

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Posgrados

**Modelo de Amenaza por Inundación en el manejo de Microcuencas de
Drenajes a escala 1:25.000
Caso para el sector de Monte Sinaí-Ecuador**

Andrea Valeria Hermenejildo De La A

**Richard Resl Ph. D.(c)
Director de Trabajo de Titulación**

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito
para la obtención del título de Magister en Sistemas de Información Geográfica

Quito, diciembre 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE POSGRADOS

HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Modelo de Amenaza por Inundación en el manejo de Microcuencas de
Drenajes a escala 1:25.000**

Caso para el sector de Monte Sinaí-Ecuador

Andrea Valeria Hermenejildo De La A

Firmas

Richard Resl, Ph.D.(c)

Director del Trabajo de Titulación

Laure Collet, MSc.

Miembro del comité de tesis

Richard Resl, Ph.D.(c)

Director del Programa de Maestría en
Sistemas de Información Geográfica

Stella de la Torre, Ph.D.

Decano del Colegio de Ciencias Biológicas y
Ambientales

Hugo Burgos, Ph.D.

Decano del Colegio de Posgrados

Quito, diciembre 2015

© Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombre: Andrea Valeria Hermenejildo De La A

Código de estudiante: 00107003

C. I.: 0924927189

Lugar, Fecha Quito, diciembre 2015

DEDICATORIA

A mis padres y hermanas que siempre me han apoyado en todos los momentos tanto en vida personal como profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los profesionales que han colaborados con sus conocimientos y ayuda en este trabajo y a la Universidad San Francisco de Quito.

RESUMEN

Las intensas precipitaciones en época de invierno generan inundaciones por desbordamientos de afluentes en zonas de anegación en las áreas urbanas y rurales que no cuentan con la debida planificación de ordenamiento territorial. Esto afecta a un cierto porcentaje de la población generalmente de la clase media a baja. Al conocer las condiciones climáticas y variables naturales como la geología, geomorfología e hidrología de un área permite generar un modelo de amenaza a través de softwares especializados como ArcView 3.2 que contiene el módulo SINMAP y ArcGis 10.1 que se utilizó en la investigación presentada aquí, generando mapas de delimitación de zonas seguras y estables. El objetivo principal es dar conocer a la población las zonas propensas a inundaciones y a movimientos de tierra en el sector de Monte Sinaí de la ciudad de Guayaquil (Ecuador). El presente trabajo de investigación se desarrolló en el sector de Monte Sinaí sobre la subcuenca Hidrográfica Río Los Achiotos en la cual se caracterizó la morfometría utilizando software ArcGis 10.1 y, complementando con información de geología, geomorfología, y geomecánica, se obtuvo modelos de saturación y de estabilidad del sector.

Otro de los propósitos de este estudio fue de utilizar los estudios hidrológicos y geodinámicas como herramientas matemáticas a través de sistemas de información geográfica, para la caracterización de las Cuencas Hidrográficas generando modelamientos matemáticos de sistemas fluviales para obtener el direccionamiento de los drenajes, escorrentías, evitando fenómenos naturales tales como inundaciones, remoción de masa y fenómenos antrópicos.

La caracterización de la Cuenca de Río Los Achiotos permitió identificar una cuenca con alto potencial erosivo. A través de modelos de saturación y flujos de acumulación se identificaron zonas de inundación por anegación, utilizando parámetros geomecánicos y geotécnicos de la litología del sector de Monte Sinaí. Las zonas de mayor peligrosidad se ubicaron en las riberas de los afluentes de Río Los Achiotos y en las zonas que no poseen coberturas vegetales que se encuentran las zonas de terrazas medianas a altas.

Esta metodología puede ser empleada para la generación de mapas de riesgos y vulnerabilidad. Con los resultados obtenidos en los modelos de saturación, flujos de acumulación y de estabilidad se pueden identificar puntos críticos o zonas críticas, que servirán para la ubicación de infraestructura tales como puentes, o escuelas. Estos podrán servir como albergues y proyectos para el desarrollo del sector Monte Sinaí y a su vez evitar el conflicto de uso de tierras y agua, y así poder brindarles a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADS) herramientas para su planificación territorial.

ABSTRACT

Intense precipitations in winter generates floods by overflowing of tributaries in areas of flooding of urban and rural areas, which don't have the proper planning of land use. This affects to a certain percentage of the population generally from the lower to middle class. Knowing climatic conditions and natural variables as the geology, geomorphology and hydrology allow to create a threat model with specialized software like ArcView 3.2 which contains SINMAP extension and ArcGis 10.1, used in this research, generating maps which delimitate safe and stable zones. The main target is to inform the population about areas inclined to floods and ground movements in the sector of Monte Sinai of the city of Guayaquil (Ecuador). The present research work was developed in the sector of Monte Sinai on the subbasin of river The Achiotes in which its morphology was characterized using ArcGis 10.1 and complementing with information of geology, geomorphology, and geomechanic the models of saturation and of stability of the sector were obtained.

Another purpose of this study was to use hydrological and geodynamic studies as mathematical tools through geographic information systems, for the characterization of river basins generating mathematical modeling of river systems for addressing drains directions, runoffs, avoiding natural phenomena such as floods, removing mass and anthropic phenomena.

The characterization of The Achiotes river basin allowed identifying basin with high erosive potential. Through models of saturation and accumulation flows areas of inundation by waterlogging were identified, using geomechanical and geotechnical parameters of the lithology of the sector of Mount Sinai. Most dangerous areas were localized in river banks of The Achiotes river tributaries and in areas with no vegetative cover located in medium to high terraces.

This methodology can be used for the generation of risk and vulnerability maps. With the obtained results in saturation models, flows accumulation and ground stability critical points or areas can be identify, which will be used for the location of infrastructure such as bridges or schools. These may serve as hostels and projects for the development of the sector Mount Sinai and at the same time avoiding conflict of land and water use, and so to provide tools for the decentralized autonomous governments (GADS) for territorial planning.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	6
ABSTRACT	7
1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	13
1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Objetivo General.....	16
1.2.1 Objetivos Específicos.....	16
1.3 Pregunta de Investigación	16
1.4 Hipótesis.....	17
1.5 Justificación.....	17
1.6 Alcance.....	18
2 MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Definición de la cuenca y de los Términos Hidrográficos	20
2.1.1 Cuenca Hidrográfica.	20
2.1.2 Caracterización Morfológica de la Cuenca Hidrográfica.	26
2.2 Sistemas de información geográfica (SIG) y su aplicación en la caracterización de las cuencas hidrográficas.....	32
2.2.1 Modelo Digital de Elevación.....	33
2.2.2 Índice de Estabilidad - Sinmap.....	35
2.2.3 Talud Infinito.....	36
2.2.4 Factor de Seguridad (FS).	38
2.3 Riesgos Naturales	39
2.3.1 Factores de riesgo.	39
2.4 Modelo Hidrológico simple.....	40
2.4.1 Saturación de suelos.....	42
2.5 Marco Metodológico.....	43
3 METODOLOGÍA	51
3.1 Zona de Estudio.....	51
3.1.1 Ubicación Geográfica.	51
3.1.2 Geología.	53
3.1.3 Suelos.....	55
3.1.4 Geomorfología.....	56
3.1.5 Geodinámica.....	57
3.1.6 Clima.....	58
3.2 Pasos de metodología para generación de los modelos de saturación e inestabilidad.....	59

3.2.1	Fuentes de datos.....	59
3.2.2	Generación del Modelo Digital de Elevación.	60
3.3	Morfología de la Cuenca Hidrográfica	60
3.3.1	Perímetro de la Cuenca (P):	60
3.3.2	Área de Drenaje (A):.....	60
3.3.3	Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad.	61
3.3.4	Amplitud del relieve.	61
3.3.5	La curva hipsométrica.....	61
3.3.6	Altura mediana (hmed).	62
3.4	Generación de modelos con herramientas Hydrology.....	62
3.5	Generación de modelo de redes Hidrográficas.....	69
3.5.1	Ley de Bifurcación (Ley de Horton).....	70
3.5.2	Relación de Longitud (RL).	71
3.5.3	Densidad de Red de Drenaje.	71
3.6	Generación de Modelos de Saturación y flujos de acumulación a través de la SINMAP (Stability Index Map).....	72
3.7	Modelamiento con SINMAP (Stability Índice Mapping).....	74
4	RESULTADOS.....	80
4.1	Generación del Modelo Digital de Elevación	80
4.2	Morfología de la Cuenca Hidrográfica	81
4.2.1	Perímetro de la Cuenca (P):	81
4.2.2	Área de Drenaje (A):.....	81
4.2.3	Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad.	81
4.2.4	Amplitud del relieve.	81
4.2.5	La curva hipsométrica.....	81
4.2.6	Ley de Bifurcación (Ley de Horton).....	83
4.2.7	Relación de Longitud (RL).	84
4.2.8	Densidad de Red de Drenaje.	84
4.3	Generación de modelos con herramientas Hydrology.....	85
4.4	Acumulación de Flujos, Saturación e Índice de Estabilidad.....	90
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	94
6	CONCLUSIONES	97
7	RECOMENDACIONES	99
8	BIBLIOGRAFÍA	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de las cuencas de acuerdo a la superficie. (Campos, 1998).....	23
Tabla 2: Índice de Gravelius para la evolución de la forma. (ORTIZ, 2004)	28
Tabla 3: Definición de la clasificación de estabilidad en SINMAP. (SINMAP User Manual)....	36
Tabla 4: Coordenadas del sector de ubicación.....	51
Tabla 5 Coordenadas del sector de ubicación.....	57
Tabla 6 Factores y criterios en la generación de deslizamientos.....	76
Tabla 7 Índice de Saturación SINMAP.....	78
Tabla 8 Índice de Estabilidad SINMAP	79
Tabla 9: Parámetros para la caracterización morfométrica de la microcuenca.....	82
Tabla 10: Jerarquización de la Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotes. (Ley de Horton). ..	83
Tabla 11: Relación de bifurcación de la Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotes. (Ley de Horton).	84
Tabla 12: Relación de longitud de cauces de la Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotes. (Ley de Horton).	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diversos sistemas de ordenar sistemas fluviales como se aplica a un río esquemático. A. Sistema de Horton (1954) que prolonga hasta la cabecera el afluente más largo de cada orden. B. Sistema de Strahler (1957). C. Sistema de Strahler aplicado al río Logone de Muordo.....	21
<i>Figura 2</i> Componentes de una cuenca hidrográficas. El Sistema Complejo de la Cuenca Hidrográfica 2011 por Wilealdo García Charria.....	25
Figura3: Modelo de Talud Infinito con esquema de niveles freáticos.....	38
Figura4: Modelo Hidrológico Simple.....	41
Figura5: Modelo Hidrológico tomado de Dietrich & Mongotmery (1998).....	42
Figura6: Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado. Fredlund, D.G, 2000.....	43
Figura7: Metodología para obtención de Mapas de amenazas por inundación SGR 2010....	44
Figura8: Modelo de Saturación en función de la litología y morfología del sector. SGR 2010.....	46
Figura9: Modelo de flujos de acumulación en función de la litología y morfología del sector. SGR 2010.....	46
Figura10: Mapa de Índice de Saturación y zonas en alto riesgo a deslizamientos. Acaro,2010.....	47
Figura11 Esquema de mapas de zonificación de riesgos. Abril ,2010.....	49
Figura12: Ubicación de la zona de estudio. Sector Monte Sinaí..	52
Figura13: Representación estratigráfica y geomorfológica de la secuencia de depositación de los sedimentos d la Formación Cayo en el sector de Monte Sinaí.....	53
Figura14: Factores Geológicos que condicionan la superficie de falla probable.....	55
Figura 15 Zonas Climáticas de acuerdo al Atlas Geográfico de la República del Ecuador. Fuente: Ecuador Referencias Básicas para la Gestión de Riesgos (2013-2014).....	58
Figura16: Determinación de afluentes a través de la curva hipsométrica..Fuente: aguaysig.....	62
Figura17: Modelo para delimitación de Cuencas Hidrográficas.....	64
Figura18: Herramienta de ArcToolbox que contiene a Hidrology. Fuente: ArcGIS.....	65
Figura19: Método de derivación de dirección de flujo a partir de un DEM (Jenson&Domingue, 1988).....	66
Figura20: Método de derivación de acumulación de flujo a partir de un DEM (Jenson&Domingue, 1988).....	67
Figura21: Método de clasificación de arroyos Strahler.....	70
Figura22: Proceso de TPI en la microcuenca de Río Los Achiotos.....	73
<i>Figura 23</i> Cálculo de Índice de Estabilidad e Índice de Saturación en SINMAP.....	77
Figura24: Tabla de parámetros geo mecánicos de geomateriales, para el sector de estudio.....	77
Figura25: Mapa de Red de Triangulación Irregular resultante del sector Monte Sinaí, Ecuador.....	80
Figura26: Curva Hipsométrica de la microcuenca Río Los Achiotos.....	83
Figura27: Mapa de Modelo Digital de Elevación del sector Monte Sinaí, Ecuador.....	85
Figura28: Mapa de Modelo de Dirección de flujos del sector Monte Sinaí, Ecuador..	86
Figura29: Mapa de Modelo de Acumulación de flujos del sector Monte Sinaí, Ecuador.....	87
Figura30: Mapa de Jerarquización de Río Los Achiotos, del sector Monte Sinaí, Ecuador...	88
Figura31: Mapa de Microcuencas de Río Los Achiotos, del sector Monte Sinaí, Ecuador....	89

Figura32: Simbología de modelo de acumulación de flujos generado en SINMAP	90
Figura33: Mapa de zonas de acumulación de flujos de la Microcuenca Hidrográfica del Río Los Achiotos.	91
Figura34: Mapa de zonas de Saturación de flujos de la Micro Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotos.	92
Figura35: Mapa de zonas de Índice de estabilidad de la Micro Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotos.	93

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes

El estudio de la CAF “Las Lecciones de El Niño 97-98 – Ecuador” menciona que entre 1997 y 1998 se presentó el fenómeno meteorológico Fenómeno del Niño, que dejó devastado la gran mayoría de los sectores rurales del cantón Guayaquil (Ecuador), dejando sin servicios básicos e infraestructuras a numerosas familias de clase social media-baja, generando daños de un valor de dos mil ochocientos millones de dólares que equivale al 15% del Producto Interno Bruto (PIB) en el año 1997.

Las intensas precipitaciones originaron escorrentías superficiales y filtraciones de agua en suelos sin vegetación ocasionando inundaciones en zonas anegadas y movimientos de tierras en zonas con pendientes mayores al 30%.

La planificación inadecuada de ubicación de viviendas, el aumento de invasiones (viviendas construidas en terrenos sin debido permiso municipal) y la escasez de infraestructuras tales como puentes, vías, etc. en estas zonas originan que muchas familias se vean afectadas por estos eventos naturales. Para esto se han implementado numerosas estrategias para la gestión de riesgos en la ocurrencia de estos eventos naturales, con la ayuda de tecnologías y equipos electrónicos, que monitorean y ayudan a la creación de metodologías que permiten zonificar áreas de riesgos.

Las entidades públicas tales como la SGR (Secretaría de Gestión de Riesgos), SENAGUA (Secretaría del Agua), así como también entidades privadas y consultoras han realizado informes técnicos y estudios puntuales de sectores para construcción de infraestructura

tales como hospitales, vías, canales de drenajes, pero no un estudio general del sector como proyecto de investigación. La Secretaría de gestión de Riesgos de Ecuador como ente regulador y control con respecto a la temática de Riesgos, ha realizado numerosas obras de infraestructura en Monte Sinaí, para esto ha contratado a empresas privadas para la realización del estudio de suelos y cuencas de drenajes, hidrogeología, geología, geomorfología, etc. Ya que en el Decreto Ejecutivo No. 486, art.18. Registro Oficial del Reglamento a la Ley de Seguridad Pública y del Estado, 30-sep.-2010 establece que el Estado ejerce la rectoría del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión de Riesgos a través de la Secretaría de gestión de Riesgos cuya unas de las competencias mencionadas en el presente trabajo son de dirigir, coordinar y regular el sistema Nacional Descentralizado de Gestión de Riesgos.

Debido al desconocimiento de la población sobre los planes y manuales de gestión de riesgos que sirven para la ubicación de las viviendas, infraestructura, servicios básicos en zonas seguras y estables a inundaciones y movimientos de tierra, ha incrementado el porcentaje de nivel de damnificados y casos vulnerables en épocas de intensas precipitaciones y fenómenos meteorológicos refiriéndose a Fenómeno de El Niño. También ha generado grandes pérdidas en proyectos de construcción refiriéndose a puentes, vías, urbanizaciones, etc.

Una de las problemáticas graves en las zonas urbanas de grandes ciudades es el manejo inadecuado de los sistemas hídricos, debido a la deficiencia de planificación adecuada de los drenajes fluviales y pluviales, los mismos que pueden ocasionar inundaciones, problemas y daños hidráulicos y sanitarios

Los proyectos de drenaje fluvial y pluvial deben ser considerados dentro de planificación integral, refiriéndose al plan de ordenamiento territorial, con obras de desalojo, de protección y prevención orientándose a la mitigación de impactos tanto locales como regionales.

Los estudios recopilados han sido trabajados en marco de proyectos puntuales previos a construcción de obra, el trabajo que se menciona va a ser realizado a una escala a detalle con información recopilada de institutos especializados en la rama de Hidrología.

1.2 Objetivo General

Obtener la zonificación de áreas de amenaza a inundaciones y movimientos en masa, a través de modelo digital del terreno del sector Monte Sinaí (Ecuador).

1.2.1 Objetivos Específicos.

- Resumir las características fisiográficas de las microcuencas delimitadas desde el punto de vista ambiental.
- Identificar las cuencas de drenaje que aportan con escurrimiento superficial hasta el sector de interés.
- Realizar una cartografía geomorfológica detallada de la cuenca hidrográfica del sector, reflejando la disposición espacial de los elementos.
- Identificar las zonas de amenazas por inundación y saturación de suelos en Monte Sinaí.
- Caracterizar la hidrología, los flujos de escorrentías para la generar un modelo de saturación y de índice de estabilidad para el sector de estudio.

1.3 Pregunta de Investigación

¿Cuáles son las zonas seguras a la amenaza de inundación en el sector de Monte Sinaí, para la construcción de obras de infraestructura y planificación de ordenamiento territorial?

1.4 Hipótesis

Es posible zonificar áreas propensas a inundaciones y a movimientos en masa a través de modelos de saturación e inestabilidad obtenidos de SINMAP (Stability Index Mapping) en el sector Monte Sinaí (Ecuador).

1.5 Justificación

Existe la preocupación del manejo inadecuado de las cuencas de drenajes presentes en la zona Oeste de la ciudad de Guayaquil, específicamente en el sector de Monte Sinaí, que han provocado inundaciones de zonas pobladas o daños a infraestructuras y servicios básicos. Se relacionan estos problemas a la falta de información a detalle para realizar estudios o investigación de manejo de agua, y sobre todo a que la información cartográfica o científica no esté disponible para los requerimientos de empresas que no poseen conocimientos básicos de gestión de riesgos.

Los desastres naturales son una de las temáticas más importantes para la realización de planes de contingencia, manuales de gestión de riesgos, planificación de ordenamiento territorial, es por esto que se requiere investigación de nuevas metodologías para la zonificación de amenazas naturales y delimitación de zonas seguras a inundaciones. Estas metodologías se complementan con modelos Hidrológicos que constituyen un instrumento dinámico de análisis y diagnóstico hidráulico, su uso es indispensable para el manejo de aguas lluvia en zonas urbanas con problemas de Inundación. Ante la presencia del Fenómeno de El Niño en los años 1997 – 1998, con intensas precipitaciones que provocaron inundaciones en el Ecuador y sectores de la Cuenca Baja del Río Guayas, específicamente en la zona de Llanura de inundación, dejó devastado al sector urbano

con daños a infraestructura tales como escuelas, centro de salud, escuelas, etc, que se encontraron en zonas de bajas pendientes inferiores al 10%.

Es por esto que el presente trabajo emplea nuevas herramientas a través de los Sistemas de Información Geográfica que permitirá la delimitación de las zonas propensas a inundación por anegación complementados con información geotécnica, hidrológica, geodinámica, y a su vez permitirá la identificación de zonas inestables o estables para la construcción de infraestructura y proyectos de Desarrollo urbano y rural. El escaso desarrollo de la Planificación Territorial a nivel País detona el crecimiento desordenado de las poblaciones urbanas y rurales, ubicando a los habitantes en zonas de llanuras de inundación y laderas afectadas por la deforestación y erosión hidráulica, estos modelos que se trabajaran en el presente trabajo ayudara a las Instituciones Gubernamentales, los Gobiernos Autónomos Descentralizados y Privadas para ubicar con más criterio científico, albergues y dotarlos de servicios básicos ante cualquier evento natural que se presente.

1.6 Alcance

El presente trabajo, utilizara los sistemas de información geográfica (SIG) como herramienta para la creación de modelos y mapas de zonificación de áreas de inundación y movimientos en masa, esto permitirá el estudio del direccionamiento y acumulación de flujos y drenajes, zonas de anegación y recarga de aguas lluvias.

Esto complementado con la delimitación de cuencas hidrográficas y análisis hidrológico, permitirá un mejor análisis de las características fisiográficas de la forma, relieve y red de drenaje, que es de gran importancia debido a que influyen en la respuesta hidrológica de

las cuencas, ayudando en los planes de desarrollo para la construcción eficaz de obras de infraestructuras en zonas urbanas y rurales.

Se espera con el presente trabajo generar un mapa o salida cartográfica de amenazas naturales, en la cual se mostrara una delimitación o zonificación de las áreas seguras y estables del sector Monte Sinaí de la ciudad de Guayaquil, así como también de las zonas inestables, producto del análisis que combina información geológica, litológica y geomecánica del material (roca).

La investigación que se desarrollara en el presente trabajo servirá como guía para capacitar a personal relacionado en la Gestión de Riesgos, en la parte de selección de metodologías en el estudio de mapeos de amenazas para inundaciones y movimientos en masa. Sin duda alguna que estas herramientas permiten crear una guía metodológica para realizar un estudio, que se complementa con otros esfuerzos que las instituciones están adelantando con miras a satisfacer la necesidad tanto de análisis cada vez más cuantitativos, como de mapas que permitan comparaciones con otros mapas de amenazas y riesgo, o el análisis de criterios de riesgo tolerable.

También es una herramienta para el desarrollo y creación del plan de ordenamiento territorial, que evitará el mal uso de suelo, erosión, sedimentación y contaminación de los suelos y para realización de proyectos futuros e implementación de obras hidráulicas para Estado, Municipio y empresas privadas.

2 MARCO TEÓRICO

Para la comprensión del presente trabajo, en este capítulo se mencionaran la información teórica de los temas a tratarse, que comprenden los temas de recursos hídricos, Cuencas Hidrográficas y riesgos naturales y en la parte técnica sobre el programa ArcGIS y el módulo de SINMAP en ArcView.

2.1 Definición de la cuenca y de los Términos Hidrográficos

2.1.1 Cuenca Hidrográfica.

Según Dourojeanni (1994) la cuenca hidrográfica sus recursos naturales y sus habitantes, poseen connotaciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que le confieren características peculiares. El territorio de la cuenca facilita la relación entre los habitantes asentados, aunque éstos se agrupen por razones político-administrativas, debido a su dependencia común a un sistema hídrico compartido, a los caminos y vías de acceso y al hecho de que deben enfrentar peligros comunes.

En términos simples, una cuenca hidrográfica es un área de subsidencia en un territorio donde desaguan los flujos de aguas producto de precipitaciones y riego, desembocando en ríos, quebradas que van directo al mar.

En la Figura 1 se muestra los diversos sistemas de órdenes de sistemas fluviales de un río esquemático. Refiriéndose a órdenes como la jerarquización de los tipos de ríos, los de primer orden son aquellas que no están ramificadas los afluentes; los de segundo orden se forman al unirse los de primer orden; los de tercer orden se forman al unirse los de segundo y así sucesivamente, se explicara detalladamente en el capítulo 2.1.2.7.

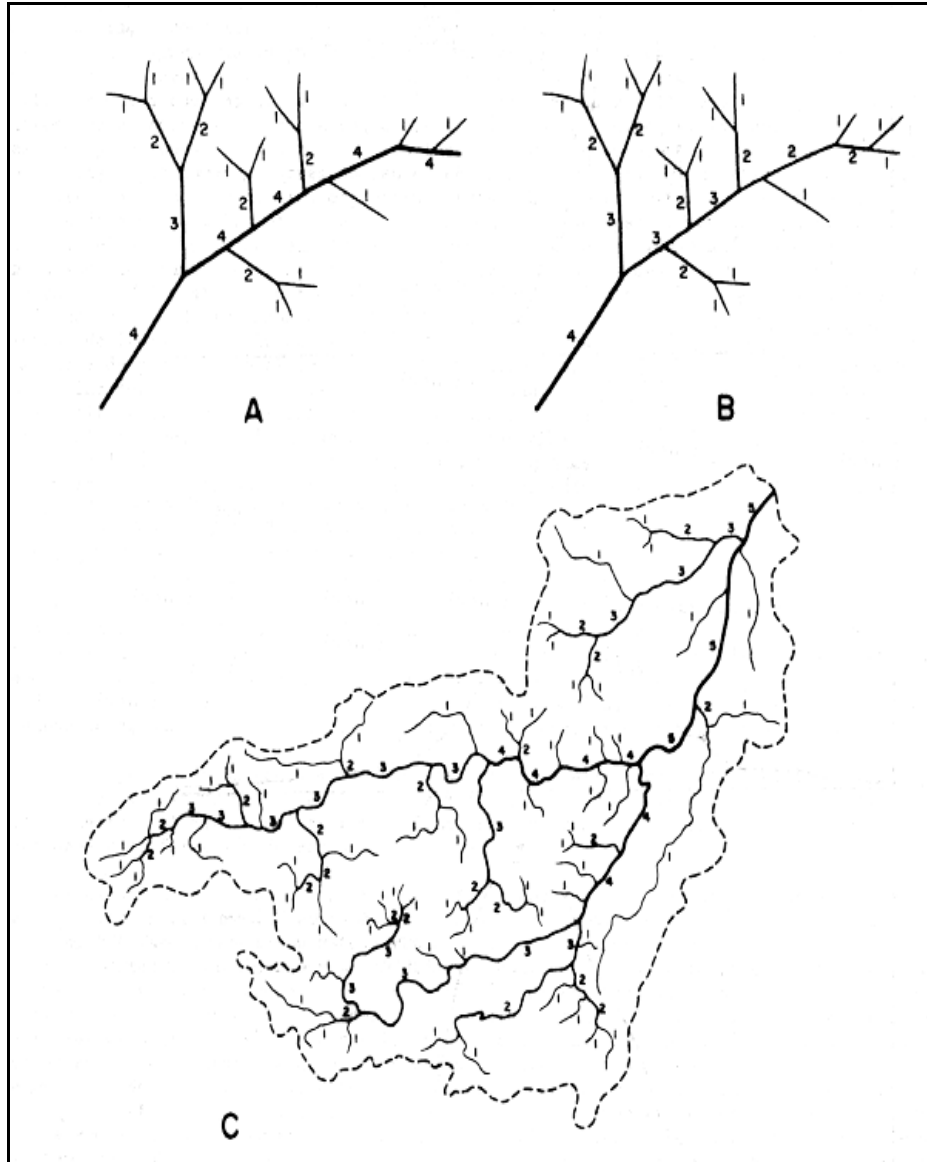


Figura 1: Diversos sistemas de ordenar sistemas fluviales como se aplica a un río esquemático. A. Sistema de Horton (1954) que prolonga hasta la cabecera el afluente más largo de cada orden. B. Sistema de Strahler (1957). C. Sistema de Strahler aplicado al río Logone de Muordo.

En general las cuencas hidrográficas son la principal fuente de recursos hidráulicos, que permite interactuar y establecer una relación entre el ser humano y recursos naturales, preservando el ecosistema.

Las cuencas hidrográficas son más que sólo áreas de desagüe alrededor de nuestras comunidades. Son necesarias para brindar un hábitat a plantas y animales, y proporcionan agua potable para la gente, sus cultivos, animales e industrias. También nos proporcionan la oportunidad para divertirnos y disfrutar de la naturaleza. La protección de los recursos naturales en nuestras cuencas es esencial para mantener la salud y el bienestar de todos los seres vivos, tanto en el presente como en el futuro (Villegas, 2004).

2.1.1.1 Clasificación General de Cuencas Hidrográficas.

Las cuencas hidrográficas pueden clasificarse, según (Gravelius, 1914), (Horton, 1945) y (Jardi, 1985) en tres grupos:

a) Cuenca Principal

El cuerpo principal de agua desemboca en el océano, los escurrimientos son drenados por la red de drenaje principal y suelen ser de orden mayor a 2.

b) Sub-Cuenca

A diferencia de la cuenca principal, el drenaje va directamente al río principal de la cuenca hidrográfica, se subdivide por lo que la cuenca principal pueden haber varias subcuencas.

Es aquella que tributa hacia otra cuenca. La de primer orden tributa hacia una cuenca principal, la de segundo hacia una sub-cuenca y así sucesivamente.

c) Microcuenca

Una microcuenca es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una sub cuenca; o sea que una sub cuenca está dividida en varias microcuencas. Las microcuencas son unidades pequeñas y a su vez son áreas donde se originan quebradas y riachuelos que drenan de las laderas y pendientes altas.

2.1.1.2 Clasificación de una Cuenca Hidrográfica de acuerdo a la Superficie.

Campos (1998) clasifica a las cuencas Hidrográficas según tabla 1:

Tabla 1: Clasificación de las cuencas de acuerdo a la superficie. (Campos, 1998).

Tamaño de la cuenca (Km²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – Pequeña
500 a 2500	Intermedia – Grande
2500 a 50000	Grande
> 50000	Muy grande

A la clasificación “muy pequeña” se la denomina “microcuencas”.

2.1.1.3 Componentes de una cuenca Hidrográfica.

Los componentes principales que determinan el funcionamiento de una cuenca son (García, 2011):

- Elementos Socioculturales: que corresponde las creencias, conocimientos, tecnologías, valores, etc.
- Elementos Biofísicos: corresponden al clima, suelo, hidrología, flora y fauna.
- Elementos Económicos: corresponden a los sistemas de producción, consumo, ingresos, créditos y uso de la tierra.
- Elementos Demográficos: corresponde a tamaño y distribución de la población, edad, sexo y economía activa.

Los elementos de generación antrópica, o generados por el hombre, pueden ser de carácter socioeconómico y jurídico.

La figura 2 muestra los diferentes componentes de una cuenca, divididos en elementos socioculturales, económicos, biofísicos, y demográficos.

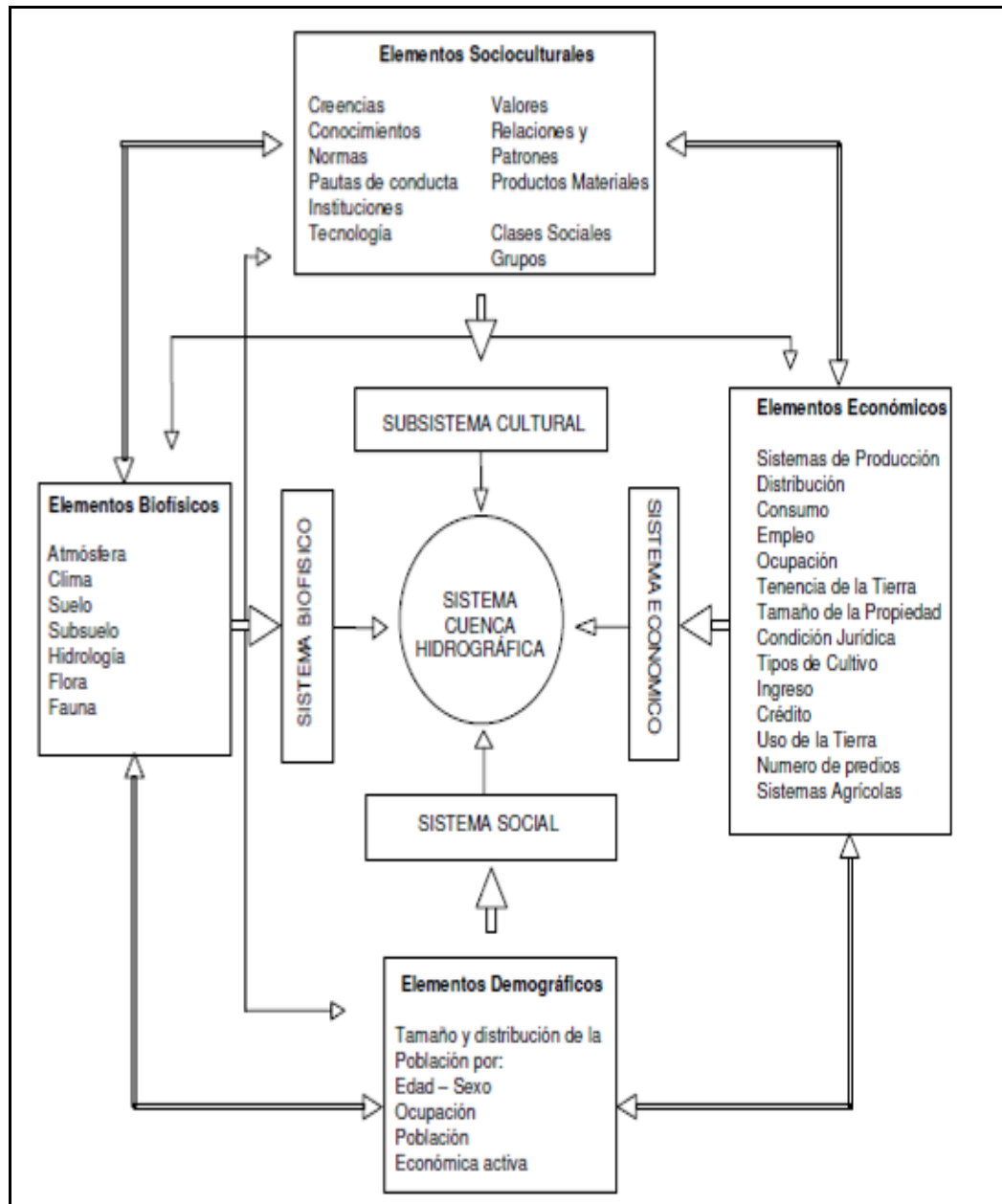


Figura 2 Componentes de una cuenca hidrográfica. El Sistema Complejo de la Cuenca Hidrográfica 2011 por Wilealdo García Charria

El sistema complejo de la Cuenca Hidrográfica que menciona (García, 2011), posee un enfoque que facilita el entendimiento de la estructura y funciones de los subsistemas y su relación entre ellas desde los diversos escenarios tales como el administrativo, económico, naturales, etc. Permitiendo interrelacionar los elementos de la cuenca hidrográfica dentro de fronteras establecidas y las relaciones con el medio ambiente. Por lo que los recursos son interdependientes considerándose como un solo conjunto.

2.1.1.4 Delimitación de la cuenca hidrográfica.

Para la delimitación de una cuenca hidrográfica se define la línea de curva cerrada que es la línea que inicia y finaliza en la parte de captación, la misma que intercepta perpendicularmente a las curvas de nivel (altitud). La longitud de esta línea es el perímetro de la cuenca hidrográfica y la superficie es el área proyectada sobre un plano horizontal. La exactitud de los datos morfométrico obtenidos depende de la escala de levantamiento del sector (Faustino, 2006).

2.1.2 Caracterización Morfológica de la Cuenca Hidrográfica.

Las características se clasifican en dos tipos, las que condicionan el volumen de escurrimiento que corresponde al área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta que corresponden al orden de corriente, pendientes de la cuenca y los cauces (Faustino, 2006).

2.1.2.1 Área de la cuenca (A).

Llamada magnitud de cuenca, es el área plana en proyección horizontal, incluida dentro del parteaguas o línea divisoria de la cuenca, (Campos, 1998). El área se expresa km² a

excepción de las cuencas pequeñas, las cuales se expresan ha. Se obtiene de la digitalización de las cuencas, dibujando un polígono en el SIG.

2.1.2.2 Perímetro de la cuenca (P).

El perímetro de la cuenca es la longitud el parteaguas en proyección horizontal, decir, el contorno de la superficie de la cuenca, se expresa en unidades métricas.

El parteaguas es la línea imaginaria que une los puntos de mayor altitud entre dos ríos, y que divide el flujo de las aguas en direcciones opuestas, hacia uno u otro lado (Campos, 1998).

2.1.2.3 Coeficiente de Compacidad o índice de Gravelius (kc).

Es el cociente entre el perímetro de la cuenca y la longitud de una circunferencia con una área igual a la de la cuenca y se representa mediante la siguiente formula. (Monsalve, 2000).

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{0.28P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

P: es el perímetro de la cuenca en (km)

A: es el área de la cuenca (Km²)

Existen tres categorías para la clasificación de este parámetro:

Tabla 2: Índice de Gravelius para la evolución de la forma. (ORTIZ, 2004)

Clase	Rango	Descripción
Kc1	1 a 1,25	Forma casi redonda a oval - redonda
Kc2	1,25 a 1,5	Forma oval - redonda a oval - alargada
Kc3	1,5 a 1,75	Forma oval – alargada a alargada

2.1.2.4 Longitud de la cuenca (L).

Llamada también longitud axial, la longitud de la cuenca se define como la distancia de una línea recta en proyección horizontal que va desde la salida de la cuenca hasta el partaguas en su punto más alejado que es paralela al cauce principal (Villón, 2002).

2.1.2.5 Longitud del cauce (Lc).

Es la longitud del cauce más largo dentro de la cuenca, se expresa en unidades métricas (Villón, 2002).

2.1.2.6 Factor de forma (Kf).

El factor de la forma tiene una relación con la respuesta hidrológica de la cuenca debido a la forma de la misma. Se define como la relación entre el ancho medio (B) y la longitud de cuenca (L). Se obtiene al dividir el área (Km²) por la longitud de cuenca (km) (Villón, 2002).

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

Donde:

L: es la longitud de la cuenca (km).

A: es el área de la cuenca (km²).

2.1.2.7 Orden de corriente de una Cuenca.

Es una clasificación que muestra el grado de ramificación o bifurcación de las corrientes dentro de una cuenca (Campos, 1998).

1er orden: son aquellas que no están ramificadas.

2do orden: solo tiene ramificaciones o corrientes tributarias de primer orden.

n orden: corriente con dos o más corrientes tributarias de n-1 orden o menores.

Mientras más alto sea el orden la corriente, drenará más eficientemente que una de orden menor (Dominguez, 2013)

2.1.2.8 Densidad de drenaje (Dd).

Es el resultado de dividir la sumatoria de las longitudes de las corrientes de la cuenca (Σl) entre el área (A) de la misma.

$$Dd = \frac{\Sigma l}{A}$$

Donde:

Σl : sumatoria de las longitudes de las corrientes de la cuenca (km)

A: es el área de la cuenca (Km²).

Los valores mayores corresponden a cuencas con rocas blandas de baja permeabilidad y con escasa cobertura vegetal y aumenta su valor cuando las corrientes tienen un alto grado de ramificación (Villón, 2002).

2.1.2.9 Densidad hidrográfica o de corriente (Dh).

Según Villón (2002) se refiere al número de corrientes por superficie de la cuenca, y se expresa en km² de la siguiente manera:

$$Dh = \frac{\sum Ni}{A}$$

Donde:

$\sum Ni$: es el número de corrientes de agua.

A: es el área de la cuenca (Km²).

Tanto la densidad de drenaje (Dd) como la densidad hidrográfica (Dh) se relacionan mediante la fórmula:

$$Dh = a \cdot Dd$$

Donde:

a: es un coeficiente de ajuste.

2.1.2.10 Ley de Bifurcación (Ley de Horton).

En relación al número de orden de los cauces, (Horton, 1945) encontró 3 leyes, llamada leyes de Horton: La ley de los números de cauces, la ley de las longitudes de los cauces y la ley de las áreas drenantes a los cauces. Estas principales leyes nos permiten establecer un determinado número de corrientes de un determinado orden siguiendo una relación geométrica inversa con dicho orden, caracterizando la relación de longitud promedios de las corrientes para obtener el área de drenajes promedios de dichas corrientes.

La ley de bifurcación se establece a partir de la relación existente entre el número de segmentos de un orden dado y los de orden inmediatamente superior.

$$Rb= Nu /Nu+1$$

La relación de bifurcación permite comprender algunas variaciones geoecológicas que se producen en el territorio de la cuenca, fundamentalmente cambios importantes en el sustrato rocoso y de los grupos de suelos dominantes.

La relación de bifurcación, también determina la mayor o menor rapidez de las ondas de crecida, lo que define de alguna forma el grado de peligrosidad de la cuenca (Sanchez, 1990). Los índices bajos suelen relacionarse con rede fuertemente ramificadas, lo que repercute directamente ante fuertes precipitaciones en ondas de crecidas rápidas.

Normalmente valores muy altos de Rb son esperados en regiones muy montañosas y rocosas o en cuencas alargadas en la dirección del río principal o de mayor orden. En cuencas donde se tiendan a producir valores altos de Rb se tiende a encontrar bajos caudales picos pero conformando una hidrógrafa extensa. Una cuenca redondeada y con Rb bajo tiende a producir hidrógrafas picudas.

2.2 Sistemas de información geográfica (SIG) y su aplicación en la caracterización de las cuencas hidrográficas

Los sistemas de Información son un conjunto de herramientas que permiten gestionar información como almacenar, recuperar, transformar y mostrar datos espaciales del mundo real con de tomar decisiones acerca de planeamientos en proyectos, sea estos económicos, ambientales, políticos, antrópicos, etc. (Burrough & McDonnell, 1988)

En resumen permiten saber los escenarios de la realidad geográfica de una manera más fácil, y entendible para fundamentar la toma de decisiones.

Estos sistemas de información tienen sus componentes, los mismos que permiten almacenar, analizar y desplegar la información geográfica, estos son:

- Herramientas para la entrada y manipulación de la información geográfica, refiriéndose a los softwares especializados.
- Base de datos para la realización de consultas, mediante tablas y tener toda la información recopilada ordenada y organizada, en vectores o raster, esta información que puede ser temática, imágenes satelitales, ortofotos, etc. Estos datos son los más importantes para la realización de trabajos en SIG.
- Personal que opera esta información, debe tener conocimiento de las mismas ya que debe desarrollar y administrar el sistema, y a su vez realizan metodologías para aplicarlo en el mundo real.
- Un SIG operará acorde con un plan bien diseñado y con unas reglas claras del negocio, que son los modelos y las prácticas operativas características de cada organización.

2.2.1 Modelo Digital de Elevación.

Un modelo digital de elevación es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno con respecto al nivel medio del mar, caracterizando las formas del relieve. Son estructuras numéricas de datos que representan la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994).

Existen dos cualidades importantes en estos raster que son la exactitud y resolución horizontal que varían dependiendo del método que se utilizan para generarlos tales como TIN y para tener un modelo de alta resolución y gran exactitud se emplea tecnología LIDAR (INEGI, s.f.).

La captura de la información hipsométrica es el primer paso para la generación de un modelo Digital de elevación, que incluye la transformación de la geografía real a una estructura de datos, los mismos que van a formar el MDE.

Los métodos para la generación de los Modelos Digitales de Elevación pueden dividirse en dos grupos:

- Métodos directos. A partir de mediciones y obtención de datos de altitudes en terreno real, por ejemplo levantamientos topográficos o GPS y tecnologías más precisas tales como RADAR o LIDAR.
- Métodos indirectos. A partir de utilización de documentos digitales elaborados previamente para generar un modelo digital de elevación, a través de la restitución utilizando imágenes satelitales e interferometría radar y la digitalización utilizando las curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía

topográfica generada por procesos como la restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital.

Para la generación del modelo digital de elevación, se necesita las curvas de nivel con sus respectivas datos de alturas expresados en metros, como primer paso que se explicara más detalladamente en el capítulo 3, se realiza la interpolación de los puntos que es un método determinista que pone la proximidad espacial de los puntos obtenidos de la muestra considerando las distancias entre dichos puntos, generando una superficie continua para un área específica (Koch & Cabrera, 2012). Se utilizara la herramienta Model Builder e Hydrology para la delimitación de las Cuencas Hidrográficas para esto se definirá dichas herramientas para comprensión:

- Model Builder

Es una herramienta de ArcGIS Desktop cuya función es realizar geoprocesamiento de procesos largos o repetitivos personalizados, con generación de SCRIPTS, a través de un diagrama de flujo.

- Hydrology

Es una herramienta de ArcGIS Desktop en ArcToolBox que su función es realizar la delimitación de cuencas Hidrográficas, la jerarquización de sus afluentes, caracterización de microcuencas, a partir de un Modelo Digital de elevación.

Otras de las herramientas principales a utilizarse en el presente trabajo es la extensión de SINMAP (Stability Index Mapping), que se definirá en el subcapítulo 2.2.2.

2.2.2 Índice de Estabilidad - Sinmap.

La metodología SINMAP (Índice de Estabilidad) se basa en un modelo infinito de estabilidad de ladera (e.g. Hammond et al., 1992; Montgomery y Dietrich, 1994) que equilibra los componentes desestabilizadoras de la gravedad, el ángulo de fricción de los materiales y cohesión, en un plano de falla paralela a la superficie del suelo.

SINMAP es un modelo de predicción de estabilidad que combina los mapas de susceptibilidad a deslizamientos, los modelos de estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite y los modelos hidrológicos para diferentes escenarios de lluvias (Lan, Zhou, Wang, Zhang, & Li, 2004).

Los parámetros tales como la presión de poro a la humedad del suelo, reducen la tensión del ángulo de fricción que está relacionado con la resistencia al corte. Esta presión es calculada en una estación hidrológica con cierta profundidad del suelo saturado, donde la descarga lateral es proporcional a la captación del punto en estudio. SINMAP deriva su estabilidad del terreno, clasifica las entradas de desnivel topográfico, área de captación específica, los parámetros de cuantificación de las propiedades del material y el clima (principalmente un parámetro de humedad hidrológico).

El resultado de esta herramienta permite clasificar o categorizar la estabilidad del terreno, esto se procesa a partir de un modelo digital de elevación.

El índice de estabilidad (SI) se define como la probabilidad de que un área sea estable asumiendo distribuciones uniformes de los parámetros sobre estos rangos de incertidumbre. Este valor oscila entre 0 (más inestables) y 1 (menos inestable). (Tabla 3)

Condition	Class	Predicted State	Parameter Range	Possible Influence of Factors Not Modeled
$SI > 1.5$	1	Stable slope zone	Range cannot model instability	Significant destabilizing factors are required for instability
$1.5 > SI > 1.25$	2	Moderately stable zone	Range cannot model instability	Moderate destabilizing factors are required for instability
$1.25 > SI > 1.0$	3	Quasi-stable slope zone	Range cannot model instability	Minor destabilizing factors could lead to instability
$1.0 > SI > 0.5$	4	Lower threshold slope zone	Pessimistic half of range required for instability	Destabilizing factors are not required for instability
$0.5 > SI > 0.0$	5	Upper threshold slope zone	Optimistic half of range required for stability	Stabilizing factors may be responsible for stability
$0.0 > SI$	6	Defended slope zone	Range cannot model stability	Stabilizing factors are required for stability

Tabla 3: Definición de la clasificación de estabilidad en SINMAP. (SINMAP User Manual)

Las estructuras de almacenamiento de datos disponibles para codificar digitalmente topografía comprenden: rejilla (1) Modelos de elevación digital (DEM); (2) redes irregulares triangulares y (3) estructuras de almacenamiento basado en contorno.

El procesamiento de red DEM utilizados se basan en métodos descritos por (Tarboton, 1998) y (Pack, 1999).

2.2.3 Talud Infinito.

Se define como talud infinito cuando el espesor del material inestable es menor con respecto a la altura del talud, la resistencia en la cabeza y pie del deslizamiento es menor en comparación a la resistencia del resto a la superficie de falla, la superficie es paralela a la del talud.

Se considera los esfuerzos en las tres caras del deslizamiento y que en las caras verticales los esfuerzos son iguales y se equilibran.

Cuando los geomateriales están a punto de fallar, las fuerzas que están en dirección del movimiento e inducen a que se muevan, llegan a ser iguales a la resistencia que tiene los

geomateriales a ser movidas. La naturaleza del movimiento de masa está controlada por geomateriales (roca y/o suelos pocos resistentes).

Con este método se determinara el factor de seguridad de un talud, en un talud de mayor altura con una capa de menor espesor de suelo. Las suposiciones de consideración son: suelos isotrópicos y homogéneos. Las fuerzas que actúan son colineales y la fuerza normal actúa en el centro del bloque. Es preciso para el análisis de los suelos estratificados, con falla paralela a la superficie del terreno (Suarez, 1998). La masa de gran magnitud deslizada se mueve en forma aproximadamente paralela a la superficie del terreno. Además es muy utilizado para la determinación de mapas de amenazas a los deslizamientos a través de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Este método de talud infinito usan ábacos que nos permite el cálculo de estabilidad de taludes de una forma simplificada, se analizan dos condiciones: taludes de material granular, donde el mecanismo de falla critico es deslizamiento superficial o rodadura y los taludes en suelo residual, donde la capa de suelo es delgada que yace sobre roca, aquí el mecanismo de falla critico hace el deslizamiento a lo largo de un plano paralelo al talud. Es importante saber la forma del afloramiento del agua freática.

En la Figura 3 se muestra el modelo de talud finito y el esquema de afloramientos de agua sobre la superficie del talud y el flujo de agua paralelo a la superficie del talud, buscando un método para modelar el talud desde el punto de vista del espesor del suelo residual apoyado sobre un suelo firme. Estos análisis funcionan tomando las condiciones más críticas para que falle el talud. En la Figura 3 se muestra dos casos de fallamiento del talud, para modelo de talud infinito en el caso a) el plano de falla es paralelo a la

orientación del talud, al igual que el nivel freático. En el caso b) el plano de falla es en dirección del nivel freático que es superficial y con ángulo de fricción muy pequeño.

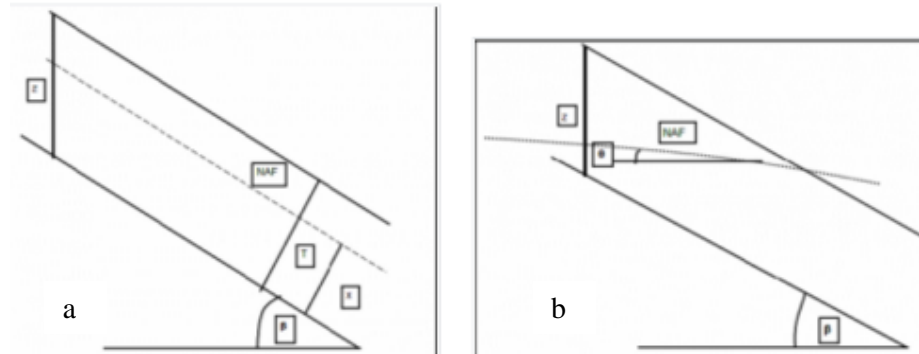


Figura3: Modelo de Talud Infinito con esquema de niveles freáticos.

2.2.4 Factor de Seguridad (FS).

Es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Es la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla (Fellenius, 1922)

$$FS = \text{Resistencia al corte} / \text{esfuerzo al cortante}$$

Se usa esta ecuación cuando los esfuerzos de corte críticos tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla. Y la siguiente ecuación se considera en superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes.

$$FS = \text{Momento resistente} / \text{Momento actuante}$$

Otro criterio es dividir las masas en bloques y considerar el equilibrio de cada bloque por separado, luego se analiza las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerza o de momentos (Suarez, 1998).

2.3 Riesgos Naturales

Se define como Riesgos Naturales, toda fuente de peligro que puede causar daños y la probabilidad de que dichos daños se produzcan. Resumiendo es una posibilidad de que exista pérdidas y daños producto de la interacción de la amenaza y vulnerabilidad.

Los riesgos pueden reunirse en dos grandes grupos: tecnológicos y naturales.

Los riesgos naturales se pueden definir como la posibilidad de que un territorio y la sociedad que lo habita pueda verse afectado por un fenómeno natural de rango extraordinario que suponga un peligro causante de daño, enfermedad, pérdida económica o daño ambiental. (ILEXAQUIFOLIUM s.f).

2.3.1 Factores de riesgo.

Factores de riesgo es todo aquello que condiciona o influye en la intensidad de los efectos, en el alcance del daño o en la ocurrencia del riesgo. Es fundamental para la predicción y prevención, depende de los siguientes factores:

Peligrosidad: Probabilidad de ocurrencia de un suceso que perjudique a una región en un tiempo determinado. La representación de los grados de peligrosidad de un suceso constituye un mapa de peligrosidad.

Para calcular hay que considerar varios factores:

Distribución del suceso: para esto se debe conocer las zonas que se vieron afectadas ante la ocurrencia del suceso o fenómeno.

Tiempo de retorno o intervalo de recurrencia: es la periodicidad o tiempo con que se repite el suceso.

Grado de peligrosidad: grado de la intensidad con que un fenómeno puede afectar a la zona considerada.

Exposición o valor: número total de personas o la cantidad total de bienes materiales que pueden verse afectados por un suceso.

Vulnerabilidad: proporción con relación al total expuesto, de víctimas humanas o de pérdidas económicas causadas por un suceso.

El riesgo (R) de un suceso se calcula multiplicando su peligrosidad (P) por la exposición (E) y por la vulnerabilidad (V) expresada en tanto por uno. (ILEXAQUIFOLIUM s.f.).

2.4 Modelo Hidrológico simple

Los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos grandes categorías: modelos físicos o materiales y modelos formales o matemáticos; estos últimos conciben el sistema por medio de un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objeto de simular la transformación de las entradas en salidas del sistema. (Ponce, 1994) distingue cuatro tipos de modelos:

1. Determinísticos: son formulados siguiendo las leyes de la física y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.

2. Probabilísticos: por el contrario, se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad.

Pueden ser de dos tipos: estadísticos o estocásticos.

3. Conceptuales: son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales.

4. Paramétricos: o también conocidos como empíricos o de caja negra. Son los más simples, consisten en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico.

En las Figuras 4 y 5 se detalla el modelo hidrológico que explica el aumento del nivel freático a través del flujo dinámico saturado paralelo a ladera y flujo transitorio vertical en suelos no saturados (Dietrich & Montgomery, 1998). Generando escorrentías superficiales y filtraciones de aguas por las intensas lluvias, se mencionara las definiciones de los modelos de escorrentías y saturación de suelos, que son las componentes resultantes del modulo de SINMAP que se trabajara en el presente estudio.

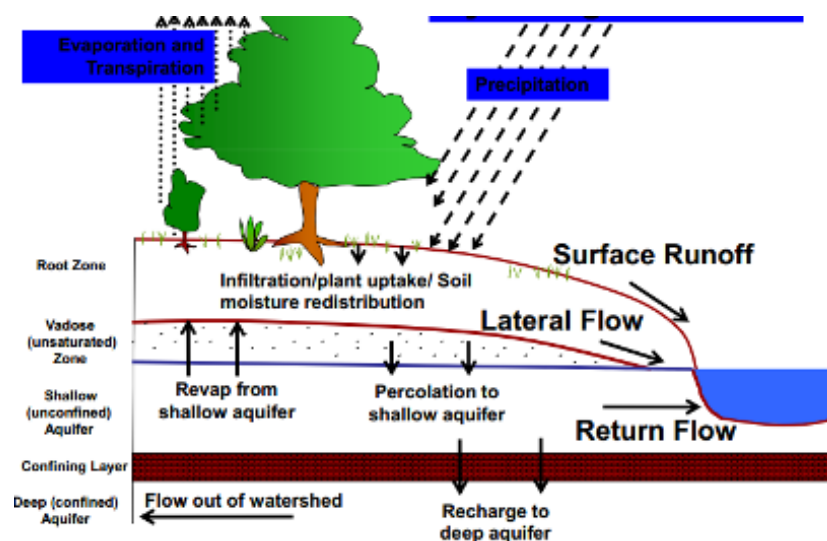
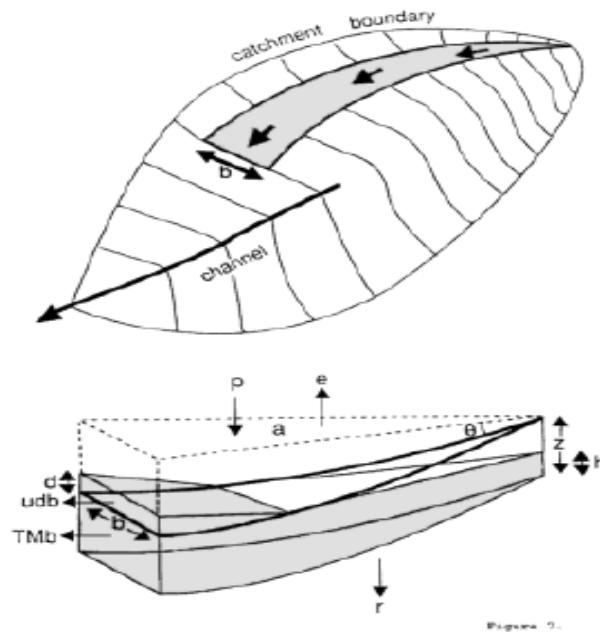


Figura4: Modelo Hidrológico Simple

(http://portal.chapingo.mx/irrigacion/planest/documentos/apuntes/hidrologia_sup/BALANCE.pdf)

Modelo hidrológico



$$Q_c = \frac{T \sin \theta}{(a/b)} \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right]$$

Figura 5: Modelo Hidrológico tomado de Dietrich & Montgomery (1998)

El modelo de escorrentía forma parte del ciclo hidrológico, depende de numerosos factores: precipitación, de la cantidad, intensidad y de la distribución en el tiempo con la que el agua fluye en superficie, de la humedad de suelo, del tipo de terreno, y la cobertura vegetal (Martinez de Azagra & Navarro, 1996). Se usa para la regularización del uso del agua o diseñar obras hidráulicas para el control de inundaciones, a través del proceso de escurrimiento de los drenajes naturales producto de las precipitaciones.

2.4.1 Saturación de suelos.

Los suelos saturados y los suelos no saturados, constituyen un sistema de 2 fases: partículas sólidas-agua y partículas sólidas-aire, respectivamente. Pero en el caso intermedio, cuando el suelo está parcialmente saturado, se involucran tres fases en el

suelo que interactúan entre sí, partículas sólidas, agua y aire y una cuarta fase: la interface aire-agua o membrana contráctil (Fredlund & Morgensten, 1977).

Los suelos saturados se encuentran por debajo del nivel freático, los espacios vacíos que se encuentra entre ellos, están completamente llenos de agua (Figura 6). Teniendo una presión positiva por lo tanto ejerce una fuerza positiva con igual magnitud y en todas las direcciones conocidas como presión de poros al agua.

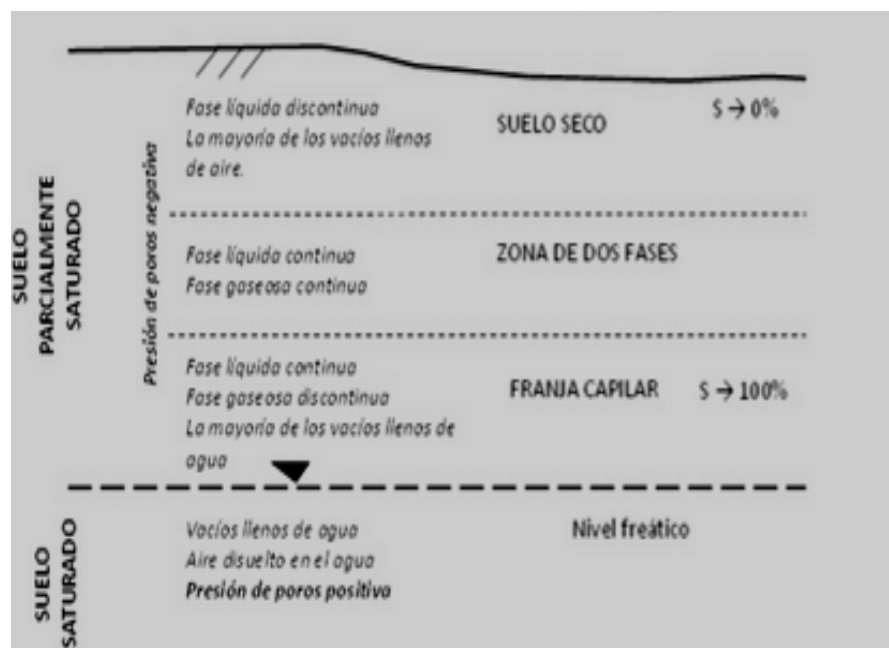


Figura 6: Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado. Fredlund, D.G, 2000

2.5 Marco Metodológico

Una vez dada las definiciones teóricas del presente estudio, se realizó un proceso de comprensión de las diferentes metodologías determinadas para el análisis de amenazas en sectores urbanos y rurales a nivel de Ecuador. Habiendo metodologías empíricas como las desarrolladas por (Acaro, 2010) y (Abril, 2011) y metodologías desarrolladas por entes rectores como la Secretaria de Gestión de Riesgos (S.G.R, 2010). Y también de la

caracterización de la morfometría de las cuencas Hidrográficas de (Lopez & Delgado, 2009), que complementara el entendimiento del comportamiento de los afluentes de las cuencas analizadas.

Refiriéndose a la metodología de la SGR (2010) para la generación de los mapas de amenazas por inundación y movimientos en masa, se utilizó el modelo de SINMAP, básicamente el modelo de saturación, como una componente dentro del diagrama de flujo (Figura 7) que se suma las componentes de geología, uso de suelos, estructural.

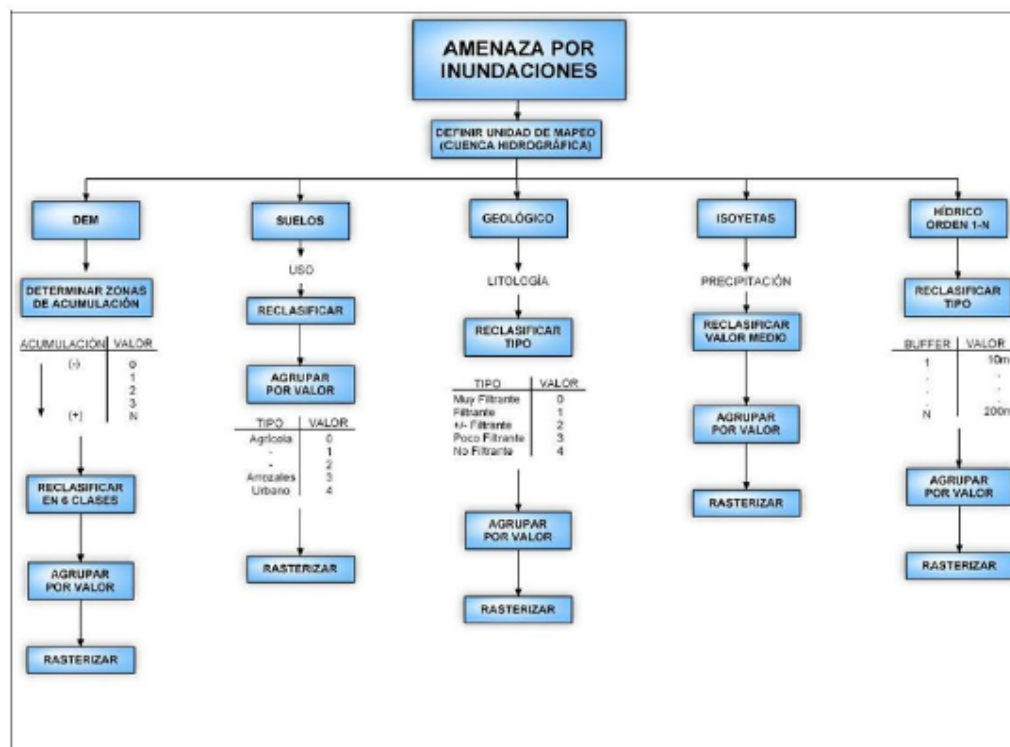


Figura7: Metodología para obtención de Mapas de amenazas por inundación SGR 2010.

Esta metodología, consistía en darle pesos numéricos a cada vector, refiriéndose a los polígonos de la cartografía temática, para luego utilizar la calculadora raster y generar el producto, reclasificación en 5, que va desde amenaza muy alta a sin amenaza.

$$LR1 = [DENSIDAD1] * 0.1 + [GEOLOGIA] * 0.2 + [ISOYETAS] * 0.1 + [Reclas_Sat] * 0.2 + [USO_SUELOS] * 0.2 + [usoiso] * 0.2$$

En la ecuación para la generación de las zonas propensas a inundación se considera los siguientes factores: densidad de los puntos de acumulación de agua y flujos de escorrentía, la geología y tipos de geomateriales presentes en el sector de estudio, las isoyetas de las precipitaciones y de las intensidad de lluvia, el modelo de saturación que se obtiene de SINMAP, la capa de uso de suelo y la combinación de la capa de uso de suelos e isoyetas que dará la información de suelos que se ven afectados por las intensas precipitaciones. Se aplica la calculadora raster asignando un valor de porcentaje dependiendo de cuál es el agente o capa detonante en el sector de estudio que provocaría inundación, la suma de estos parámetros es el 100%.

Se comprobó con registros históricos de inundaciones del año 1998, en él se presentó el fenómeno del NIÑO, y en zonas donde el Modelo Digital de Elevación (DEM) contienen un tamaño de pixel menor a 10 metros, con una escala menor a 1:10.000, obteniendo un resultado de 80% de certeza en los sectores de pendiente menores al 10% de inclinación.

Los modelos de saturación y dirección de flujos que se obtuvieron del módulo de SINMAP, también se han comprobado con la realización de inspecciones e informes técnicos puntuales. Se hace mención del que se realizó en el Sector Monte Sináí, Proyecto Centralidad del Distrito 8 (S.G.R, 2012).

En las Figuras 8 y 9 es el resultado del modelamiento en el sector del proyecto definiendo al sector en una zona de baja a media pendiente y de susceptibilidad a anegación de aguas de precipitación, producto del ingreso de los valores geomecánicos de los

geomateriales presentes en el sector, que se comprobó con los registros históricos de la red de Datos de la sala de situación de la Secretaria de Gestión de Riesgos.

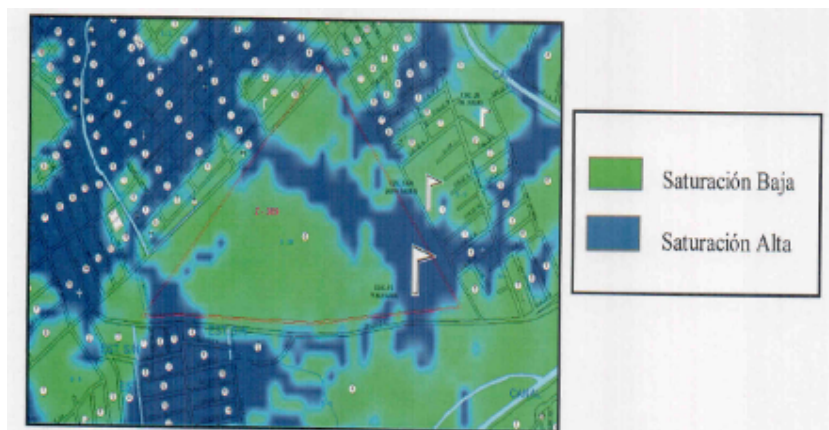


Figura8: Modelo de Saturación en función de la litología y morfología del sector. SGR 2010.

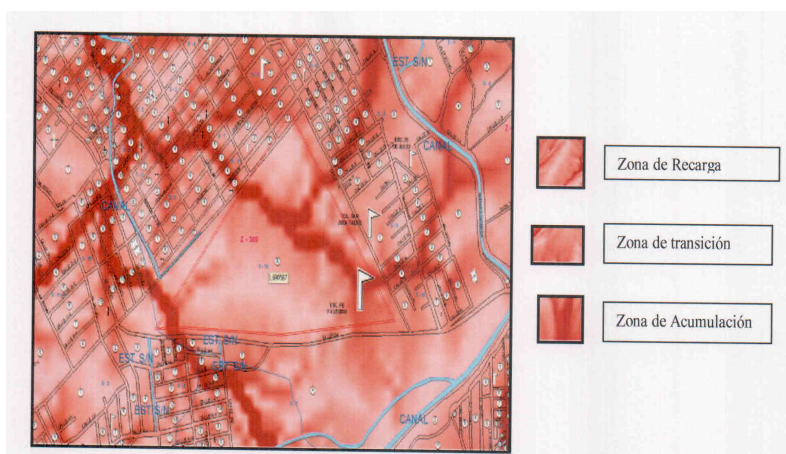


Figura9: Modelo de flujos de acumulación en función de la litología y morfología del sector. SGR 2010.

(Acaro, 2010) menciona que la finalidad de su investigación es la determinación de zonas propensas a inundaciones y deslizamientos en el área urbana de Loja, aplicando los Sistemas de Información Geográfica, la metodología aplicada en su trabajo en primer lugar determina el cálculo de la erosión activa con la utilización de interpretación satelital de una ortofotos, mediante procedimientos de análisis cartográfico con software de SIG

realizando el cálculo de erosión potencial extraída a partir de la disección horizontal con la utilización de los cauces hídricos y de la disección vertical con la topografía.

La finalidad del trabajo desarrollado por (Acaro, 2010) es que sirva como un instrumento base para la aplicación de políticas públicas enfocadas a la prevención de riesgos y procesos de planificación dentro del área urbana.

En la Figura 10 se muestra los resultados obtenidos que son los mapas de inestabilidad e inundaciones en base a la población afectada.

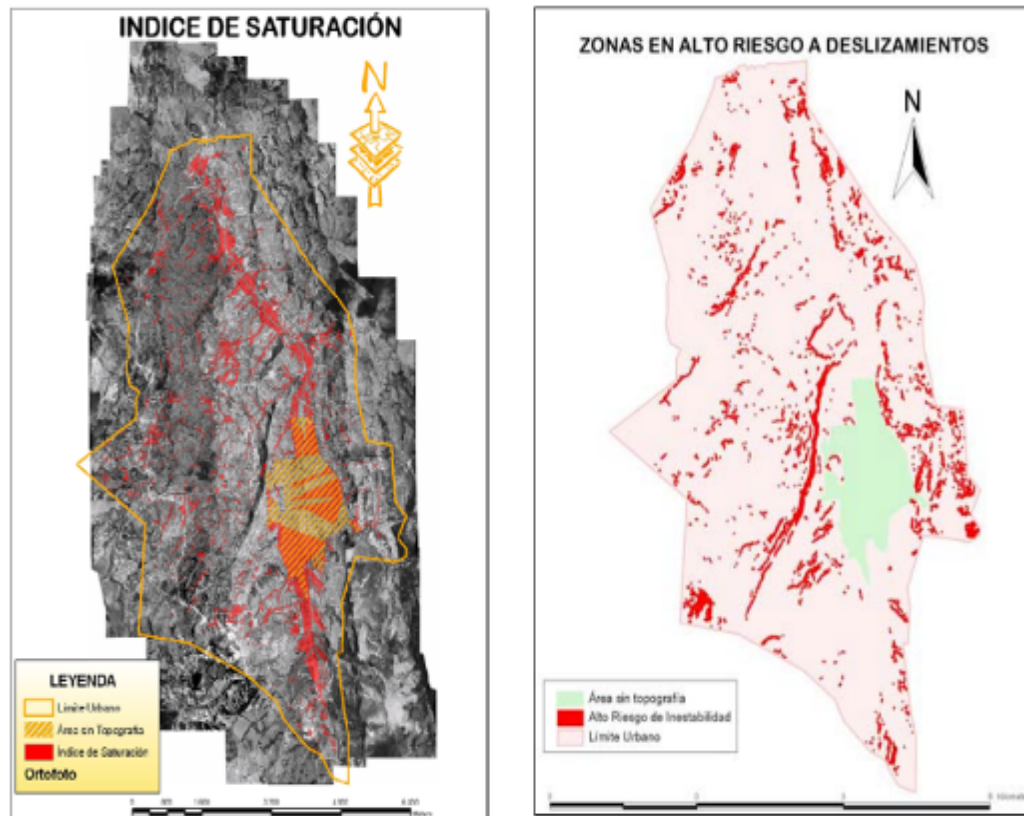


Figura10: Mapa de Índice de Saturación y zonas en alto riesgo a deslizamientos. Acaro,2010.

Mientras que (Abril, 2011) en su investigación combinó las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica y las técnicas de evaluación multicriterio para la evaluación

territorial, aspectos metodológicos para el tratamiento de la información a través de la matriz de jerarquización analítica de Saaty.

La metodología multicriterio servirá para la delimitación de zonas inestables a través de correlación de los mapas de amenaza y las tasas de daño potencial a personas, a la propiedad y características ambientales (vulnerabilidad), indicando la probabilidad temporal y espacial de la ocurrencia de los daños y la vulnerabilidad (Figura 11).

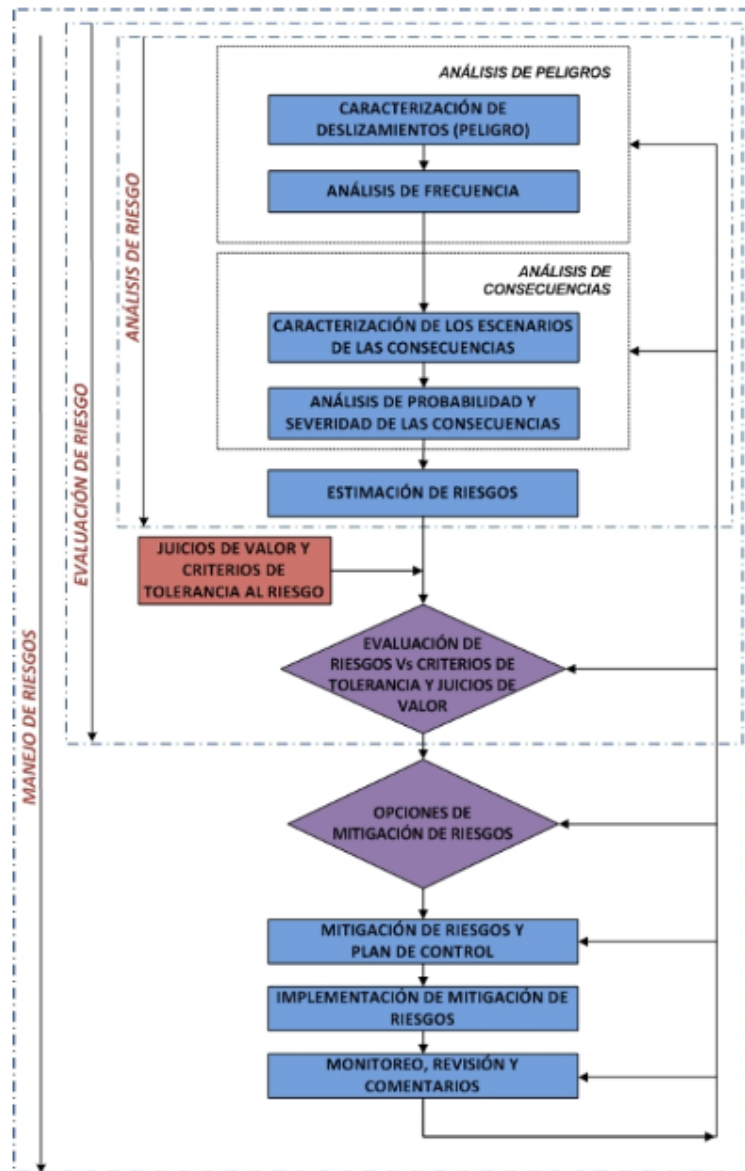


Figura11 Esquema de mapas de zonificación de riesgos. Abril, 2010.

Se ha mencionado las diferentes metodologías para obtener los modelos de susceptibilidad a inundaciones y movimientos en masa, (Acaro, 2010) utiliza el modelo de saturación y de inestabilidad del sector con la información geomecánica en modelo digital de superficie de 10 metros, por lo que les delimitara las zonas de recarga, flujo y

acumulación en las zonas bajas al igual que (Abril, 2011), se debe tener en cuenta que el modelo es aplicado a movimientos de tierra más profundos, tales como los deslizamientos rotacionales y traslacionales, ya que utiliza el modelo de elemento infinito, datos de información de suelo, con los debido métodos directos como perforaciones y ensayos de suelos, para determinar los espesores y capas de suelos.

La geología del lugar también es muy importante, los datos geomecánicos como el ángulo de fricción, cohesión y densidad. El modelo que se generara en el presente trabajo no difiere de las metodologías realizadas por los autores mencionados anteriormente, pero cabe resaltar que el modelo digital de elevación es la principal herramienta para este análisis, ya que las geoformas y geometría del lugar es el factor que adapta la dirección de los flujos y drenajes.

3 METODOLOGÍA

3.1 Zona de Estudio

3.1.1 Ubicación Geográfica.

El área de estudio se ubica en la zona Noroeste de la ciudad de Guayaquil de la Provincia del Guayas, comprendida entre Sector Voluntad de Dios II y Monte Sinaí. Entre las hojas Topográficas de Guayaquil Norte (NV-A1c, 3687-IV-SW) y Monte Sinaí (MV-B2d, 3587 I SE) a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM).

Constituye un área aproximada de 2382 Ha donde toda el área está afectada por movimientos en masa de tipo rotacional, traslacional e inundaciones por zonas de anegación.

En la tabla 4 se adjuntan las coordenadas del proyecto en el Sistema de Coordenadas WGS-84:

Tabla 4: Coordenadas del sector de ubicación

PUNTOS	COORDENADA X	COORDENADA Y
1	606007	9769681
2	609304	9769690
3	609290	9762489
4	605996	9762481

Utilizando la herramienta Google Earth, se observa la ubicación del proyecto que se encuentra ubicado en el sector Cooperativa Monte Sinaí y Pascuales, con acceso a la Vía Perimetral de Guayaquil, detrás del Canal de Cedege. En la Figura 12 se muestra la ubicación del presente Trabajo.

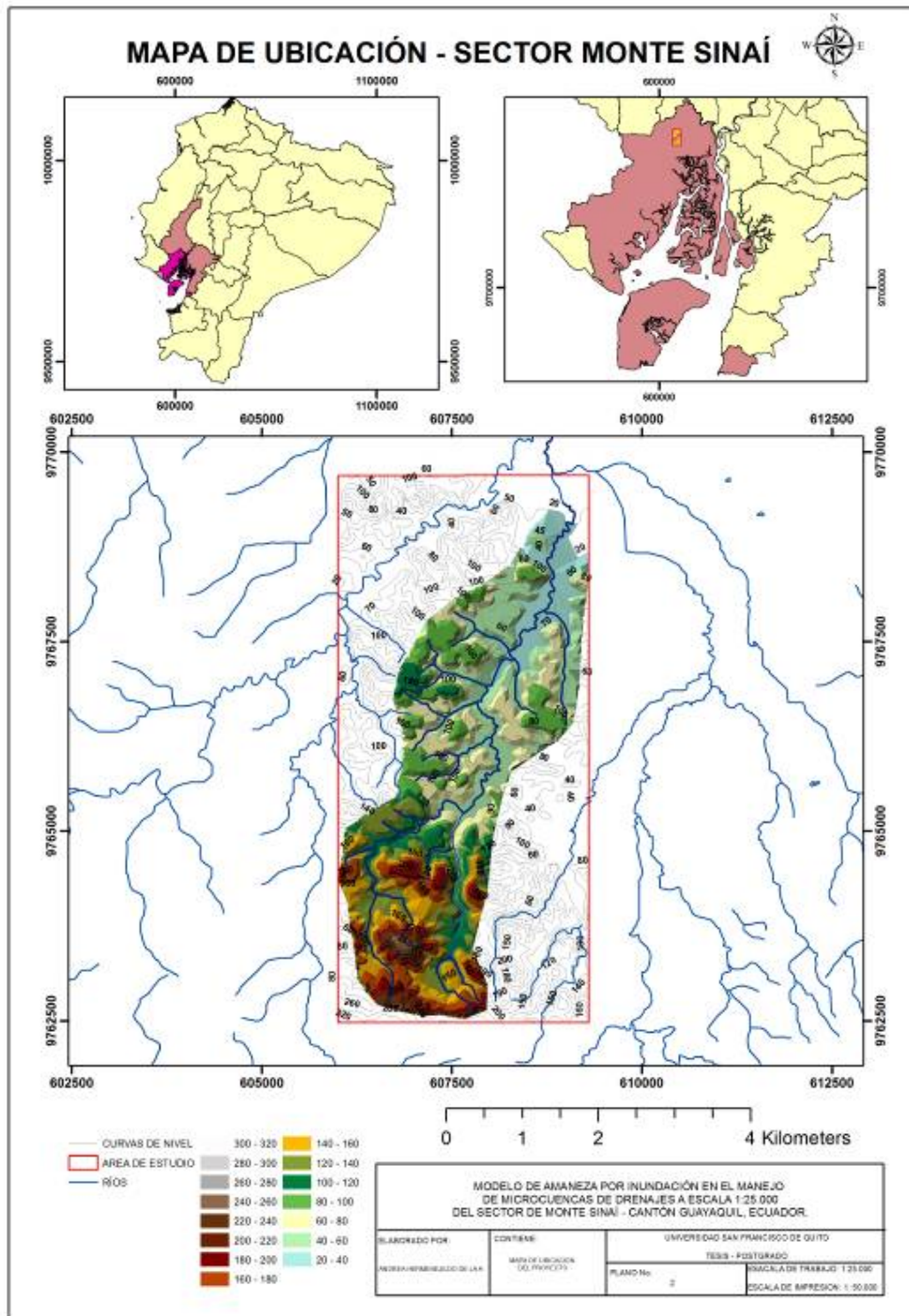


Figura12: Ubicación de la zona de estudio. Sector Monte Sinai..

3.1.2 Geología.

Litológicamente en la zona existen areniscas, grauwacas, lutitas con pequeños clastos de basalto andesítico perteneciente a la Formación Cayo (Figura 13). La roca en el sector es permeable en virtud de sus discontinuidades mecánicas por lo que presenta planos de estratificación y fisuras. Esto indica que el agua circula por las fisuras y planos de estratificación, de manera que en función de la apertura o separación de fisuras y el grado de interconectividad, habrá franjas de terreno con flujo de agua. (MAGAP, 2010).

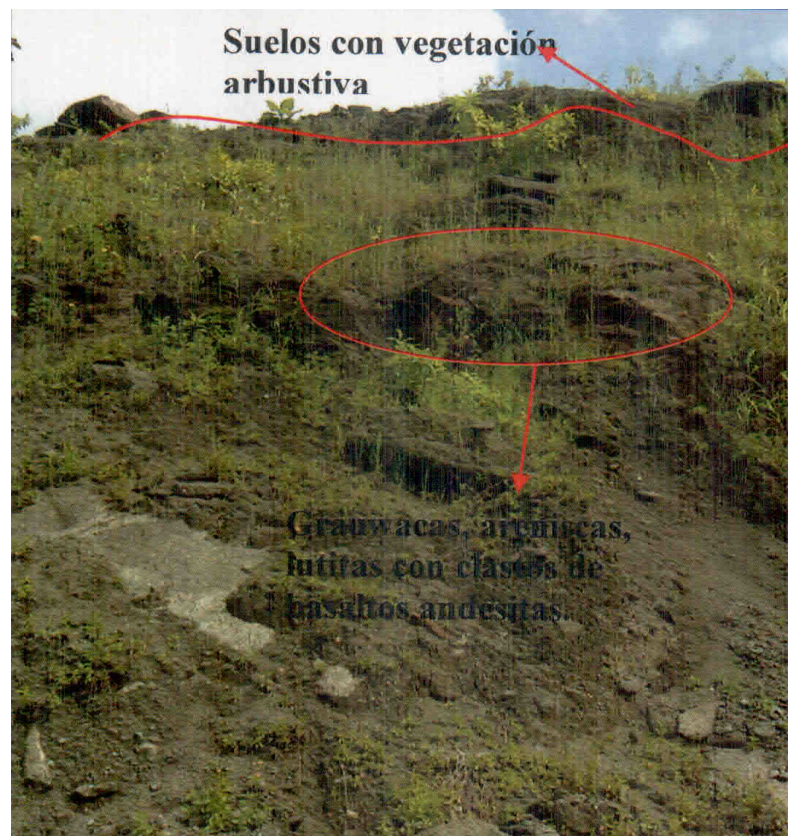


Figura13: Representación estratigráfica y geomorfológica de la secuencia de deposición de los sedimentos d la Formación Cayo en el sector de Monte Sinai.

3.1.2.1 Formación Cayo.

En el estudio IIEA-CONUEP (Benitez, 1990) se resumió la columna estratigráfica de la formación Cayo en Guayaquil.

La Formación Cayo es un grupo potente de rocas de origen volcánico-clástico depositadas en ambiente marino, sobreyaciendo a la formación Piñón e infrayaciendo a la formación Guayaquil. El contacto con la Formación Piñón es erosional.

Para una mejor descripción se subdividió a la formación en 5 miembros caracterizados por el predominio de lutitas (y/o turbiditas finas) o de areniscas, conglomerados y brechas (turbiditas métricas y megaturbiditas).

La potencia total de la Formación Cayo es de 2850 m. En vista de que en las secciones basales no se midieron columnas completas, la potencia fue calculada con valores promedio de rumbo y buzamiento (rumbo = N110, buzamiento = 17° al Sur). Se considera que los valores de potencia son representativos dado que al medir en el campo la columna casi completa del miembro superior C1 se encontraron valores comparables (Benitez, 1995).

En la figura 14 se presentan los factores geológicos que controlan la generación de superficies de fallas probables.

Condiciones Geológicas	Superficie de falla probable
Suelos no cohesivos Suelos residuales o coluviales, sobre roca Suelos arcillosos firmes, con alta presencia de grietas, zonas lluviosas.	Traslacional, con relación pequeña de profundidad/longitud
Bloque deslizando Material rocoso fallado o altamente fisurado Suelos cohesivos duros, intactos, y sobre pendientes inclinadas Presencia de capas intercaladas de rocas sedimentarias, zonas lluviosas Suelos arcillosos duros fisurados Suelos altamente estratificados Rellenos de material de piedemonte, sobre materiales de origen coluvial	Superficie planar
Capas gruesas de material residual o coluvial Arcillas blandas de origen lacustre Suelos cohesivos blandos	Superficie curva, generalmente circular

Fuente: Universidad de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Civil. IC-809 Ingeniería Geotécnica.

Figura 14: Factores Geológicos que condicionan la superficie de falla probable.

3.1.3 Suelos.

La diversidad de los suelos existentes en el área de estudio se explica por la combinación de ambientes geológicos, por la ocurrencia de diferentes materiales originales (in situ) y la acción de la geodinámica externa.

La clasificación de los suelos, desde el punto de vista geológico, establece suelos residuales, transportados, coluviales, coluviales-aluviales, aluviales y deltáicos.

Los estratos pertenecientes a las formaciones Cayo y Guayaquil presentes en las colinas bajas menores a 100 msnm, en las estribaciones de la cordillera Chongón Colonche son en general poco potentes, predominando los suelos residuales. El proceso erosivo origina detritos que se depositan al pie de las colinas, cauces o valles incipientes, formando los suelos transportados (Benitez, 1995).

3.1.4 Geomorfología.

Los factores que influyen en la geomorfología y en los procesos morfo dinámicos son: la geología, el clima, las condiciones litológicas-estructurales y la cobertura vegetal.

Geomorfológicamente el sector se encuentra sobre colinas medianas con pendientes inferiores entre 10% – 30% de inclinación y superiores al 30 % de inclinación y terrazas altas debido a la sedimentación de los cuerpos de agua o redes fluviales que pasan por la zona de estudio. La presencia de suelos con vegetación arbustiva reduce el nivel de escorrentía superficial generando filtraciones, drenes de flujo muy activo que erosionan las formas, acelerando el cambio de la morfología del sector de estudio

Para la realización del mapa Geomorfológico y obtención de una clasificación geotécnica de los tipos de geomateriales de acuerdo a su inclinación o pendiente del terreno, se utilizó como base el mapa de pendientes, creando dos campos: las geoformas y la caracterización geotécnica, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 Coordenadas del sector de ubicación.

Clasificación de pendientes		
Grados	Geoformas	Caracterización Geotécnica
0 – 2°	Planicie	Suelos
2 – 4°	Pendiente Inclinada	Semiroca
8 – 16°	Moderadamente escarpado	Semiroca
16 – 35°	Escarpado	Roca
35 – 55°	Muy Escarpado	Roca

Los factores geomorfológicos se presentan por la suma de los factores litológicos que involucra las características geomecánica del material, la resistencia a corte, pendiente, relieves del terreno.

3.1.5 Geodinámica.

3.1.5.1 Riesgos Geodinámicos Externos.

En el sector de Monte Sinaí los problemas geodinámicos encontrados son en su mayoría de acción externa como los movimientos de ladera y erosión originados por la intervención de factores condicionantes y desencadenantes como la mala calidad de la roca y del suelo.

El análisis de uso de suelo determina que la zona se encuentra sobre suelos con vegetación arbustiva compuestos por limos arcillosos producto de la meteorización y erosión de las zonas altas y que ha sido arrastrado hacia las zonas de acumulación y de anegación, a su vez también están compuestos por limos arenosos que se encuentra en las riberas de los ríos presentes en el sector.

Localmente en el sector de estudio se evidenció la presencia de quebradas intermitentes que pueden activarse en épocas lluviosas.

3.1.6 Clima.

Por las características geográficas y topográficas de la zona, podemos encontrar microclimas de marcada diferencia con régimen climático temperado y con altitudes entre los 60 y 110 m.s.n.m. El clima de la región corresponde a subtropical húmedo, en donde se dan dos estaciones bien marcadas, el periodo denominado invierno, que se prolonga desde enero a abril y el período que va desde mayo a diciembre que se caracteriza por ausencia de precipitaciones y se conoce como verano.

En la Figura 15 se muestra la distribución geográfica de los tipos de climas presentes en la república del Ecuador (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2013).

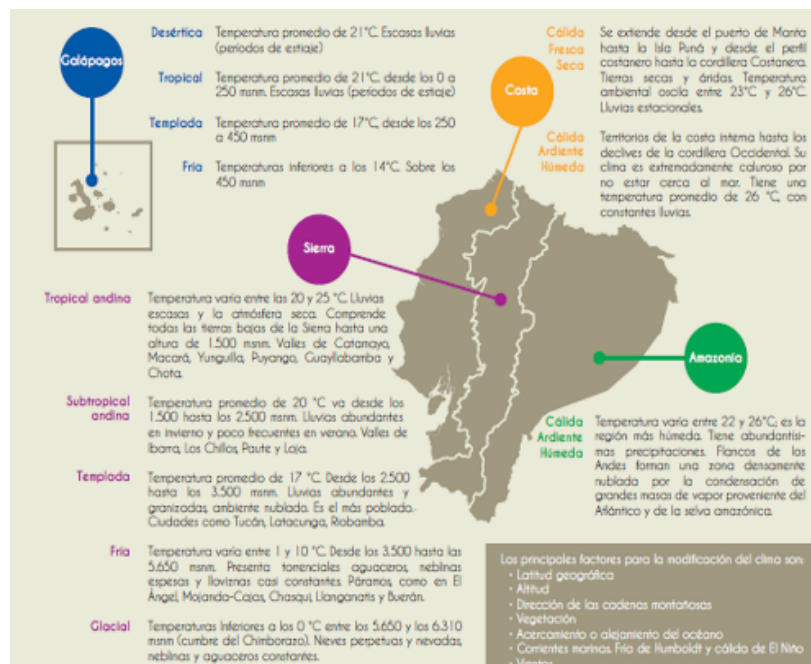


Figura 15 Zonas Climáticas de acuerdo al Atlas Geográfico de la República del Ecuador. Fuente: Ecuador Referencias Básicas para la Gestión de Riesgos (2013-2014)

3.2 Pasos de metodología para generación de los modelos de saturación e inestabilidad

3.2.1 Fuentes de datos.

Antes de empezar con la explicación de la metodología se resumirá en una lista la información que se recopiló para generar la información base y una descripción de la zona de Estudio y factores condicionantes para el presente estudio.

1. Recolección de información Base

- Plano del sector Monte Sinaí. (Instituto Geográfico Militar, edición 1-IGM, Serie J821, Hoja MV-B2d,3587 I SE, escala 1:25.000)
- Hidrología (SENPLADES, 2010, Escala 1:50.000)
- Topografía
- Geología (Estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Guayaquil, Mapa Geológico – Geotécnico, escala 1:25.000, 2011)
- Uso de suelo (MAGAP, 2010, escala: 1:100.000)
- Geomorfología (CLIRSEN, 2010, escala 1:25.000)

2. Verificación y corrección de información

- Georreferenciación de imágenes
- Conversión de información a formato shapefile
- Definición de sistemas de coordenadas UTM WGS84

3.2.2 Generación del Modelo Digital de Elevación.

De la información base recopilada, las hojas topográficas a escalas 1:25.000 del IGM (Instituto Geográfico Militar), se obtienen las curvas de nivel cada 10 metros, se empieza por la determinar si hay errores en las curvas de nivel digitalizadas, que no exista traslape de las mismas, ni repeticiones de altitud. Revisado toda esta información se procede a realizar el TIN.

Para la creación del TIN (Redes de Triangulaciones Irregulares), se procesa información en formato shapefile, una vez generado el TIN se procede a la creación de capa Raster, que es el modelo Digital de Elevación de la microcuenca de Rio Los Achiotes. Con la herramienta TIN to raster de 3D Analyst, la información que se geoprocesará debe delimitarse en base a la línea divisoria de agua de la microcuenca.

3.3 Morfología de la Cuenca Hidrográfica

3.3.1 Perímetro de la Cuenca (P):

Se calcula a partir de la información obtenida del Modelo Digital de Elevación (DEM), y del shapefile hidrológico, midiendo la longitud de la línea que representa el límite exterior de la microcuenca, esta medida se da en Kilómetros Km.

3.3.2 Área de Drenaje (A):

El área de la cuenca es quizá el parámetro más importante, siendo determinante de la escala de varios fenómenos hidrológicos tales como, el volumen de agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc.

Se calcula esta área con las herramientas del SIG, se utiliza el software ARCGIS 10.0 se crea un polígono de la cuenca delimitada, luego se crea una campo en la tabla de atributos de área, calculándolo en Km cuadrados.

3.3.3 Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad.

El índice o coeficiente de compacidad K_c se debe a (Gravelius, 1914) y se calcula analizando la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca. (Llamas, 1993) da la siguiente expresión que se detalló en el Capítulo 2:

$$K_c = 0.28 * (P/\text{raízcuadrada}A)$$

Cuanto más cercano este el índice a la unidad, la cuenca se la considera de forma circular, por lo tanto es más compacta, y aumenta conforme disminuye la compacidad.

3.3.4 Amplitud del relieve.

Se define como la diferencia entre la altura máxima menos la altura mínima de la cuenca, que toma el valor de $Amp = h_{max} - h_{min}$

Para calcular la amplitud del relieve se identificó la cota de máxima altura y la cota de mínima altura de las curvas de nivel del sector de estudio.

3.3.5 La curva hipsométrica.

Mediante la curva hipsométrica se define el relieve mediante una gráfica de doble entrada cota-superficie acumulada. El área se acumula de las cotas máximas a las cotas

más bajas. En la hipsometría en la cuenca de la quebrada en el sector de Monte Sinaí se calcula la distribución de áreas en función de la altitud y se puede calcular las altitudes centrales de la cuenca.

En la Figura 16 muestra las curvas de Strahler, que son curvas características del ciclo de erosión de cuencas con potenciales evolutivos diferentes.

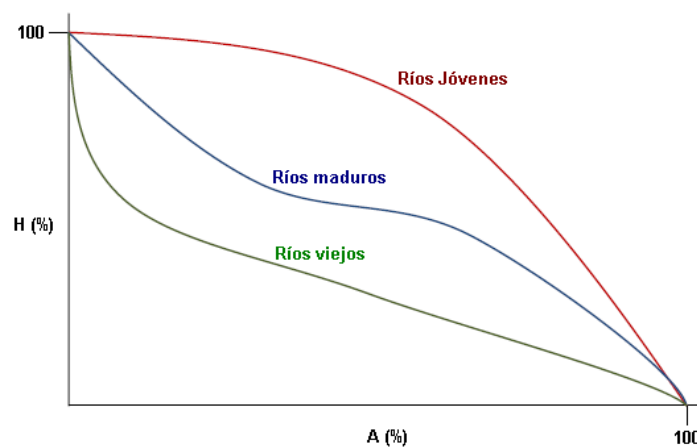


Figura16: Determinación de afluentes a través de la curva hipsométrica..Fuente: aguaysig

3.3.6 Altura mediana (hmed).

Es aquella que obtenemos de la curva hipsométrica entrando con la mitad de la superficie, por tanto es la altura para la cual las áreas quedan igual repartidas.

3.4 Generación de modelos con herramientas Hidrology

En la figura 17 se muestra un modelo SIG para la delimitación de Cuencas Hidrográficas realizado con la herramienta Model Builder, cuyo diagrama de flujo automatiza el geoprocesamiento de los datos anteriormente explicados. Los datos de entradas que se utilizan para la obtención del modelo se basan en el DEM generado en el capítulo 3.7.2.

Para la delimitación hidrográfica de la cuenca, se genera el mapa de dirección de flujo en las que se identifica las depresiones en el modelo digital de elevación, si existen estas huecos o depresiones se realiza un fill, una vez realizado este proceso, se procede a generar el mapa de flujo acumulado obteniendo un mapa de red hidrográfica y microcuencas en formato raster.

Se realiza una clasificación de red de drenaje y generación de una red hidrográfica en formato vectorial.

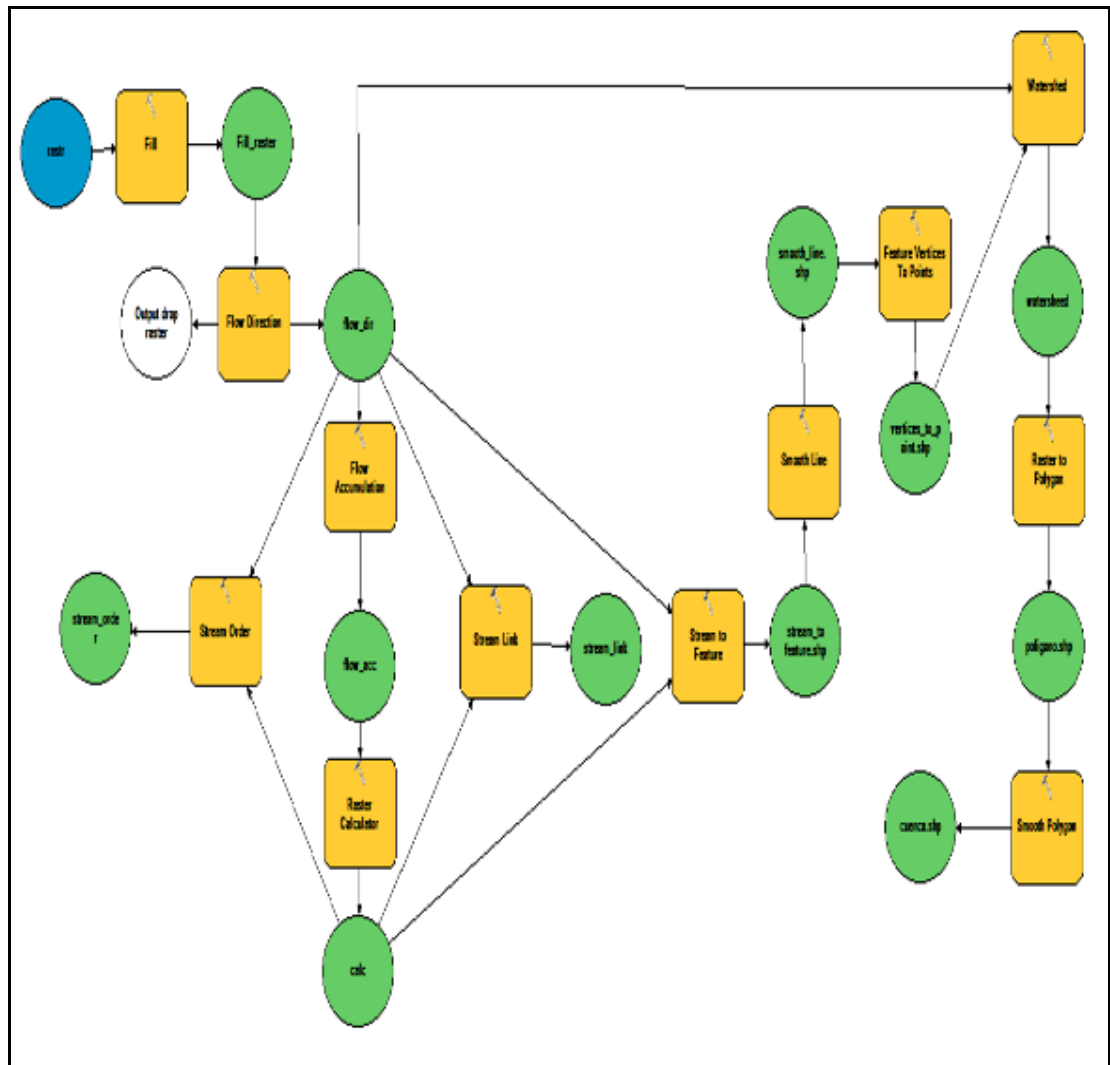


Figura17: Modelo para delimitación de Cuencas Hidrográficas

Entonces, para cumplir con uno de los objetivos específicos de la investigación del modelo de amenaza, se procede a trabajar con la herramienta Hidrology de Spatial Analyst, para esto se debe tener el modelo digital de elevación, esto se explicó en el capítulo 2.2.1. La herramienta Hidrology está dentro del ArcToolbox/ Spatial Analyst Tools.

Las herramientas de este software llamada Hidrology permiten hacer el análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica, que a su vez delimita los polígonos de las cuencas hidrográficas, sabiendo sus características físicas y así poder determinar las áreas de influencia de la misma, y obtener la jerarquización de los afluentes de la cuenca en estudio (Figura 18).

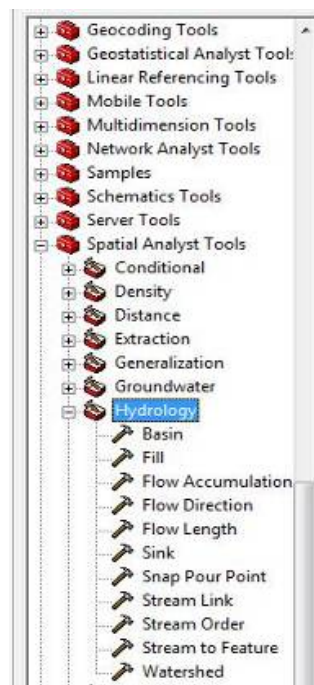


Figura18: Herramienta de ArcToolbox que contiene a Hidrology. Fuente: ArcGIS

Se rellena los espacios que no poseen datos, denominados depresiones, en el modelo digital de elevación. Una vez realizado el Fill (relleno de las depresiones) al DEM (Modelo Digital de Elevación), se procede a la creación del modelo de dirección de flujo, para esto se calcula las direcciones de cada una de las celdas. Este modelo resultante indica la dirección donde fluiría el agua de forma numérica (figura 19).

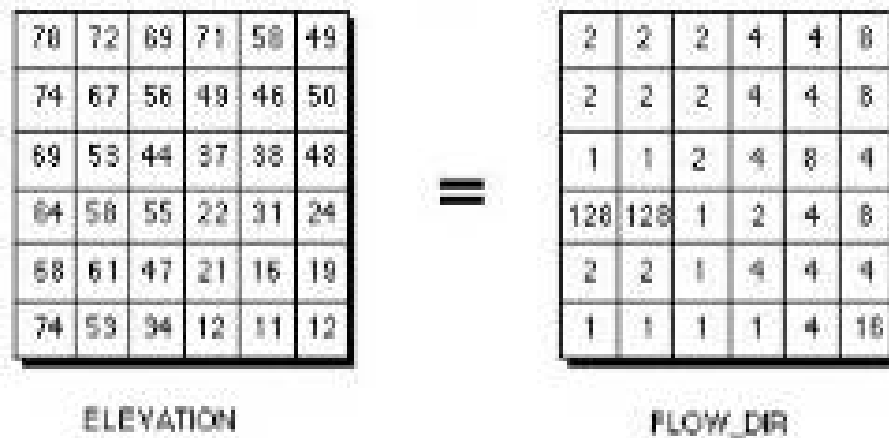


Figura19: Método de derivación de dirección de flujo a partir de un DEM (Jenson&Domingue, 1988).

Luego se calcula el modelo de dirección de flujo o Flow direction, que definirá la dirección de flujo (Figura 20) buscando el camino descendiente de una celda a otra. Siguiendo con los pasos para la determinación del modelo de caracterización de cuencas o cuerpos de agua, se determina el flow accumulation, para definir los stream, que es la fase en las que se clasifican las celdas con acumulación de flujo superior al umbral que especifica el usuario a la celda que pertenece a la red de flujo.

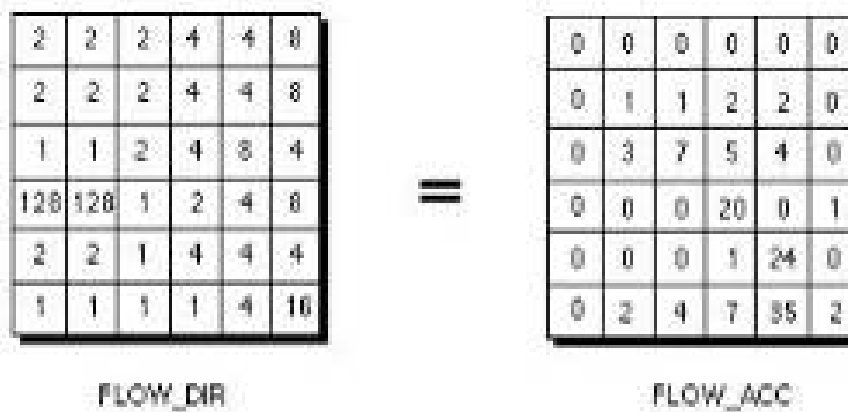


Figura20: Método de derivación de acumulación de flujo a partir de un DEM (Jenson&Domingue, 1988).

Este umbral se especificara como la clasificación del número de celdas vertientes. Se debe tener cuidado con el valor de acumulación ya que si es bajo, los pixeles serán seleccionados como la red hídrica y si este valor es alto, los drenajes de valor alto serán la red hídrica.

$$\text{stream_Red} = \text{con}([\text{FlowAcc_flow1}] > 20000, 1)$$

La ecuación tiene la finalidad de crear una red de drenajes, en la que se especifica un umbral para la cantidad de píxeles adyacentes que constituyen una corriente, dependiendo de la longitud del afluente principal.

Siguiendo con la metodología se determina el Stream Link, esta herramienta divide el cauce en segmentos no interrumpidos, quiere decir que el recorrido de la dirección de flujo es segmentado en una unión y en un punto de desague o una división del área de drenaje. Para la determinación del orden de afluentes se utilizó el método de Stahler que menciona que cuando los afluentes se incrementan cuando se cruzan dos drenajes del

mismo orden y si estos no son del mismo orden no incrementara. Luego ese modelo se convierte en una capa vector para la determinación de los puntos donde se cortan los drenajes, nos interesan los puntos finales de cada flujo ya que nos indicara la acumulación. Finalmente delimitaremos las subcuencas con la ventana Watershed, que delinea cada una de las microcuencas.

Para la generación de microcuencas se utiliza la herramienta watershed, que consiste en la delimitación de cuerpos de agua dentro de una cuenca, subcuenca o microcuenca, se realiza el procedimiento con la herramienta Hydrology, con el vector resultante, stream obtenido del raster de dirección de flujo, se procede a convertir a vector, y convertir de puntos a vértices las intersecciones del afluente mayor es decir del río principal.

Luego con estos vértices se utiliza el watershed que nos delimita las microcuencas, y con el editor se modifica los límites de estos polígonos para ajustar con las herramientas de batch watershed delineation que nos permite definir el área que se traslapan en la cuenca delimitada, esta herramienta la encontramos en el menú de watershed processing de arcyhydro, aquí nos piden los archivos de dirección de flujo, el raster de la red de flujo y los puntos de concentración.

3.5 Generación de modelo de redes Hidrográficas

Para generar el modelo de redes hidrográficas se utilizó los datos de acumulación de flujos, tomando valores de 2000 celdas acumuladas. Esta cantidad se tomó considerando los pixeles adyacentes al afluente principal con sus respectivos drenajes mayores y menores, debido a que la longitud del afluente principal es mayor a 10 Km. La resolución del Modelo digital de elevación que se generó a partir de las curvas topografías es escala 1:25.000 ayudo afinar los limites geográfico de la cuenca hidrográfica. Y para la obtención de los tributarios de la microcuenca se utiliza este modelo de redes hidrográficas que son necesarias para la ecuación matemáticas de formulación del modelo hidrológico.

En la obtención del orden de la red de drenaje se utilizó el método Strahler (Figura 21) como se había mencionado en el capítulo 2.1.1, que consiste en la asignación de un orden numérico a los vínculos en una red de arroyos. Este orden es un método para identificar y clasificar los tipos de arroyos basado en la cantidad de afluentes.

Se pueden inferir algunas características de los arroyos simplemente al conocer el orden. Y una vez obtenida la jerarquización del afluente se procede a convertir en vector.

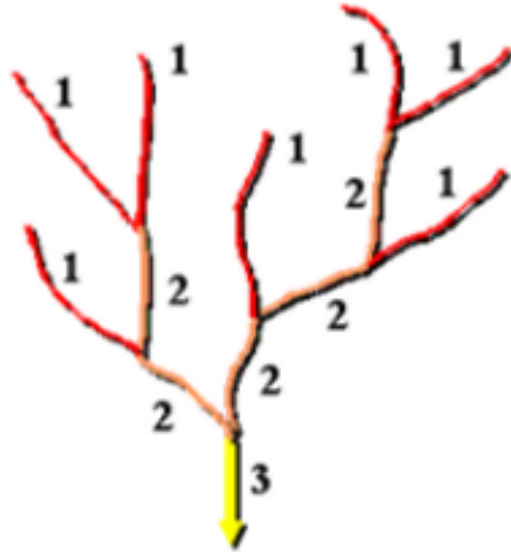


Figura21: Método de clasificación de arroyos Strahler

Para el presente trabajo se determinó que el principal afluente es de orden 3 contabilizando los afluentes de orden 1 y 2 para la microcuenca del Río Los Achiotos, utilizando el método de arroyos de Strahler.

3.5.1 Ley de Bifurcación (Ley de Horton).

Una vez jerarquizada la cuenca hidrográfica se realiza los cálculos para la determinación de los parámetros geométricos. Para esto primero en la jerarquización de la cuenca hidrográfica se realizó manualmente, ingresando los valores para cada bifurcación, sean estos los valores 1, 2 o 3. Luego se contabilizó los segmentos resultantes de cada orden de curso del afluente principal, midiendo las longitudes en la tabla de atributos.

La relación de bifurcación de la cuenca se calcula sacando el promedio de las R_b . Las cuencas cuya relación de bifurcación permanece constante, indican homogeneidad en las características geo ecológicas.

3.5.2 Relación de Longitud (RL).

Es la relación entre las longitudes totales de cauces de órdenes sucesivos. Y parte de los siguientes enunciados:

- Los segmentos de primer orden son los de menor longitud.
- La longitud de los cursos fluviales se incrementa a medida que aumenta la magnitud en el orden de los mismos.
- La longitud media de los cursos de agua aproximadamente se triplica al pasar de un orden al siguiente.

$$RI = L_{u+1}/L_u$$

3.5.3 Densidad de Red de Drenaje.

Se obtiene a partir del cociente entre la longitud de los cauces que conforman el sistema fluvial de la cuenca y el área total de la unidad hidroespacial.

$$D = L_u/A = 0.25$$

3.6 Generación de Modelos de Saturación y flujos de acumulación a través de la SINMAP (Stability Index Map)

Esta etapa incluye la captura y análisis de la información existente del sitio de estudio.

Esto incluye:

- Plano del sector Monte Sinaí. (Instituto Geográfico Militar, edición 1-IGM, Serie J821, Hoja MV-B2d,3587 I SE, escala 1:25.000)
- Hidrología (SENPLADES, 2010, Escala 1:50.000)
- Geología (Estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Guayaquil, Mapa Geológico – Geotécnico, escala 1:25.000, 2011)
- Geomorfología (CLIRSEN, 2010, escala 1:25.000)
- Archivos Históricos, fotografías en revistas y (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2015).
- Informes geotécnicos, geológicos, registros de perforaciones, bases de datos, registros de pozos de agua, precipitaciones, deshielos, etc. (Geoestudios, 2013).

Se realiza una compilación de información multidisciplinaria entre las instituciones que poseen información que se desee analizar. Dentro de ellas están los gobiernos locales y regionales, oficinas de planificación y transporte, instituciones de protección civil, bomberos, institutos hidrológicos y meteorológicos, institutos sismológicos, universidades, archivos de periódicos, sociedades arqueológicas etc.

En el caso de estudios regionales de pequeña escala, se pueden utilizar imágenes satelitales. Para este caso se utilizó un MDT generado en el capítulo 3.7.2 además de foto aérea a la misma escala obtenida del WMS del IGM.

Se realizó en primer lugar un análisis preliminar del terreno utilizando para ello una herramienta en Arcview conocida como Índice de Posición Topográfica TPI donde toma en cuenta la pendiente, concavidades y convexidades y con ello elaborara un modelo de geformas (Figura 22).

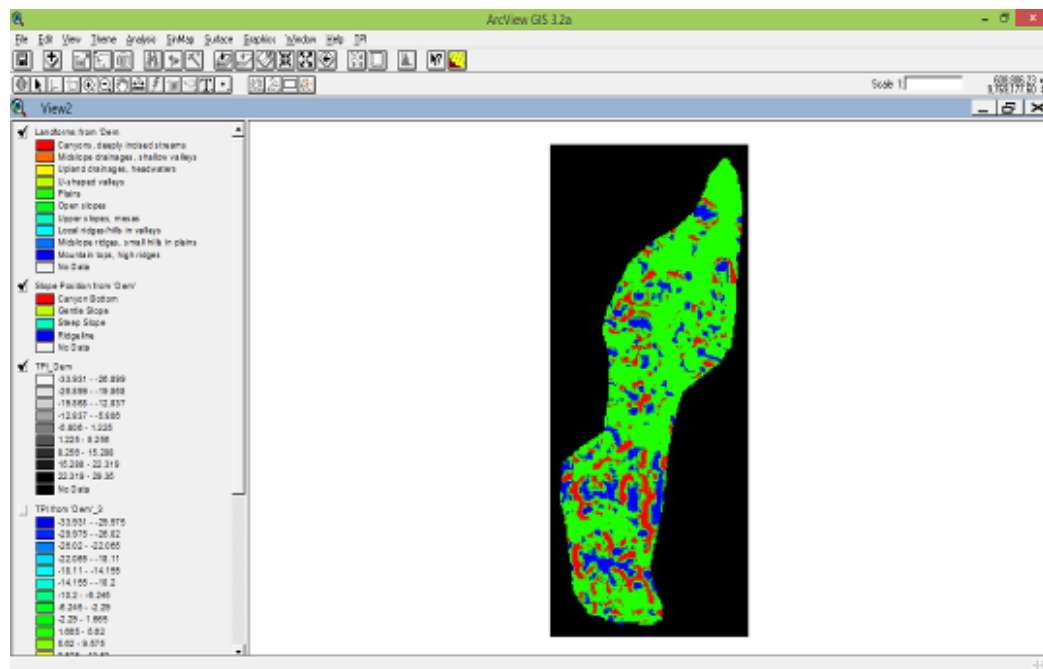


Figura22: Proceso de TPI en la microcuenca de Río Los Achiotos.

Para la complementación de los datos de la zona se han realizado recorridos de campo con el fin de cubrir los vacíos de información, reconocimiento en el terreno de las unidades que se bosquejaron en las fotos aéreas, y realizando el mapeo para comprobar los tipos de suelos y de rocas y los sitios con movimientos en masa e inundaciones.

En el levantamiento geológico de estudios previos se registró las características geológicas de los materiales aflorantes como unidades litológicas y límites estratigráficos, tipos de suelos y rocas, grado de meteorización, elementos estructurales (diaclasas, fallas, foliaciones, esquistosidad), evidencia de filtraciones y signos de inestabilidad (grietas, material triturado, flexiones, cambios en la vegetación, etc.).

Los modelos de saturación y flujos de acumulación permiten obtener información preliminar para un análisis detallado en el estudio de un deslizamiento. Este análisis se realizó con ayuda del software ArcView 3.2 y con el módulo SINMAP, que nos permitirá generar el modelo de índice de estabilidad y de saturación a partir de las características geomecánicas de los geomateriales.

3.7 Modelamiento con SINMAP (Stability Index Mapping)

Es desarrollado para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos superficiales a escala regional mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) (Pack R. T., 1998). La técnica que utiliza el programa es la del talud infinito y un modelo hidrológico simple que combina estas dos técnicas para determinar el grado de saturación y el factor de seguridad (FS) que se calcula con el criterio de Mohr-Coulomb.

El método más simple para especificar las direcciones del caudal, es el método denominado D8, que consiste en la asignación de los flujos en las celdas que contengan mayor pendiente, este método fue presentado por O'Callaghan and Mark (1984).

El D8 tiene desventajas debido a la discretización del flujo en solo una de las ocho direcciones posibles, separadas por 45° (Tarboton, 1998). Estos han motivado el desarrollo de otros métodos que comprenden varios métodos de dirección de flujo (Tarboton, 1997), los métodos de dirección al azar y métodos de tubo de flujo de red (Costa Cabral y Burges, 1994). Tarboton (1997) discute los méritos relativos de estos. SINMAP utiliza el método de D8 y los múltiples métodos de dirección de flujo desarrollado por (Tarboton, 1997) (Manual del usuario SINMAP).

En este método se mide el ángulo de dirección de flujo que determina la Dirección de la pendiente más pronunciada en las ocho facetas triangulares formadas en una rejilla de 3 píxeles que están centrados en una cuadrícula de interés.

Para modelar la probabilidad de deslizamiento tipo traslacional de una ladera o talud se considera los siguientes factores asociados a la morfometría del terreno y las propiedades geo mecánicas del terreno. Para esto se utilizó el software SINMAP., donde se debe ingresar los siguientes parámetros.

- (1) modelo digital de elevación (Raster),
- (2) Densidad del sustrato en que se estructura la ladera,
- (3) ángulo de fricción interna en el macizo rocoso,
- (4) cohesión
- (5) Índices máximos y mínimos de humedad relativa.

Mediante la aplicación de varios algoritmos basados en análisis geométricos y geo mecánicos, el programa determina los gradientes de pendiente topográfica, las direcciones de flujo o aspecto de las laderas, el área de contribución y las gradientes de saturación. La relación entre estos parámetros permite definir las zonas más susceptibles a colapsos, un índice de estabilidad que incorpora las ecuaciones definidas como "Modelo de estabilidad de pendientes infinitas" y la "Ecuación del índice de humedad topográfica".

Además, en conjunto con la caracterización de los parámetros, se incluyeron observaciones de terreno y se confeccionó un mapa de zonas afectadas por erosión e inestabilidad. SINMAP® incluye la posibilidad de indicar puntos del inventario de remociones con el propósito de calibrar el modelo. En la Tabla 6 se muestra los factores, procesos y criterios involucrados en la generación de deslizamientos.

Factores		Procesos	Criterios
Precipitación	Intensidad, Duración, Frecuencia Periodo de Retorno		
	Área		
Hidrología de la cuenca	Infiltración	Escurrimiento	Inclinación de las Pendientes
		Movimientos de masa	Aspecto
Erosión y susceptibilidad a deslizamientos	Geomorfología	Deslizamientos superficiales	Litología (Unidades geomorfológicas)
	Pendientes		Cobertura vegetal y uso de suelo
	Geología		
	Uso de Suelo		
Acumulación de material	Meteorización	Deposición	Distancia a los cursos de agua
	Sedimentación		

Tabla 6 Factores y criterios en la generación de deslizamientos.

En la Figura 23 se muestra un diagrama de flujo de la obtención del modelo de saturación y de estabilidad en SINMAP.

En los trabajos de Acaro (2010) y Abril (2011) mencionados de manera general en el capítulo 2 se estudiaron metodologías para la generación de modelos de inundación y movimientos en masa de manera empírica y estadística, asignando pesos o valores a cada capa vectorial que corresponden a los factores que se van a analizar: geología, geomorfología, uso de suelos. Es por esto que para la investigación de este trabajo se toma como ejemplo las metodologías descritas para realizar la comparación de los modelos resultantes. Para esto se utiliza los modelos de SINMAP de acumulación de flujos y saturación, que necesitan datos geomecánicos de los geomateriales, tales como el ángulo de fricción, cohesión de la litología que se presenta en la superficie como en profundidad y que cambia debido a la presencia de agua y otros agentes naturales.

En la Figura 23 se muestra un diagrama de flujo de los datos de entradas, el modulo a usar y los resultados de dicho geoprocesamiento.

La comparación de las metodologías se mencionara en el Capítulo 5 de Análisis de Resultados.

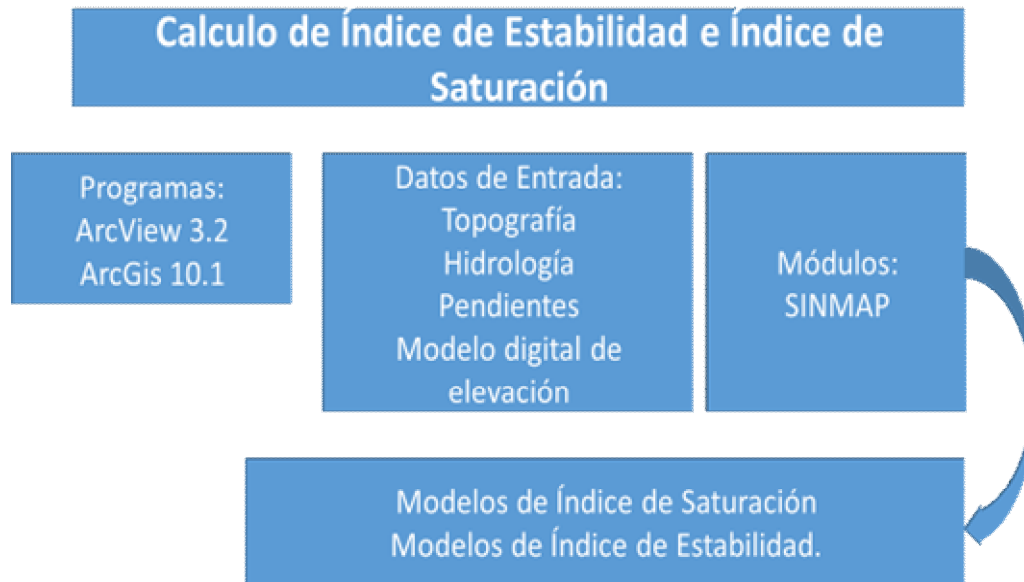


Figura 23 Cálculo de Índice de Estabilidad e Índice de Saturación en SINMAP.

Para obtener los modelos del área de estudio es necesario la información del modelo digital de elevación que implícitamente incluye el área de cuenca y las pendientes. Para generar los modelos resultantes en el módulo de SINMAP se tomó la siguiente tabla con los valores de cohesión y ángulo de fricción de geomateriales (Figura 24).

VALORES APROXIMADOS	ϕ ($^{\circ}$)	c (kg/cm ²)	γ (kg/m ³)
GRANAS COMPACTAS	35		2.0
GRANAS SUELTAS	33		
ARENA COMPACTA	32	0.01	2.0
ARENA SUELTA	30		1.8
LIMO ARENOSO	25		
ARCILLA ARENOSA	20	0.02	2.2
ARCILLA MAGRA		0.05	
ARCILLA GRASA	15	0.10	
ARCILLA MUY GRASA	hasta	0.50	
TIERRA ORGANICA			2.2

ángulo de fricción interno
 cohesión
 peso específico

Figura24: Tabla de parámetros geo mecánicos de geomateriales, para el sector de estudio.

Para el proceso de obtención del modelo de saturación e índice de estabilidad se tomó datos/parámetros geomecánicos de la roca, para el sector de estudio existen las areniscas y suelos limo arenosos pertenecientes a la Fm. Cayo y limo – arenosos que corresponden a la meteorización y erosión de la roca que posee un espesor de 10 m, comprobando con ensayos geofísicos que miden la ondas (Vs) velocidad de la onda cortante, estos datos se lo ingresan en la ventanas para calibrar los parámetros.

El mapa de saturación se ha determinado utilizando el software ArcView 3.2, con el módulo SINMAP, determinando las zonas susceptibles a inundaciones, y se determinan los valores máximos que son los correspondientes a las zonas de riesgos (Tabla 7).

Tabla 7 Índice de Saturación SINMAP

INDICE DE	SATURACION
RANGO	INDICE
BAJA HUMEDAD	0 – 0.1
PARCIALMENTE HUMEDO	0.1 – 1.1
UMBRAL DE SATURACIÓN	1.1 – 2.1
SATURADO	2.1 – 3.1

La determinación de estas zonas de amenazas depende de la probabilidad de ocurrencia, está sujeto a la intensidad con la que se presentan las épocas invernales, por lo que aumentaría la probabilidad de que en las zonas de peligrosidad se evidencie los riesgos y las pérdidas humanas con consecuencias irreversibles.

Al hacer el análisis del modelo de índice de estabilidad se considera las variables de topografía, pendientes, cauces hídricos. Al hacer la aplicación del modelo para la determinación de las zonas vulnerables a los deslizamientos tenemos la siguiente tabla 8 que es la estandarización de los índices de estabilidad del programa SINMAP.

Tabla 8 Índice de Estabilidad SINMAP

INDICE DE	ESTABILIDAD	
CLASE	INDICE DE ESTABILIDAD	DESCRIPCION
ESTABLE	>1.5	Se requiere la presencia de factores desestabilizantes significativos para producir inestabilidad.
MODERADAMENTE ESTABLE	1.25 – 1.5	Se requiere la presencia de factores desestabilizantes moderados para producir inestabilidad
CASI ESTABLE	1.0 – 1.25	Factores desestabilizantes menores pueden producir inestabilidad
UMBRAL INFERIOR DE INESTABILIDAD	0.5 – 1.0	La inestabilidad puede desarrollarse aun sin factores desestabilizantes
UMBRAL SUPERIOR DE INESTABILIDAD	0.001 – 0.5	La estabilidad puede desarrollarse aun sin factores desestabilizantes
INESTABLE	< 0.001	Los factores estabilizantes son imprescindibles para la estabilidad

Las clases de amenazas se definen de acuerdo con el valor obtenido de Índice de Estabilidad como se muestra en la Tabla 8.

4 RESULTADOS

4.1 Generación del Modelo Digital de Elevación

En la figura 25 se indica el mapa resultante de la interpolación de las curvas de Nivel (IDW) que generó el Modelo Digital de Elevación.

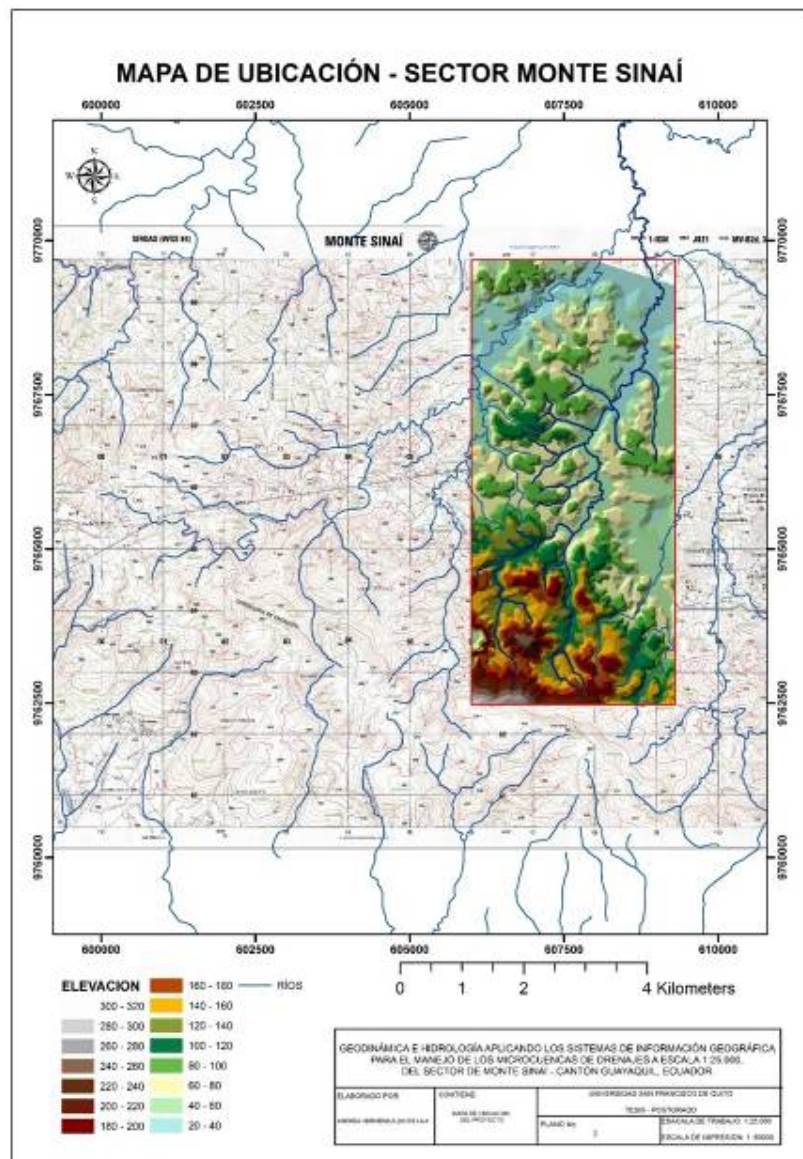


Figura25: Mapa de Red de Triangulación Irregular resultante del sector Monte Sinaí, Ecuador..

4.2 Morfología de la Cuenca Hidrográfica

En este subcapítulo se muestra los resultados de los parámetros morfométricos de la cuenca hidrográfica obtenidos de las ecuaciones del capítulo 3.

4.2.1 Perímetro de la Cuenca (P):

$$P = 17 \text{ km}$$

4.2.2 Área de Drenaje (A):

$$A = 11.518617 \text{ km}^2$$

4.2.3 Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad.

$$K_c = 0.28 * 17 / (11.518617)^{1/2}$$

$$K_c = 1.40$$

4.2.4 Amplitud del relieve.

$$\text{Amp} = (260 - 20) \text{ m}$$

$$\text{Amp} = 240 \text{ m}$$

4.2.5 La curva hipsométrica.

La tabla 9 muestra parámetros para la caracterización morfométrica de la microcuenca del río Los Achiotés y su representación gráfica en la Figura 26, donde se observa la distribución de áreas en función de la altitud y se puede calcular las altitudes centrales de la cuenca.

No	MIN	MAX	ALTURA PROMEDIO	AREAS2	Área/Área Total [%]	PORCENTAJE ACUMULADO
1	20	32	26	0.33	0.029	0.029
2	32	44	38	0.95	0.082	0.111
3	44	56	50	0.38	0.033	0.144
4	56	68	62	2.16	0.188	0.332
5	68	80	74	1.59	0.138	0.470
6	80	92	86	0.66	0.057	0.527
7	92	104	98	1.04	0.091	0.618
8	104	116	110	0.25	0.022	0.640
9	116	128	122	0.76	0.066	0.706
10	128	140	134	0.76	0.066	0.772
11	140	152	146	0.46	0.040	0.811
12	152	164	158	0.70	0.061	0.873
13	164	176	170	0.35	0.031	0.903
14	176	188	182	0.44	0.038	0.942
15	188	200	194	0.29	0.025	0.967
16	200	212	206	0.13	0.011	0.978
17	212	224	218	0.10	0.009	0.987
18	224	236	230	0.06	0.005	0.991
19	236	248	242	0.05	0.004	0.996
20	248	260	254	0.04	0.003	0.999

Tabla 9: Parámetros para la caracterización morfométrica de la microcuenca.

En la tabla 9 se muestra los parámetros para la caracterización morfométrica de la cuenca de río los Achiotés. Se determinó 20 subcuencas, con sus respectivas cotas mínima y máximas obtenidas de las curvas de nivel, para luego calcular el promedio de altura. Se calculó el área para cada subcuenca para obtener el porcentaje de áreas acumuladas, para generar la curva hipsométrica.

En la Figura 26 se muestra la Curva Hipsométrica resultante de los valores de las altitudes medias y del porcentaje acumulado.

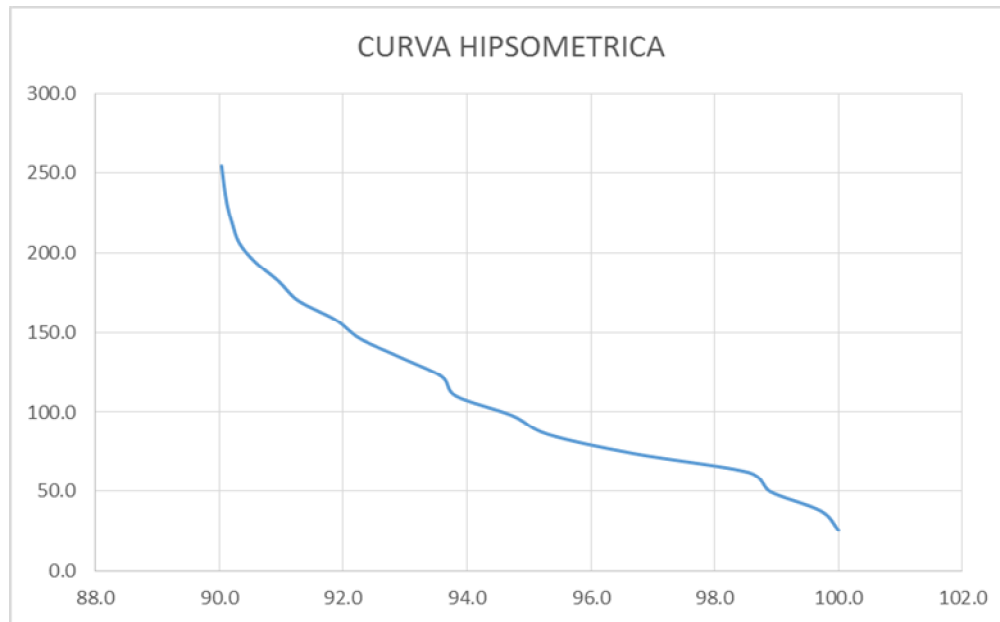


Figura26: Curva Hipsométrica de la microcuenca Río Los Achiotés.

Esta curva de hipsométrica se atribuye a las de cuenca de vejez, correspondiente a una cuenca sedimentaria.

4.2.6 Ley de Bifurcación (Ley de Horton).

En la Tabla 10 se muestran los valores obtenidos del análisis.

ORDEN DEL CURSO	NO. DE SEGMENTOS Nu	Longitud se segmentos Lu
1	19	13750
2	11	6791
3	7	7807

Tabla 10: Jerarquización de la Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotés. (Ley de Horton).

El número de segmentos de órdenes sucesivamente inferiores de una cuenca dada, tiende a formar una progresión geométrica que comienza con el único segmento de orden más elevado y crece según una relación constante de bifurcación (Tabla 11).

orden	1	2	3
Nu	19	11	7
Rb	0.95	0.92	0.88

Tabla 11: Relación de bifurcación de la Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotos. (Ley de Horton).

4.2.7 Relación de Longitud (RL).

orden	1	2	3
Lu	13750	6791	7807
RL	1.000072727	1.000147254	1.00012809

Tabla 12: Relación de longitud de cauces de la Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotos. (Ley de Horton).

4.2.8 Densidad de Red de Drenaje.

$$D = Lu/A = 0.25$$

Este índice permite analizar la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca hidrográfica. Cuando es mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o mayor potencial de erosión. Para el caso de la Cuenca de Río Los Achiotos es bajo el potencial de erosión.

4.3 Generación de modelos con herramientas Hydrology

En la Figura 27 se muestra el DEM con el respectivo afluyente principal.

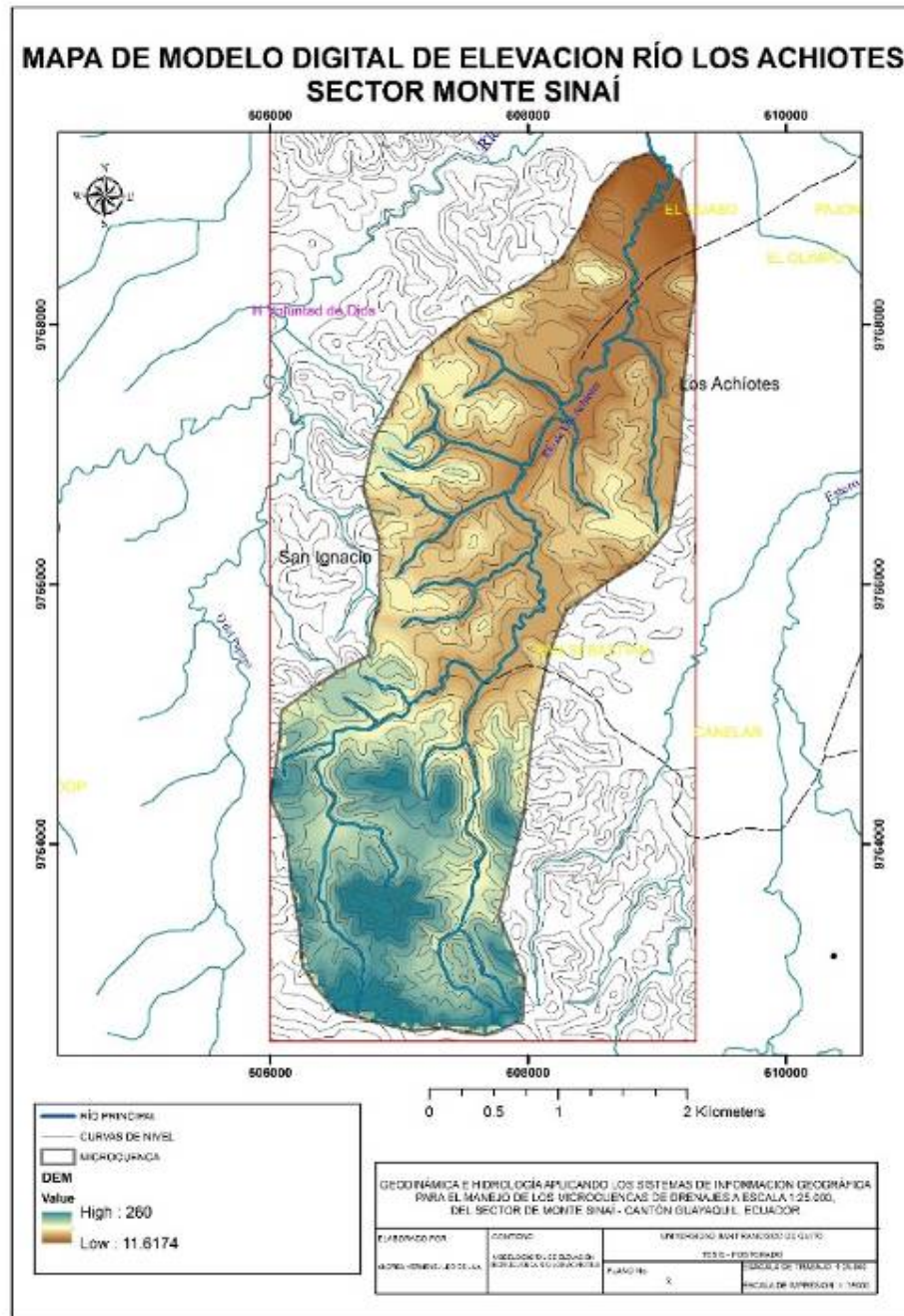


Figura27: Mapa de Modelo Digital de Elevación del sector Monte Sinai, Ecuador..

En la Figura 28 se muestra el Modelo de Dirección de flujos de la cuenca de Río Los Achiotos.

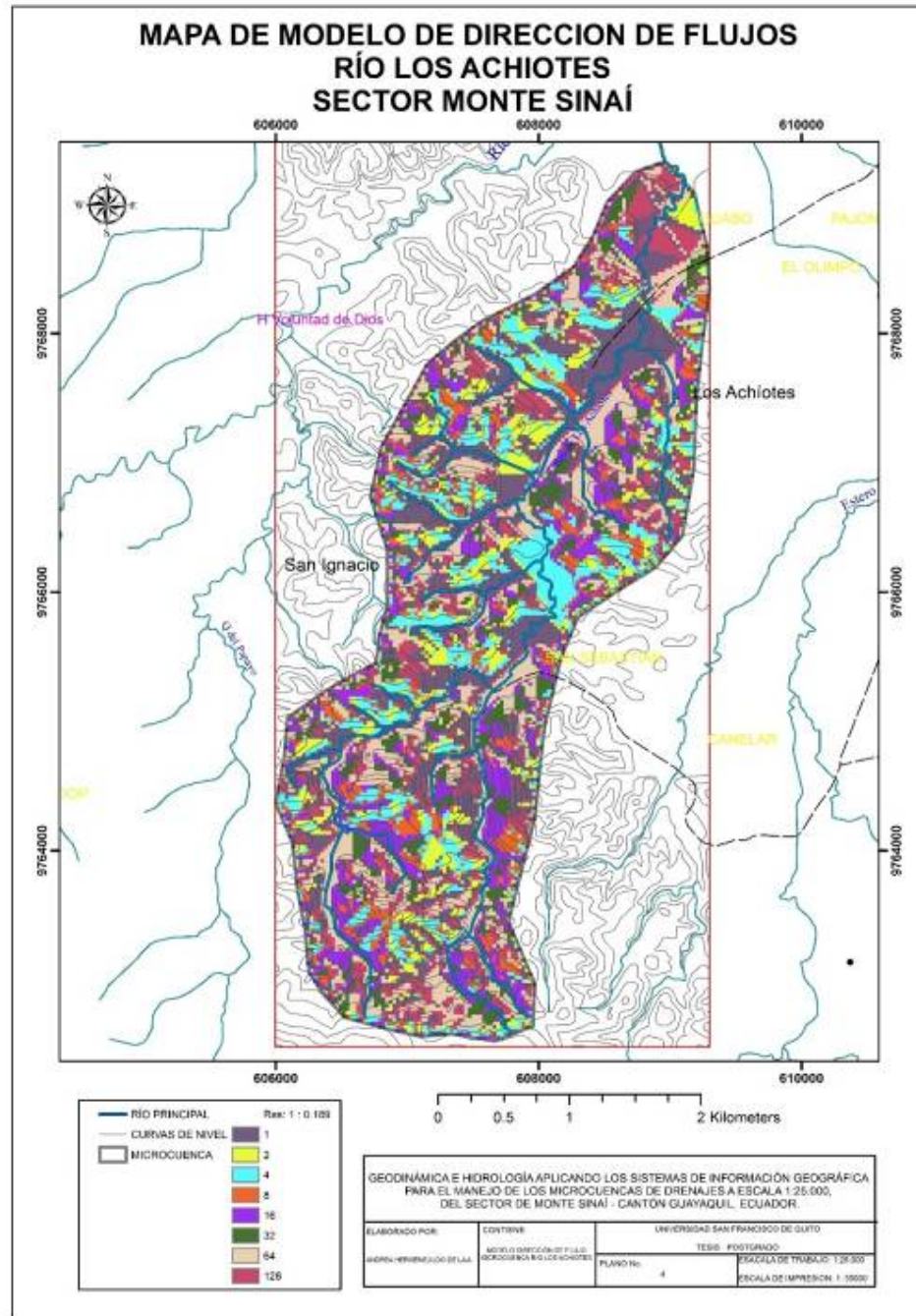


Figura28: Mapa de Modelo de Dirección de flujos del sector Monte Sinai, Ecuador..

En la Figura 29 se muestra el Modelo de Acumulación de flujos de la cuenca de Río Los Achiotos.

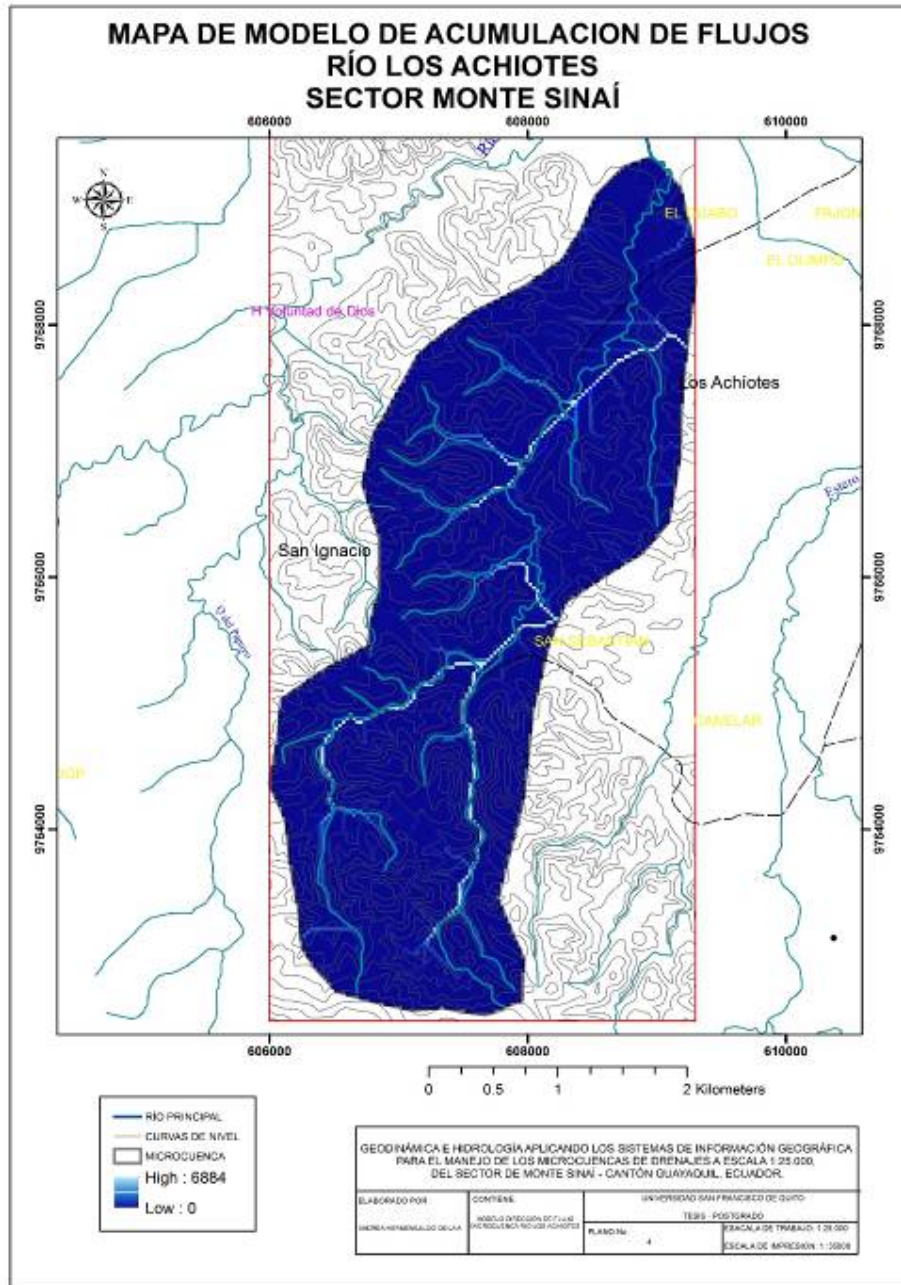


Figura29: Mapa de Modelo de Acumulación de flujos del sector Monte Sinai, Ecuador..

En la Figura 30 se muestra el resultado del método de jerarquización de Horton y Strahler, dando como resultado 19 afluentes de orden 1, 11 de orden 2 y 7 afluentes de orden 3.

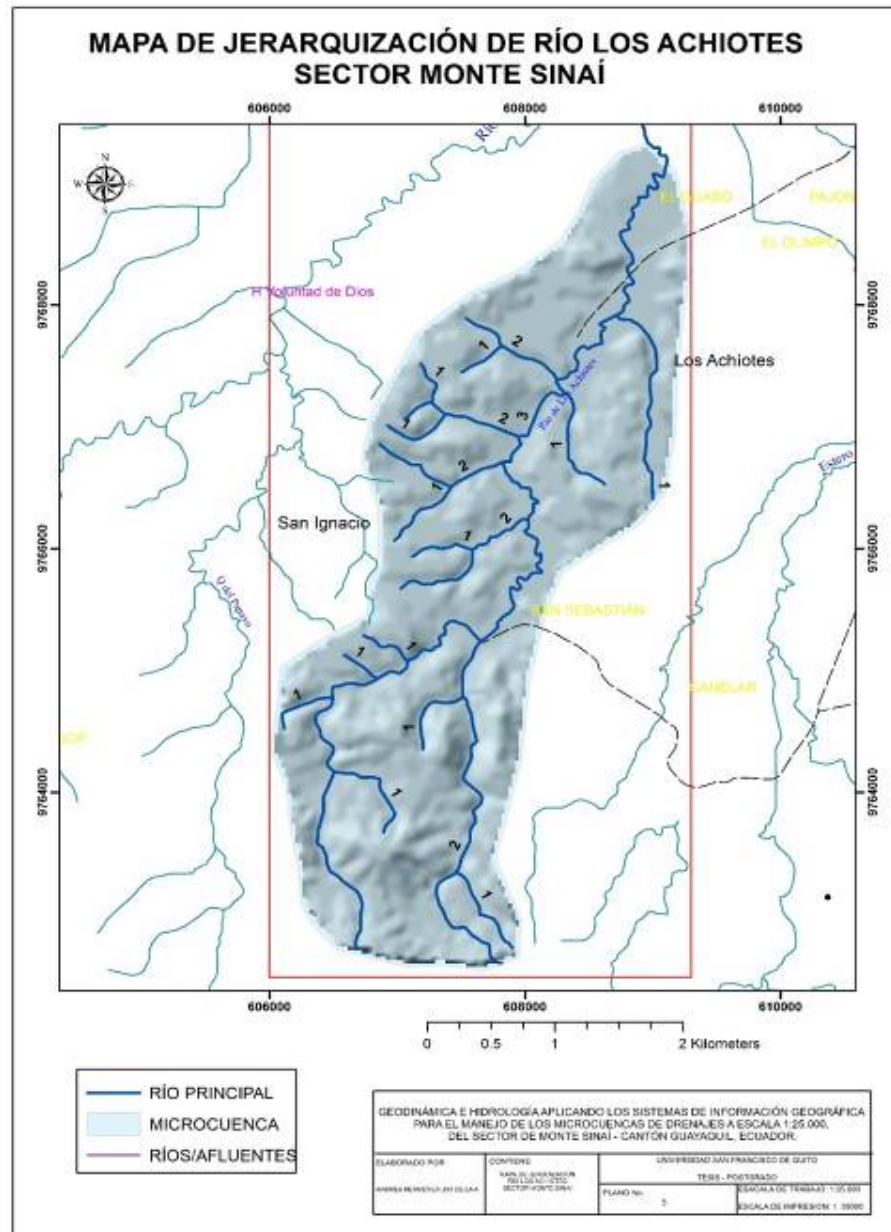


Figura30: Mapa de Jerarquización de Río Los Achiotos, del sector Monte Sinai, Ecuador.

En la Figura 31 se muestra el Mapa de Microcuencas de la cuenca de Río Los Achiotos.

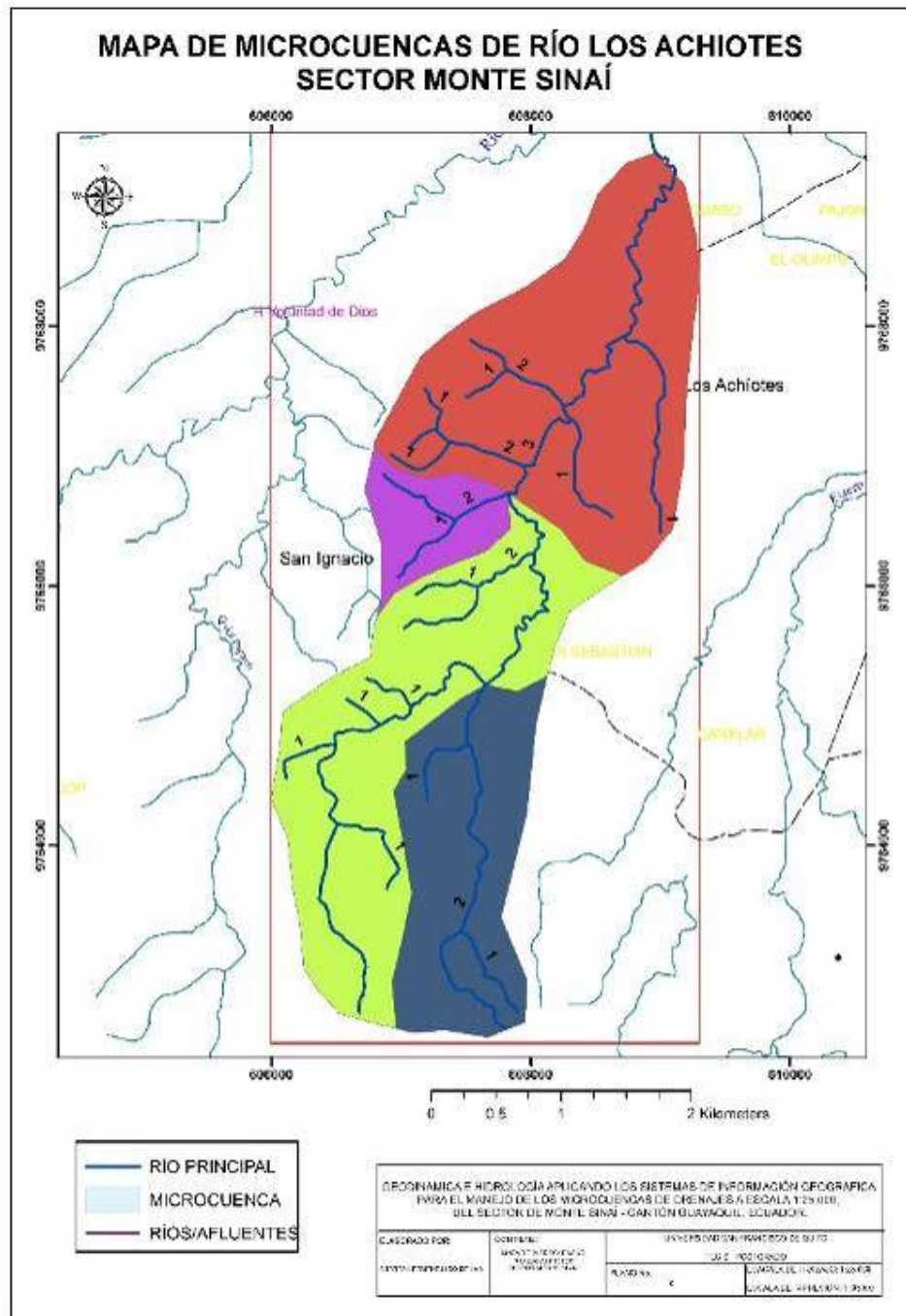


Figura31: Mapa de Microcuencas de Río Los Achiotos, del sector Monte Sinai, Ecuador..

4.4 Acumulación de Flujos, Saturación e Índice de Estabilidad

Para el respectivo análisis de acumulación de flujos se utilizó el programa Arcview 3.2, la extensión SINMAP, en donde se genera el modelo numérico de acumulación de flujos a través del ingreso de los parámetros geomecánicos de la roca, para esto debemos tener los datos del tipo de material (litología) de la zona, con la misma se determina también la zona de saturación de la cuenca. En donde se determina las zonas de recargas, transición y acumulación de flujos de agua, indicando la dirección de flujos hacia zonas planas que incrementa zonas de inundación por anegación (Figura 32 y 33).

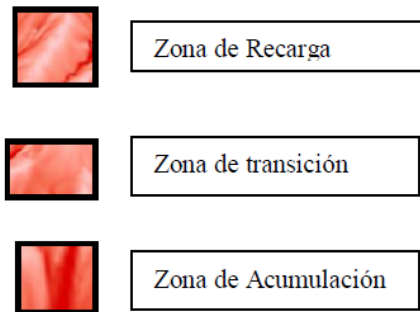


Figura32: Simbología de modelo de acumulación de flujos generado en SINMAP

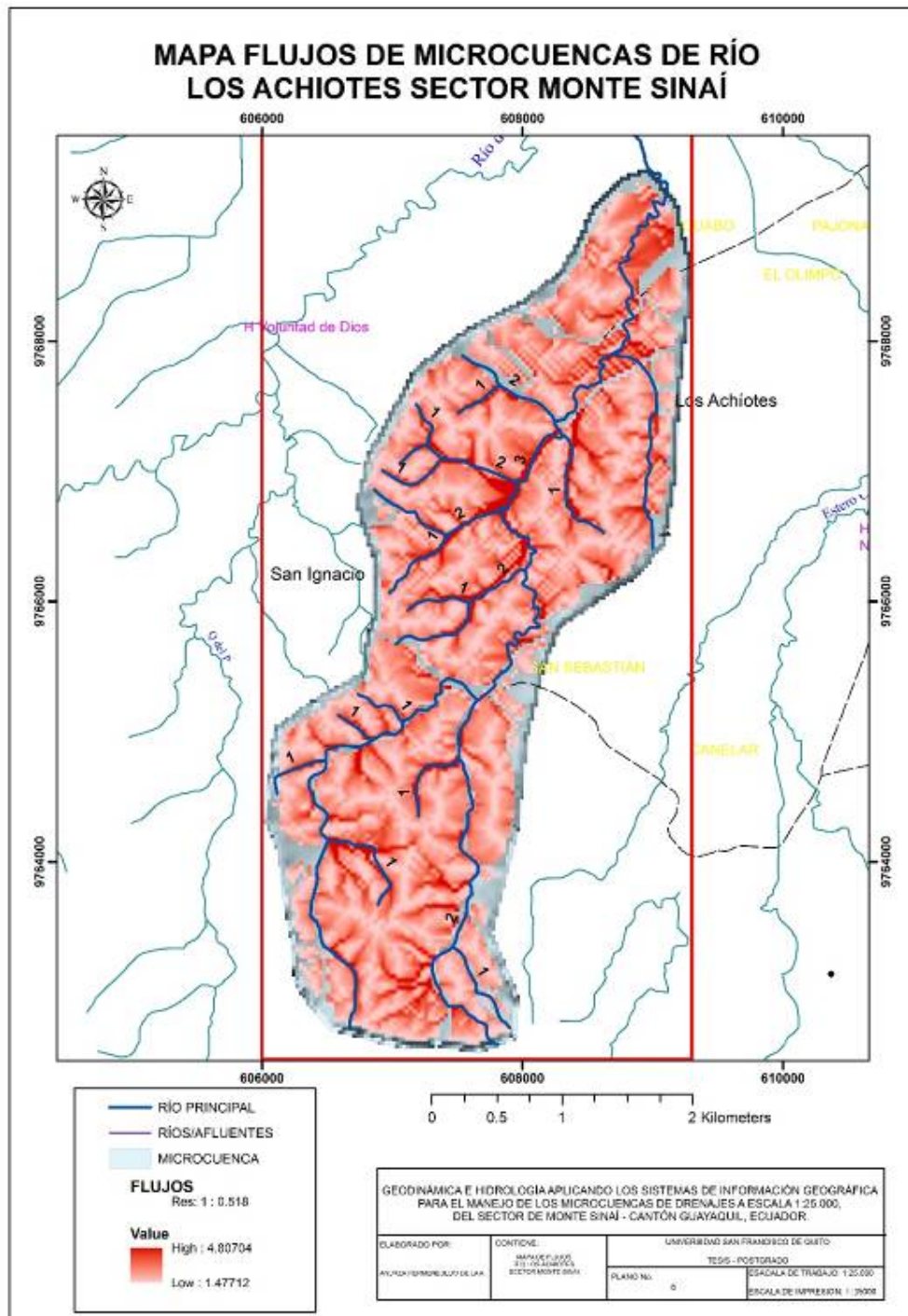


Figura33: Mapa de zonas de acumulación de flujos de la Microcuenca Hidrográfica del Río Los Achiotes.

En la Figura 34 se muestra el mapa de saturación del área sur de la cuenca de Ríos Los Achiotos.

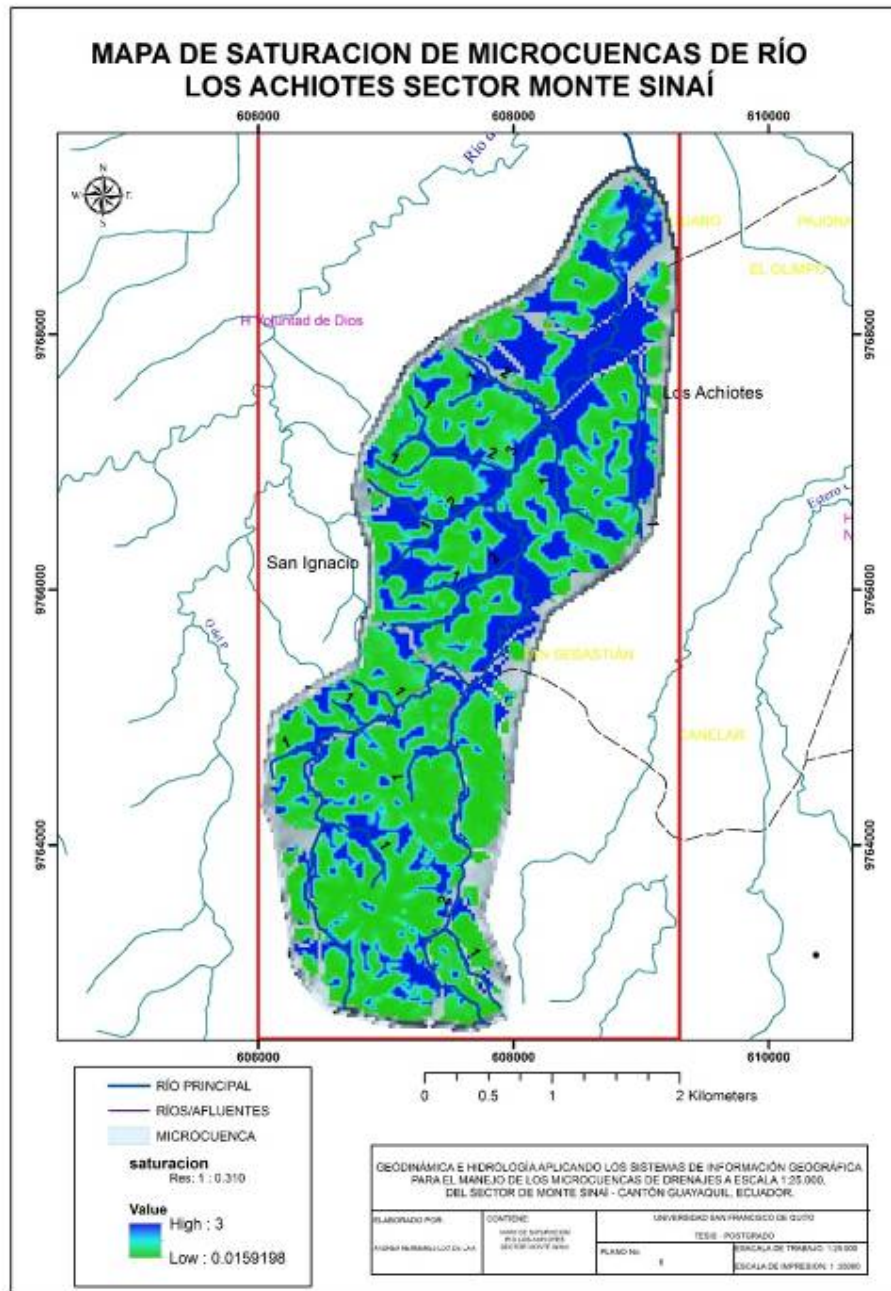


Figura34: Mapa de zonas de Saturación de flujos de la Micro Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotos.

En la Figura 35 se muestra el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, que el área sur de la cuenca de Ríos Los Achiotos.

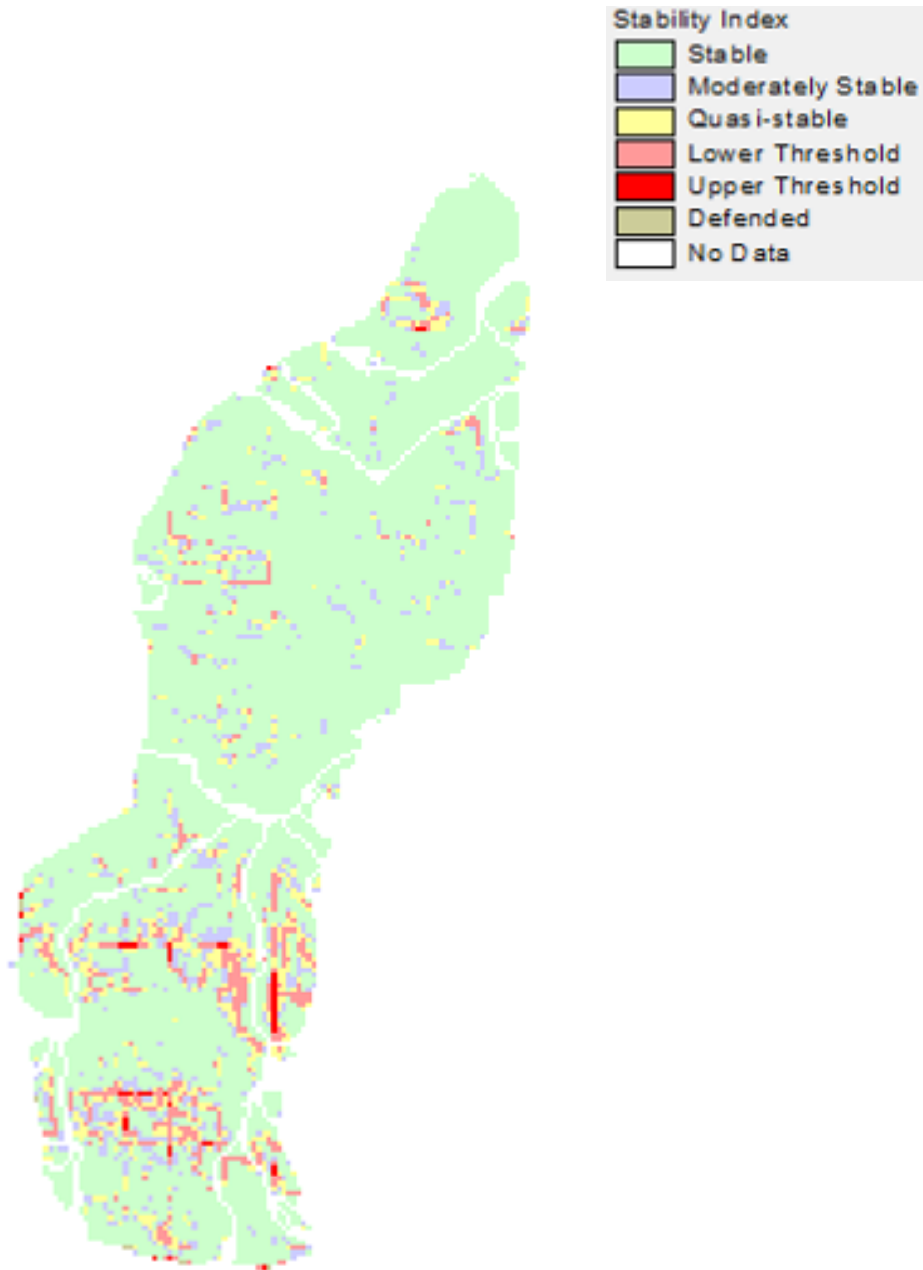


Figura35: Mapa de zonas de Índice de estabilidad de la Micro Cuenca Hidrográfica del Río Los Achiotes.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De la caracterización morfométrica de la microcuenca Hidrográfica de Río Los Achiotos del sector Monte Sinaí (Ecuador), los datos presentados en el Capítulo 4, que corresponde al perímetro y área dan un valor menor a 25 Km², que se consideraría una cuenca muy pequeña.

Estos datos sirvieron para la obtención del índice de Gravelius o coeficiente de capacidad con resultado de 1,40 encontrándose en la clase Kc2 de cuencas de formas oval redonda a oval oblonga, que son cuencas sedimentarias erosionadas.

La curva hipsométrica en Río Los Achiotos corresponde a un afluente maduro que según Sthaler indicando una zona de subsidencia erosiva.

La erosión siempre está ligada a la densidad de drenajes por lo que esta cuenca es erosionada, considerada una cuenca de valle. La carencia de una relación entre los parámetros físicos de una cuenca y las variables hidrogeológicas se debe a la diferencia entre las escalas de tiempo de los procesos dinámicos de la hidrología y a la geología.

A partir de relación de bifurcación, establece que el número de segmentos de órdenes son inferiores y tienden a formar una progresión geométrica que empieza del segmento de orden 3, en el caso de Río los Achiotos se comprueba que es una cuenca de valle erosiva.

La densidad de drenaje es alta que comprueba que es una cuenca potencialmente erosionada influenciada por la distintas unidades litológicas presentes en la zona de estudio.

Del análisis morfométrico de la cuenca y la red de drenaje se deduce que la rapidez en la concentración de las aguas se ve favorecida especialmente por las pendientes, ya que la cuenca se encuentra en una zona de baja pendientes con valores menores al 30% de inclinación. Por lo tanto se presentan crecidas de mayor peligrosidad debido a que facilitan la acumulación y concentración de las aguas.

El resultado de los modelos de SINMAP contienen índices de estabilidad que pueden ser utilizados para definir la potencialidad de un terreno a ser afectado por movimientos en masa empujados por flujos superficiales de la escorrentía.

Como se puede observar en los mapas en el capítulo 4 las zonas bajas o anegadas presentan mayor saturación, que con los valores bajos de altitud. Los ensayos de mecánica de suelos y laboratorio y la geofísica indican que hay 10 metros de material catalogado como semiroca y 5 metro como suelo rígido, por lo que se puede considerar como suelos permeables.

Según el modelo digital de elevación y los modelos de flujos de acumulación de agua superficial y saturación, el área de estudio se encuentra en una zona de saturación media que genera filtraciones y drenajes de flujo moderadas hacia la zona de acumulación.

Los análisis de los resultados del modelo de estabilidad de laderas revelan los sectores más vulnerables a deslizamientos traslacionales y rotacionales. Las zonas de mayor

peligrosidad se ubicaron en las riberas de los afluentes de Río Los Achiotes y en las zonas que no poseen coberturas vegetales que se encuentran las zonas de terrazas medianas a altas. Estos modelos son en base a datos de profundidad del suelo que nos indica la zona de fallamiento estructural presente y los tipos de movimientos rotacionales y traslacionales.

La metodología aplicada en este trabajo se asemeja a la metodología de Abril (2011) ya que en su modelamiento de análisis de estabilidad y áreas de susceptibilidad a deslizamientos identifica los sitios críticos a deslizarse mediante factores geomecánicos y físicos, cabe resaltar que el modelo no indica la distancia que recorrerá el movimiento de tierra, para esto se requiere otro tipo de análisis en las zonas bajas de pendiente inferior al 30% y en las desembocaduras de ríos.

6 CONCLUSIONES

La cuenca Hidrográfica de Río Los Achiotos, posee materiales permeables que tienen una capacidad alta de infiltración, alimentando los acuíferos y disminuyendo la tasa de escorrentía eso implica que hay una alta concentración de aguas en las zonas bajas y llanas. En la Figura 34 del modelo de saturación del área de estudio, indica la presencia de limos y arcillas propios de los suelos impermeables que originan escorrentías superficiales.

La densidad de drenaje se asocia con materiales impermeables, vegetación dispersa y relieve colinados, la misma que menciona que la cuenca tiene una baja capacidad de drenaje y alto potencial de erosión y un el volumen de recarga muy pobre.

El modelo de movimientos de tierra, depende más de la topografía del sector y de la geomorfología, maneja pendientes bajas y las características del material litológico para dar como resultado zonas de alta erosión.

Aunque aún falta investigación por realizar en la zona de estudio, esta metodología indica que las zonas sin cobertura vegetal en épocas de invierno (precipitaciones altas) origina movimientos de traslación de material, subiendo el nivel freático provocando movimientos de gran magnitud.

Con la finalidad de determinar las zonas en movimiento se deberían ubicar mojones o hitos en toda el área realizando lecturas con GPS diferencial enlazados a la red nacional del IGM con el fin de determinar movimientos en la zona.

Es importante también conocer que al tener un MDE con mayor resolución, como en el que se trabajó, se determinara una mejor delimitación de la cuenca hidrográfica.

La importancia de la herramienta permite identificar las zonas de riegos y en sectores donde se debe complementar con la generación de una legislación en donde se prohíba la construcción de viviendas o de algún otro tipo de infraestructura.

Las nuevas herramientas que provee la Geomática para la planificación territorial son importantes, pero este proceso debe ir acompañado de un levantamiento de información a detalle para una correcta toma de decisiones. La generación de ordenanzas en zonas en las que se ha restringido el uso de suelo debe ser aplicada y respetada por toda la población con esto impedimos la generación de riesgos mayores y precautelamos la integridad de la población.

Al ser el sector de Monte Sinaí una zona baja de la cuenca baja del río Guayas de la Llanura de inundación del Ecuador Occidental, las condiciones climatológicas en épocas de inviernos son adversas y se presentan con lluvias intensas, inundando los asentamientos de comunidades debido a la mala ubicación de las infraestructuras que no son tomadas con la debida seriedad y sin un debido estudio de amenaza y vulnerabilidad.

7 RECOMENDACIONES

La metodología es aplicada a inundaciones en zonas de anegación, ya que por desbordamiento de río se requiere datos de instrumentación tales como los pluviómetros.

Se recomienda obras de control de la escorrentía superficial con su debido mantenimiento, conservar la vegetación y/o re vegetar en zonas erosionadas para prevenir amenazas que pongan en riesgo zona pobladas.

Para los procesos constructivos de infraestructura en el área de estudio, se deberá realizar los debidos estudios geotécnicos y de suelo necesarios de acuerdo a la carga estructural. Además de contemplar el manejo adecuado de las redes de drenajes y aguas lluvias.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Abril, L. (2011). Estudio e implementación de un modelo para la zonificación de áreas susceptibles a deslizamiento mediante el uso de sistemas de información geográfica: caso de estudio sector Quimsacocha. Tesis de pregrado publicada, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Acaro, M. (2010). Determinación de zonas propensas a inundaciones y deslizamientos en el área urbana de Loja mediante utilización de Modelos Digitales de Terreno. Tesis de pregrado publicada. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.
- Benitez. (1995). Estudio Geologico de la Ciudad de Guayaquil. Proyecto de Microzonificacion de la ciudad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.
- Benitez. (1990). IEEA CONUEP. Guayaquil, Ecuador.
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (2011). Principles of geographical information Systems (Vol. 19988). Oxford University Press.
- Las lecciones de El Niño, C. A. F. (2000). Memorias del Fenómeno El Niño 1997-1998. Retos y propuestas para la región andina. Perú, Vol. V. Corporación Andina de Fomento, Caracas, Venezuela. Imp. Ex Libris.
- Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del Ciclo Hidrológico. 3ra. Reimpr. Univ. Aut. De.
- Dietrich, W. E., & Montgomery, D. R. (1998). Hillslopes, channels, and landscape scale. Scale dependence and scale invariance in hydrology, 30-60.
- Cordero Domínguez, I. R. (2013). Evaluación de la gestión territorial de la cuenca del río Paute, estrategias y líneas de acción para superarlas.
- Dourojeanni, A. (1994). La gestión del agua y las cuencas en América Latina. Revista de la CEPAL.

- Estado, R. O. (30 de Sept de 2010). Decreto Ejecutivo No. 486, art 18. Quito, Ecuador.
- Faustino, J. (2006). Gestión Integral de cuencas hidrográficas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. Documento PDF. Turrialba Costa Rica.
- Felicísimo Pérez, A. M. (1994). Modelos digitales del terreno: principios y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentalfa Ediciones.
- Fellenius, W. (1922). Statens Jarnvagens Geotekniska Kommission: Slubetankande. 1018.
- Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 103(ASCE 12919).
- Garcia, W. (2011). El Sistema Complejo de la Cuenca Hidrografica.
- Gravelius, H. (1914). *Flusskunde*. Goschen Verlagshan dlug Berlin. Zavoianu, I. (1985). *Morphometry of Drainage Bassins*. Ámsterdam, Elsevier. Rusia.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.
- Ilexaquifolium. (s.f.). *Complementos para la clase de ciencias*. Obtenido de <https://ilexaquifolium.files.wordpress.com/2011/02/ctm-tema31.pdf>
- Inegi. (s.f.). Instituto Nacional de Estyadistica y Geografia. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>
- i Porqueras, M. J. (1985). Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de geografía*, 19(1), 41-68.
- Koch, A., & Cabrera, P. (2012). Modulo Electivo: Estadística Espacial:lección 12:Interpolación determinista. UNIGIS. Ecuador.

- Lan, H. X., Zhou, C. H., Wang, L. J., Zhang, H. Y., & Li, R. H. (2004). Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering geology*, 76(1), 109-128.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general: Principios y aplicaciones*.
- Lopez, A., & Delgado, A. (2009). *Modelación hidrológica de la subcuenca Lempa Alto, en cooperación con la comisión trinacional del plan trifujo (el Salvador, Honduras, Guatemala)*. tesis para optar el grado de ingeniero civil. universidad de el Salvador. Facultad Multidisciplinaria de occidente departamento de Ingeniería y Arquitectura
- MAGAP. (2010). *Mapa de Hidrogeológico del Ecuador, Proyecto Preandino*.
- Martínez de Azagra, A., & Navarro Hevia, J. (1996). *Hidrología forestal, el ciclo hidrológico*.
- Monsalve, G. (2000). *Hidrología en la Ingeniería*. Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, Colombia, p. 382.
- Pack, R. T., Tarboton, D. G., & Goodwin, C. N. (1999). *SINMAP 2.0-A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, User's Manual*.
- Ponce Victor, M. (1994). *Engineering Hydrology. Principles and practices*. Prentice Hall.
- S.G.R. (2010). *Metodología para zonas propensas a inundaciones y movimientos en masa*. Ecuador.
- S.G.R. (2012). *Informe Técnico en base al Análisis de los modelos matemáticos sobre estabilidad del sector Monte Sinaí, Cantón Guayaquil*. Guayaquil.
- S.G.R. (30 de Septiembre de 2010). *Registro Oficial del reglamento a la ley de Seguridad Pública y del Estado*.

- Sánchez Fabre, M. (1990). Caracterización morfométrica de la cuenca del río Ebrón.(Provincia de Teruel y Rincón de Ademuz).I Reunión Nacional de Geomorfología, 509-520.
- SENPLADES, & SGR. (2009). Memorias del Taller Incorporación de la Gestion del Riesgo en los Procesos de Planificación Territorial.
- SENPLADES-CAF. (2005). Programa Regional Andino para la Reducción y Miigación de Riesgos, PLaN Estrategico para la Reducción del Riesgo en el Teritorio Ecuatoriano. Quito, Ecuador.
- Suárez Díaz, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Edición UIS, Bucaramanga. ISBN 958-33-0800-5.
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*,33(2), 309-319.
- Pack, R. T., Tarboton, D. G., & Goodwin, C. N. (1998, September). The SINMAP approach to terrain stability mapping. In 8th congress of the international association of engineering geology, Vancouver, British Columbia, Canada (Vol. 21, p. 25).
- Villegas, J. C. (2013). Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el departamento de Antioquia. *Revista EIA*, 1(1), 73-79.
- Villón, M. (2002). Hidrología, 436pp. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.