la información disponible, esta herramienta es el SIG y como plataforma se empleo el Software ArcGis™, y los módulos ArcScan, 3D Analyst, Spatial Analyst, Geostatistical Analyst y ArcHydro Tool.

3.2.2. Área de la cuenca. Una vez que se ha recopilado las hojas topográficas correspondientes al área de estudio, se procederá a georeferenciar y vectorizar con el módulo ArcScan del software ArcGis las curvas de nivel existentes. Con dicha información digitalizada se desarrollará un Modelo Digital del Terreno (MDT) con los módulos Geostatistical, Spatial y 3D Analyst. Este MDT, permitirá calcular una serie de parámetros.

3.3. Procesamiento de los datos obtenidos

Una vez que se ha recopilado toda la información disponible, se la digitalizará y se la almacenará en una base de datos georeferenciada, al igual que los datos generados a partir de las fotografías aéreas. Esta información será necesaria para realizar el análisis cartográfico del deterioro físico ambiental por erosión hídrica de la cuenca.

3.4. Resultados.

3.4.1. Gráficos. Las ventajas del trabajar con un SIG, es la presentación de resultados de forma gráfica (secuencia de mapas) de tal forma que ayudan a la comprensión e interpretación de resultados de una manera rápida y sencilla.

3.4.2. Tabulares. Así como el modelo permite visualizar los resultados mediante gráficos, también presenta estos resultados a manera de tablas, indicando características como longitud de cauce, área de la cuenca, etc.

4. Características de la cuenca de drenaje.

4.1. Modelo digital del terreno (MDT).

El método empleado para generar el MDT de la cuenca es el de estimación de datos del vector altura a partir de mapas topográficos a través del análisis geoestadístico de ArcGis Geostatistical Analyst. En la Figura 2 se presenta la vista en 3D del MDT de la cuenca.

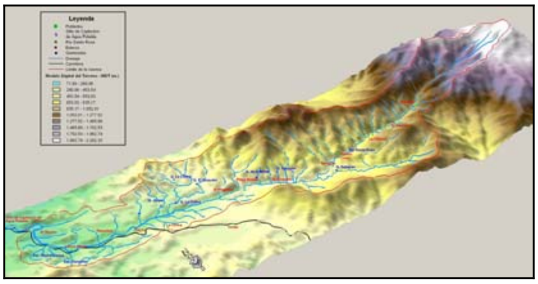

Figura 2. Vista en 3D del MDT de la cuenca.

4.2. Red hidrográfica.

En el Figura 3 se presenta el sistema hidrográfico del río Santa Rosa, que nace en la cota 2200 con el nombre de Carne Amarga o Santa Rosa y al unirse con la Quebrada Sabayán en la cota 400 conforman el Santa Rosa. En su avance recibe los aportes de las Quebradas: El Guayabo, La Chilca, Fruta de Pan, de Las Minas, entre las principales.

Figura 3. Sistema hidrográfico del Río Santa Rosa

4.3. Área de la cuenca.

El área de la cuenca calculada a partir del software ArcGis es de 80177360,828 m^2 = 80,177 $Km^2 \approx 80,18$ Km^2. Según la clasificación de cuencas hidrográficas por tamaño según Ven Te Chow, la cuenca esta en el rango de área de 25– 250 Km^2, rango para una cuenca pequeña.

4.4. Curva hipsométrica.

La elevación media de la cuenca estimada a partir de la curva hipsométrica, Figura 4, es de 550 m. aproximadamente, que equivale a la cota correspondiente al 50% del área de la cuenca.

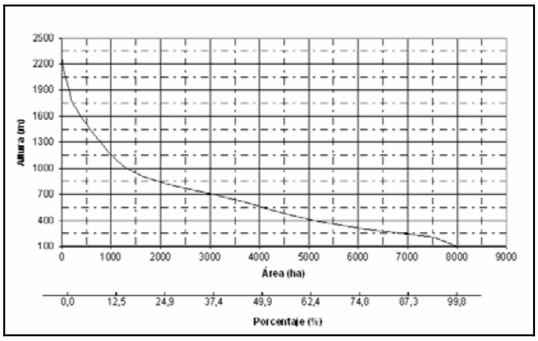

Figura 4. Curva hipsométrica de la cuenca

4.5. Pendiente de la cuenca

La pendiente media de la cuenca es del 44,9%. Para calcularla se empleó el criterio de J.W. Alvord. La longitud total de curvas de nivel dentro de la cuenca es de 900630.127 m., el desnivel entre curvas es 40 m y el área de la cuenca 80177360,8 m^2.

Otro método para calcular la pendiente de la cuenca, es a partir del MDT con ArcGis Spatial Analyst. En la Figura 5 se presenta el mapa de pendientes en porcentaje de la cuenca.

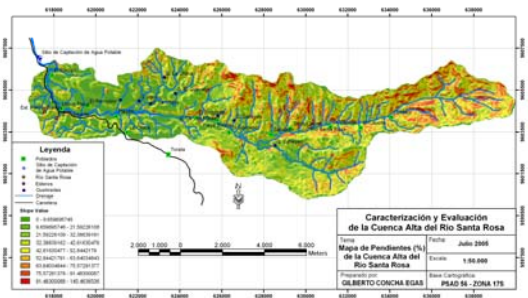

Figura 5. Mapa de pendientes en porcentaje

4.6. Coeficiente de masividad.

El coeficiente de masividad de la cuenca es 0,5599 km^{-2}

4.7. Características de la red de drenaje.

El área de la cuenca pertenece al gran dominio de las rocas sin agua, debido a la ausencia de permeabilidad primaria, sin embargo esta condición está dada por fracturación, encontrándose consecuentemente agua almacenada y en circulación en fracturas y fallas. En la zona baja, en dirección hacia la costa, se encuentra material no consolidado en donde yacen importantes acuíferos.

4.7.1. Tipos de corriente. Los sistemas de cauces que fluyen a través de la red de drenaje en la cuenca son permanentes como intermitentes. Durante los períodos lluviosos (enero - mayo) los caudales aumentan y las aguas se tornan turbias de color café, debido a los sedimentos arrastrados por la erosión diluvial y aluvial. En períodos de estiaje el caudal del río baja considerablemente y las aguas recuperan su transparencia.

4.7.2. Tipo de drenaje. La cuenca presenta los patrones o modelos de drenaje: dendrítico, subparalelo, angular, circular y paralelo.

4.7.3. Orden de cuenca. Según la clasificación de corrientes de Horton, la Cuenca Alta del Río Santa Rosa es de cuarto orden, Figura 6.

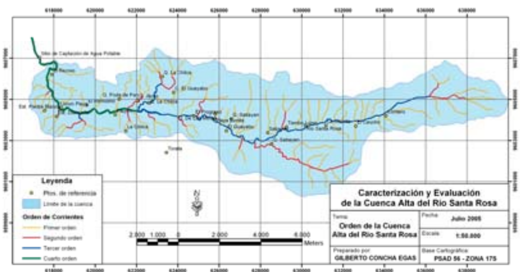

Figura 6. Orden de la Cuenca Alta del Río Santa Rosa

4.7.4. Relación de bifurcación. La relación de bifurcación de la cuenca es de 4,24.

4.7.5. Densidad de drenaje. La densidad de drenaje de la cuenca es de 1,84 Km/Km^2. Se dice que una red hidrográfica es densa cuando tiene una densidad de drenaje superior a 2,5 Km/Km^2; por lo que la cuenca en estudio puede ser considerada con una densidad de drenaje regular.

5. Caracterización de la cuenca.

5.1. Clima.

Para determinar las características climáticas de la cuenca se han identificado 19 estaciones (14 pluviométricas y 5 climatológicas), distribuidas en un rango de altitud entre 10 a 2580 m.

5.1.1. Características climáticas de la cuenca. El valor medio anual de precipitación va desde 773 mm para 129 m de altura hasta 1888 mm a 1540 m. de altura, que significa un incremento de 0,79 mm/m. La temperatura media anual varía desde 24,7 °C a 21,7 °C, es decir una diferencia de 3 °C, en una diferencia de altura 1021 m. (1159 m-129 m), esto es equivalente a una disminución de 0,0029 °C por cada metro de altitud.

5.1.2. Zonas de vida. Con la herramienta de ArcGis Spatial Analyst, calculadora de mapas raster, se identifica y delimita las zonas de vida según la clasificación de Holdridge, en base a los mapas de los datos medios de temperatura, precipitación, evaporación para las estaciones meteorológicas seleccionadas, así como del MDT. Las zonas de vida se presentan en la Figura 7 y se describen a continuación:

a) La zona de vida bosque muy seco Tropical (bms-T), caracterizada por una temperatura entre 24 a 26 °C y precipitación de 500 a 1000 mm anuales, comprende 742,235 ha (9,25 %).

b) El bosque seco Tropical (bs-T), con temperatura entre 24 y 25 °C y lluvia de 1000 a 2000 mm, que se delimita hasta alturas de 300 m, comprende 1351,190 ha (16,85 %).

c) El bosque húmedo Pre-Montano (bh-PM), entre alturas de 300 a 2000 m de altura con temperatura de 18 a 24 °C y lluvia de 1000 a 2000 mm, comprende 5746,8 ha (71,67 %).

d) El bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB), con alturas superiores a los 2000 m, con precipitaciones entre 2000 a 4000 mm. y temperaturas menores a 18°C, comprende 177,509 ha (2,21%).

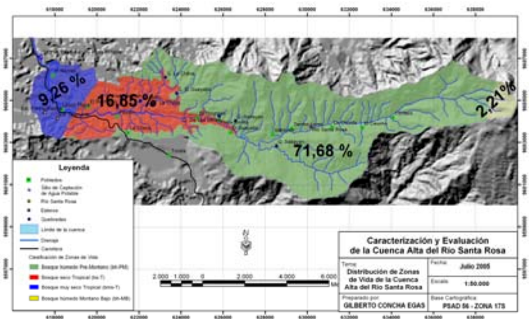

Figura 7. Mapa de pendientes en porcentaje

5.2. Hidrología.

5.2.1. Caudales medios. Para conocer los caudales del río Santa Rosa se considera la estación limnimétrica Santa Rosa en El Vado (H-573) y los caudales medio mensuales, registrados y estimados por correlación con las estaciones hidrométricas Arenillas en Arenillas (H-574) y Caluguro A. B., el caudal medio anual es 1,55 m^3/s (17,03 lps/km^2).

5.2.2. Caudales máximos. Los cálculos de los caudales máximos han sido estimados por Duque-CIDIAT considerando los registros de precipitación máxima en 24 horas de la estación pluviométrica Paccha, realizando un ajuste a una distribución de probabilidad tipo Gumbel. A partir del hidrograma adimensional obtenido para un Tr=50 años y caudal al pico (qp) de 46 m^3/s, se estimo un tiempo pico (tp) de 1,4 horas.

5.3. Geología.

5.3.1. Litología. La composición litológica de la mayor parte de la cuenca es de un conjunto de rocas metamórficas, que han estado sometidas a un intenso calentamiento y a una presión elevada en niveles profundos, debido generalmente al efecto de movimientos tectónicos causados por la deriva de los continentes lo cual provoca la deformación por plegamiento y fractura de las formaciones geológicas.

Según Feininger (1975), estas rocas metamórficas constituyen un basamento uniforme y antiguo que pertenecen a varios grupos de edades, composición e historias metamórficas diferentes. También en menor extensión hay pequeñas zonas de contacto con formaciones geológicas constituidas por rocas volcánicas. Estos grupos y formaciones se describen a continuación y se presentan en la Figura 8.

a) Grupo Tahuín, esta constituido por rocas metamorfizadas a presión baja, del Paleozoico. Las rocas de este grupo se localizan al Norte de la cuenca alta del río Santa Rosa, al Este limita con una gran falla que es el contacto con las rocas volcánicas de la Formación Celica, al Oeste la falla La Palma, la separa de una pequeña extensión de la serpentina El Toro y de la Formación Raspas al Sur.

Según Feininger (1975) dentro de la cuenca alta hay tres subdivisiones o unidades que en el mapa geológico se las representa:

- Unidad PzTa compuesta por anfibolita gneisica (a)
- Unidad PzT4 a base de gneis (gr) y migmatitas graníticas (x).

El espesor total de este grupo se cree que excede los 10.000 m.

b) Formación Raspas, la constituyen rocas metamórficas de alta presión, del Cretácico. Se localiza entre la población de Limón Playa y la Qda. Sabayán en la margen derecha del Río Santa Rosa, y en el extremo Oeste se encuentra separada por una pequeña intercalación de la serpentinita El Toro, por la falla La Palma. Al Norte la limita el grupo Tahuín, al Este hay una zona de contacto con una pequeña extensión de serpentinita el Toro.

Son rocas metamórficas de alta presión en los que predominan esquistos (q) pelíticos de grano medio a grueso compuestos por minerales cuarzo y mica de color blanco.

Además se encuentran eclogitas (e) y esquistos glaucofánicos. Las eclogitas están compuestas por el mineral granate. La roca va desde casi masiva a fuertemente bandeada. El esquisto glaucofánico es de grado fino, de color azul, debido al mineral glaucofano. El espesor de esta formación supera los 2.000 m.

c) Formación Serpentina El Toro, constituida por rocas metamórficas del periodo Cretácico. Se localiza en pequeñas extensiones al extremo Oeste de la Cuenca Alta del Río Santa Rosa, en el trayecto desde Limón Playa al sitio la Palma, que es justamente la traza de la falla la Palma; y al extremo este igualmente hay otra pequeña extensión que se encuentra caracterizada por una serpentina de estructura laminar y por el polimorfo de antigorita de color verde oscuro, grano fino a medio, y de masiva hasta fuertemente esquistosa.

Esta formación está emplazada en concordancia o con la misma inclinación que las capas del Grupo Piedras, y engloba a la Formación Raspas. Se la considera de edad mas joven que las rocas del Grupo Tahuín y Formación Raspas; su edad correspondería al Cretácico superior.

d) Formación Celica, compuesta por rocas volcánicas de edad más joven que las metamórficas, se localiza en el extremo este de la cuenca alta, a partir de una falla tectónica que es la zona de contacto entre esta formación, el Grupo Tahuín y Serpentina el Toro.

Su litología básicamente está formada por andesitas homogéneas, masivas y de color verde, su textura es porfirítica con fenocristales máficos y andesina-labradorita. Su espesor supera los 2.000 m.

5.3.2. Calificación cualitativa de la susceptibilidad de las rocas a la erodibilidad. Según esta calificación cualitativa solamente la Formación Serpentina El Toro sería moderadamente susceptible y las restantes formaciones tendrían escasa susceptibilidad.

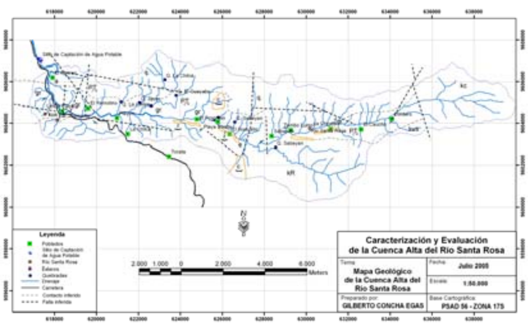

Figura 8. Mapa geológico de la cuenca.

5.4. Geomorfología.

El área de la cuenca forma parte de la Región Central o Sierra correspondiente al conjunto desde Zaruma - Saraguro hasta la frontera con el Perú.

El paisaje en general se caracteriza por un descenso de altitudes máximas que alcanzan hasta 2200 metros y una repartición confusa de los conjuntos fisiográficos sin orientación preferencial.

Esta región Sur de la Sierra ecuatoriana que abarca las provincias de El Oro, Loja y Zamora, se caracteriza por la ausencia de actividad volcánica reciente y una fuerte disección en las rocas del substrato: volcánicas al Oeste, metamórficas al Sur y al Oeste.

Los relieves más altos están entre 400 y 2200 metros, y forman cordilleras estrechas alargadas, divergentes, con inclinación hacia el Sur-Oeste formando valles con direcciones ortogonales.

Las rocas sobre las que se modela este paisaje son volcánicas, intrusivas ácidas, y metamórficas. El diseño de drenaje predominante es dendrítico, patrón formado por una corriente principal con seis o mas tributarios primarios y secundarios uniéndose libremente en todas direcciones. En la Figura 9 se presenta el mapa de unidades geomorfológicas de la cuenca.

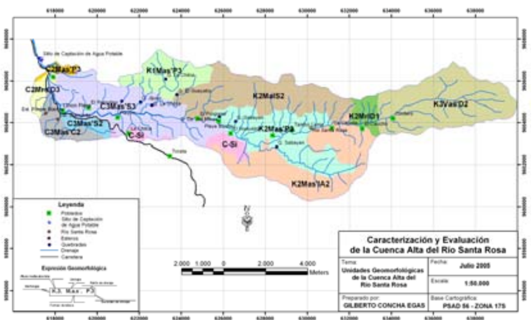

Figura 9. Mapa de unidades geomorfológicas

5.4.1. Pendientes. En la Tabla 2 se cuantifican los rangos de pendientes de la cuenca calculados a partir del MDT con ArcGis Spatial Analyst.

Tabla 2. Pendientes y superficie existente en el área de estudio.

Rangos (%)	Superficie (ha)	Área de la cuenca (%)
0 - 5	948,87	11.83
5 - 12.	686,88	8,57
12 - 25.	1200,24	14,97
25 - 40	1935,54	24,14
40 - 70	2683,98	33,48
> 70	562,32	7,01

5.5. Suelos.

En la cuenca existe una diferenciación climática que permite agrupar los suelos por su régimen de humedad, presentándose los tipos ústico y údico.

5.5.1. Uso del suelo. El uso pecuario esta constituido mayormente por bosque y pasto para alimento de ganado vacuno. En la Tabla 3 se presenta la superficie de bosque y pasto en la cuenca en diferentes años; el uso del suelo fue estimado a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas de diferentes años.

Tabla 3. Uso de suelo de la cuenca en diferentes años

Año	1986	1990	2005
Pasto (ha)	3873 (48%)	4505 (56%)	6875 (86%)
Bosque (ha)	4145 (52%)	3513 (44%)	1143 (14%)
Total (ha)	8018	8018	8018

En la Figura 10 se presentan los subgrupos de suelos identificados en la cuenca, de acuerdo al sistema de clasificación taxonómica norteamericana (USDA); los subgrupos Oxic Ustropepts, Typic Eutropepts y Oxic Dystropepts pertenecientes al orden inceptisoles, y el subgrupo Tropofluvent perteneciente al orden entisoles

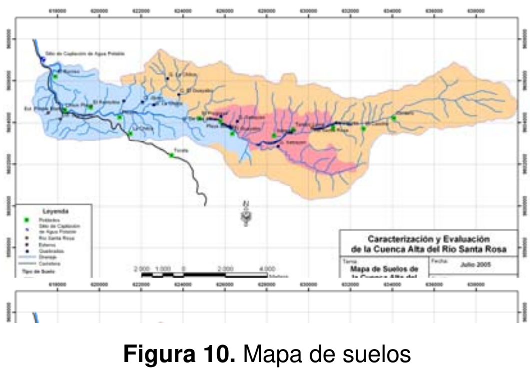

Figura 10. Mapa de suelos

6. Análisis cartográfico del deterioro físico ambiental por erosión hídrica

La metodología seguida para la elaboración de la cartografía de estados erosivos de la Cuenca Alta del Río Santa Rosa, mediante la aplicación de la ecuación paramétrica propuesta por FAO/PNUMA/UNESCO (1980), que considera la intervención de factores ambientales en la degradación del suelo como los factores de agresividad climática, suelo, topográfica y uso del suelo.

6.1. Materiales y métodos

La secuencia de pasos para al análisis cartográfico del deterioro físico ambiental por erosión hídrica es:

1. Recopilación y evaluación de la información básica disponible: cartas topográficas, catastrales, geológicas, de suelos, datos climáticos y meteorológicos, fotografías aéreas e imágenes satelitarias, datos de campo sobre uso actual del suelo y datos socioeconómicos regionales.
2. Confección de una base de datos cuali-cuantitativos de campo identificando situaciones de erosión hídrica en la cuenca.
3. Diseño y ampliación de la base de datos anteriormente mencionada, a partir de la distribución geográfica - cartográfica, caracterizando cada situación problema y cada uno de los factores que intervienen en la ecuación.
4. Desarrollo de técnicas de digitalización de mapas primarios por medio del software ArcGis.
5. Determinación de cada factor que interviene en la ecuación a través de un mapa (imagen raster).
6. Procesamiento de la información cartográfica en el SIG y diseño del modelo cartográfico.
7. Obtención de la cartografía de degradación por erosión hídrica de la cuenca hidrográfica.

6.2. Descripción del trabajo y aplicación SIG

A partir de la aplicación de la ecuación paramétrica propuesta por FAO/PNUMA/UNESCO (1980), para estimar la erosión hídrica, que considera la intervención de factores ambientales en la degradación del suelo, mediante la siguiente expresión:

$$D=f(R, S, T, U)$$

Donde D = degradación del suelo; R = factor de agresividad climática; S = factor de suelo; T = factor topográfico; U = factor de uso del suelo

Según López (1995) la resolución de esta ecuación, da una indicación numérica de la velocidad de degradación. Los valores de los factores R, S, T y U están en razón inversa al grado de resistencia con respecto a la degradación de modo que, mientras mayor sea el factor numérico asignado, mayor será la degradación resultante.

6.3. Erosión hídrica potencial y actual

6.3.1. Riesgo de erosión hídrica. El riesgo de erosión o erosión potencial, se obtiene empleando la expresión:

$$Ep = R \times Ctex \times Ctax \times Cpend$$

Donde, Ep, riesgo de erosión en ton/ha/año; R, índice de erosividad de la lluvia; Ctex, coeficiente por textura del suelo; Ctax, coeficiente por clasificación taxonómica del suelo; Cpend, coeficiente de pendiente del suelo.

El mapa de erosión potencial (Ep) se obtiene a través de la multiplicación de de los mapas en la calculadora de mapas (Raster Calculator) de ArcGis Spatial Analyst. Los mapas multiplicados son:

- Índice de erosividad de la lluvia (R), es calculado a partir de la ecuación modificada del índice de Fournier (Hadley, Lal, Onstand et al, 1985).
- Coeficiente de pendiente del suelo (Cpend), es calculado a partir del MDT.
- Coeficiente por clasificación taxonómica (Ctax)
- Coeficiente por textura del suelo (Ctex)

Los coeficientes Ctex y Ctax fueron calculados a partir de la información levantada por PRONAREG (1989) y la preparada por Vera (1996) para CODELORO.

La erosión potencial en la cuenca va desde 2,529 a 333,514 tn/ha/año.

A partir del mapa de erosión potencial se realiza la clasificación y delimitación de área según la escala de fragilidad de de erosión potencial que se presenta en la leyenda de la Figura 11.

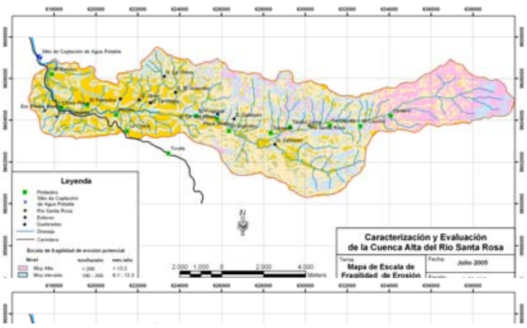

Figura 11. Mapa de escala de fragilidad de erosión potencial de la cuenca

6.3.2. Erosión actual. La erosión actual se obtiene, utilizando la expresión:

$$Ea=Ep \times Cuso$$

Donde, Ea = erosión actual en ton/ha/año; Cuso = coeficiente de uso del suelo

El coeficiente Cuso fue calculado a partir de la información levantada por PRONAREG (1989) y la preparada por Vera para CODELORO, además de la fotointerpretación de fotografías aéreas de diferentes años.

La pérdida de suelo bajo diferentes escenarios, se presenta en la Tabla 4.

La pérdida de suelo anual bajo diferentes escenarios en la Cuenca Alta del Río Santa Rosa va desde 0,078 mm. hasta 1,15 mm. con cobertura de bosque y pasto; en el caso de no existir cobertura vegetal el rango va desde 5,9 mm. hasta 9,8 mm.

Tabla 4. Pérdida del suelo de la cuenca bajo diferentes escenarios

Escenarios		Pérdida de suelo anual	
		tn/ha	**mm.**
Sin cobertura vegetal (Erosión potencial)	Max	117,787	9,8
	Med	86,155	7,2
	Min	70,755	5,9
Cobertura entre 80-100% de bosque y pasto (Erosión actual)	Max	1,559	0,130
	Med	1,140	0,095
	Min	0,937	0,078
Cobertura entre 40-60% de bosque y pasto (Erosión actual)	Max	13,8	1,15
	Med	10,10	0,84
	Min	8,29	0,69

6.4. Sedimentos

Según OEA la fuente principal de producción de sedimentos, es la misma cuenca, debido a la erosión hídrica.

Los registros de la estación hidrométrica Santa Rosa en El Vado durante el período de 1979 a 1993, presentan que la cantidad de sólidos en suspensión en la cuenca van desde 0,22 a 1,96 toneladas por día para caudales aforados entre 0,139 a 1,206 m^3/s, aunque los muestreos realizados se han registrado para períodos de menor escorrentía en la cuenca.

Los sedimentos en suspensión calculados a partir de la estación son de 4,8 $tn/km^2/año$ = 0.048 tn/ha/año.

6.5. Resultados

Si se compara entre el valor de sedimentos en suspensión de 4,8 $tn/km^2/año$ = 0.048 tn/ha/año calculado a partir de la estación linnimétrica Santa Rosa en El Vado, con los valores medios estimados de pérdida de suelo de la cuenca bajo diferentes escenarios que son de 1,140 tn/ha/año y 10,10 tn/ha/año, se debe considerar que la curva de gasto sólido obtenida es para rangos de caudales bajos, obtenidos en época de menor escorrentía, ya que de los 5 registros encontrados para la estación linnimétrica Santa Rosa en El Vado durante el período 1979 a 1993, 3 registros se realizaron durante los meses de octubre y noviembre, cuando los caudales son bajos, otro registro es en mayo a la salida de la estación lluviosa y el último en marzo durante la época húmeda donde se generan elevadas escorrentías. En conclusión los valores de caudal aforado corresponden a la época seca.

7. Conclusiones

- Los SIG representan una de las principales herramientas de análisis de sistemas hidrográficos, pues consiste un ambiente de almacenamiento, tratamiento y manipulación de datos, aplicación de modelos y procesamiento de series temporales, donde es posible visualizar escenarios pasados, actuales y simular escenarios futuros.
- La caracterización y evaluación de cuencas hidrográficas a partir de los SIG permite la gestión integral de la información de una cuenca y la posibilidad de incorporar nuevos procedimientos diseñados a la medida de las necesidades de los usuarios, tal como herramientas de análisis espacial como la Teledetección y Geoestadística, que permiten resultados más ajustados a la realidad que los obtenidos por procedimientos clásicos.
- De acuerdo a las características naturales de la Cuenca Alta del Río Santa Rosa como: pendiente, drenaje superficial, el tipo de cobertura vegetal, los suelos arcillosos y el substrato de rocas metamórficas impermeables de la cuenca, el fenómeno erosivo no se da en niveles peligrosos en condiciones normales. Pero en cambio es necesario controlar la influencia humana a través de la actividad agrícola y minera en la zona, que podría incrementar la erosión.
- La cantidad de sedimentos en suspensión calculados a partir de la estación linnimétrica Santa Rosa en El Vado son de 0.048 tn/ha/año y los valores medios estimados de pérdida de suelo con la aplicación de los SIG bajo diferentes escenarios de cobertura vegetal son de 1,140 ton/ha/año y 10,10 tn/ha/año. Se debe considerar que la curva obtenida de gasto sólido de la estación linnimétrica Santa Rosa en El Vado es para rangos de caudales bajos,

obtenidos en época de menor escorrentía, ya que de los 5 registros encontrados para la estación linnimétrica, durante el período 1979 a 1993, 3 registros se realizaron durante los meses de octubre y noviembre, cuando los caudales son bajos, otro registro es en mayo a la salida de la estación lluviosa y el último en marzo durante la época húmeda donde se generan elevadas escurrimientos. En conclusión los valores de caudal aforado corresponden a la época seca.

- Finalmente, la obtención de parámetros básicos cómo longitud de cauces, pendientes máximas, etc.; y parámetros avanzados como la erosión potencial y actual de una cuenca hidrográfica, constituyen siempre un aporte de considerable valor para el desarrollo de una región.

8. Recomendaciones

- Mejorar e incrementar la red de estaciones meteorológicas, de tal manera que se puedan almacenar todos los datos automáticamente y evitar que estos se pierdan o no sean registrados.
- Fomentar la investigación conjunta entre instituciones gubernamentales para optimizar y mejorar los potenciales datos a ser recopilados.
- Realizar un mapeo general de las principales cuencas hidrográficas del país cada cierto tiempo, a partir de imágenes satelitales, con el objetivo de mejorar los coeficientes de uso de suelo, clasificación taxonómica, erosividad y pendiente del suelo; que intervienen en el cálculo de la erosión hídrica.
- Los bajos caudales en estiaje constituyen una pauta para la programación en serie en el río Santa Rosa de almacenamiento superficial (represas de baja a media magnitud), con el fin de asegurar el abastecimiento hídrico al área de influencia inmediata.

9. Bibliografía

- ACOSTA J, CLIRSEN, "Erosión de suelos: causas, efectos, impactos y propuestas de solución. estudio de caso, paisaje antropizado del cantón Píllaro", Ecuador, 2004
- AGUIRRE M., TORRES H., RUIZ R., "Manual de procedimientos para la delimitación y codificación de cuencas hidrográficas del Perú", INRENA-IRH-DIRHI-SIG, 2003.
- BONINI J. y GUZMAN E., "Estimación de Caudales y Sedimentos en la Cuenca Hidrográfica del Río Chaguana, empleando el Modelo Matemático AVSWAT", 2003
- CHAVARRI E., "Curso de Hidrología Aplicada", Departamento de Recurso de Agua y Tierra, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú, 2004
- CHOW, V, T, "Hidrología aplicada", Edición Mc Grill Hill, 2000
- CLIRSEN. Mapa geomorfológico y riesgos de erosión. Memoria técnica. Quito, Ecuador, 1989.
- ESRI, Environmental Systems Research Institute. "Manuales de usuario de ArcGis Software y de las extensiones Spatial Analyst, 3D Analyst, Geostatistical Analyst, ArcHydro". Redlands, California. USA, 2004.
- GASPARI F., RICKFELDER R., HAURI B., "Análisis cartográfico del deterioro físico ambiental por erosión hídrica", Primer Congreso de la Ciencia Cartográfica y VII Semana Nacional de Cartografía. Buenos Aires, Argentina, 2003.
- GALLEGO F., COBO M., NAVARRETE L., VALDERRAMA Z, JIMENEZ R., "Determinación de riesgos de erosión en la Comarca Olivarera de "Sierra Mágina" (Jaén) mediante técnicas SIG y teledetección", XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander, España, 2002.
- FAO. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Pub. FAO y PNUMA. Roma, 1980.
- FUENTES, PACHECO. "Muestreo, análisis y descripción de perfiles de suelos en la Cuenca del Río Santa Rosa", Santa Rosa, Ecuador, 1998.
- INEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. "Uso del suelo por muestreo de parcelas". Quito, Ecuador, 1990.
- INAMHI, Anuarios hidrológicos, meteorológicos
- INEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. "III Censo Nacional Agropecuario", Quito, Ecuador, 2000.
- Investigaciones del Departamento de Ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 2005
- LOPEZ F., La Gestión Integral de las Cuencas Hidrográficas, documento de trabajo. Quito, 1999
- PRONAREG. Mapa morfopedológico, hoja Arenillas. Quito, Ecuador, 1985.
- PRONAREG. Mapa de aptitudes agrícolas, hoja Arenillas. Quito, Ecuador, 1985.
- PONS B. R. ""Descripción y cuantificación de procesos de regresión, degradación, desertización y desertificación". España.

- Red Iberoamericana de Recursos Hídricos(HIDRORED)
- Report GIS Based Spatial Modeling and Analyses of Urban Stormwater Size and Stormwater Management Practice (SMP) Feasibility in the Lower Buffalo River Watershed, 2003
- TARBOTON D, "Terrain Analysis Using Digital Elevation Models in Hydrology", Civil and Environmental Engineering, Utah Water Research Laboratory, Utah State University, 2004
- VERA V. "Manejo ambiental de la cuenca del río Arenillas". CODELORO. Machala, Ecuador, 1996.
- VIEIRA J, "El Sistema de Informaciones Geográficas (SIG) en los contextos de planificación del medio físico y de las cuencas hidrográficas", II Curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental. Brasil, 2003
- VIVAS J., "Análisis del Modelaje Hidráulico del Sistema Hídrico del Río Chaguana, mediante el uso del Modelo Hec-Ras", 2004