

# TESIS DOCTORAL



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



VNIVERSITAT  
D VALÈNCIA

## MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO Y AGUA EN LOS ANDES DEL SUR DE ECUADOR

**AUTOR:**

PABLO ALEJANDRO OCHOA CUEVA

**Directores:**

Artemi Cerdà

(Universitat de València, Departament de Geografia)

José Damián Ruiz Sinoga

(Universidad de Málaga, Departamento de Geografía)



Publicaciones y  
Divulgación Científica

AUTOR: Pablo Alejandro Ochoa Cueva  
 <http://orcid.org/0000-0003-2230-1026>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

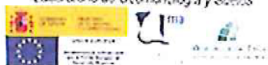
No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)



Laboratorio de Geomorfología y Suelos



Jose Damián Ruiz Sinoga, Catedrático de Geografía Física de la Universidad de Málaga, y Artemio Cerdá I Bolinches, Catedrático de Geografía Física de la Universidad de Valencia, directores del trabajo de investigación para acceder al grado de doctor realizado por D. Pablo Ochoa Cueva, y presentado en esta memoria bajo el título: "Manejo y conservación del suelo y agua en los Andes del sur de Ecuador",

INFORMAN:

Que la contribución recogida en esta memoria está fundamentada en unos antecedentes bibliográficos sólidos, a la vez que en unos resultados previos del grupo de trabajo que permitieron definir el ambicioso objetivo general de alcanzar una visión integradora del papel que los elementos bióticos y abióticos juegan en la dinámica funcional del sistema ecogeomorfológico en los Andes del sur de Ecuador.

Desde el punto de vista conceptual y metodológico, esta contribución integra elementos de la aproximación experimental de la Geomorfología Dinámica, que forma parte del grueso disciplinario de la Geografía Física, con especial énfasis en los sistemas suelo y agua.

El autor ha demostrado capacidad para moverse con fluidez en este marco, y la visión de conjunto obtenida saca a la luz algunas de las interacciones que determinan el flujo de agua en el continuo suelo-planta-atmosfera en este tipo de sistemas. El enfoque del trabajo se ha centrado especialmente en la caracterización y la dinámica funcional que el suelo y el agua juegan en ellos, comparando las respuestas que emergen de ellos cuando cambia el gradiente altitudinal.

El estudio realizado incluye trabajo de campo, trabajo de laboratorio y un sólido procesamiento y tratamiento estadístico de los datos obtenidos. El autor ha alcanzado un alto grado de independencia en todas estas facetas y ha mostrado iniciativa e independencia científica, sugiriendo hipótesis y aproximaciones experimentales alternativas para dar respuestas a los interrogantes y problemas que han ido surgiendo durante la fase experimental. El doctorando ha trabajado de forma independiente en la redacción y presentación de los resultados obtenidos en formato de publicación, tanto para congresos, cursos y publicaciones científicas internacionales.

Las conclusiones obtenidas están bien fundamentadas en los resultados y suponen en su conjunto, un paso adelante en el conocimiento funcional de estos sistemas ecogeomorfológicos y su respuesta a la variable altitud.

Por todo ello, el presente estudio, realizado por D. Pablo Ochoa Cueva, reúne condiciones más que suficientes para ser defendido en público como Tesis Doctoral.

En Málaga, a 25 de Octubre de 2015.

Fdo. Jose Damián Ruiz Sinoga

Fdo. Artemio Cerdá I Bolinches.





*A mi esposa Cristina,  
A mis hijos, mis padres y hermanos,  
Motivos de vida y de superación personal.*



## AGRADECIMIENTOS

Hace unos años atrás inicie este recorrido de experiencias en mis estudios del doctorado, que se han convertido en un continuo aprender, como dice la actual metodología de educación, “la persona debe prepararse para aprender toda la vida”.

Quiero agradecer a todas las personas que me han transmitido generosamente su experiencia, debo iniciar agradeciendo a mi Universidad y sus directivos quienes creyeron en mi para asumir este reto, y muy especialmente al Dr. Luís Miguel Romero (ex-Rector) de la Universidad Técnica Particular de Loja, quien nos motivaba continuamente con su mensaje y testimonio de vida a ser cada día mejores personas.

Así mismo mencionar a Pilar Montesinos y Juan Antonio Rodríguez quienes me dieron las pautas iniciales en la Universidad de Córdoba – España, en la que obtuve el Diploma de Estudios Avanzados.

Agradezco a José Damián Ruíz Sinoga quien me abrió las puertas del Departamento de Geografía y de la Universidad de Málaga para culminar este proceso doctoral, de igual forma al profesor Artemio Cerdà de la Universidad de Valencia, ambos confiaron en mí, y en el plan de investigación a desarrollar desde un país lejano como Ecuador.

También un especial agradecimiento a Andreas Fríes, que fue el tutor local de la investigación y a Jan Boll, ambos le dieron el plus requerido para que este trabajo pueda ser de interés para la comunidad científica internacional.

Esta tesis fue parcialmente financiada por proyectos de investigación INTRANET\_UTPL, AECID – PCI\_Iberoamérica (A/024199/09 y A/030571/10), y por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT, beca doctoral 2008-2).

Finalmente agradecer a mis colegas del Laboratorio de Suelos Agrícolas Juan Ignacio, Leticia, Daniel y Diego; por su apoyo diario, paciencia y ejemplo. Y a las personas e instituciones que fueron mencionadas en la sección de agradecimientos de los artículos científicos que forman parte de esta tesis. Sin duda existen muchas más que no han sido nombradas sin embargo han aportado con sus sugerencias, motivación y apoyo en campo o en gabinete, para que se haya podido dar este paso muy importante para mi vida personal y profesional.

A todos mis sinceros agradecimientos,

Pablo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	1
SUMMARY .....	3
CAPÍTULO I: .....	7
1.1. Introducción general .....	7
1.2. Objetivos.....	13
1.3. Bibliografía.....	14
CAPÍTULO II:.....	21
2.1. Descripción general del área de estudio .....	21
2.1.1. Escala local.....	25
2.1.2. Escala regional .....	32
2.2. Materiales y métodos.....	38
2.2.1. Estado de la cuestión.....	38
2.2.2. Generación de información de línea base para implementar el modelo .....	55
2.3. Bibliografía.....	67
CAPÍTULO III: .....	79
3. El papel de la cobertura vegetal en la generación de sedimentos y calidad de agua de los Andes Ecuatorianos. ....	79
Resumen.....	79
3.1. Introducción.....	80
3.2. Materiales y métodos .....	81
3.2.1. Área de estudio.....	81
3.2.2. Indicadores del Suelo .....	81

3.2.3. <i>Indicadores del agua</i> .....	83
3.3. Resultados y discusión.....	84
3.3.1. <i>Susceptibilidad a la erosión</i> .....	84
3.3.2. <i>Calidad del agua</i> .....	85
3.3.3. <i>Manejo de las cuencas</i> .....	88
3.4. Conclusiones.....	90
3.5. Agradecimientos.....	90
3.6. Referencias.....	90
CAPÍTULO IV:.....	95
4. Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the Andes of Southern Ecuador.....	95
Abstract.....	95
4.1. Introduction.....	96
4.2. Materials and methods.....	97
4.2.1. <i>Study area</i> .....	97
4.2.2. <i>RUSLE Model</i> .....	99
4.2.3. <i>Rainfall – Runoff R-Factor</i> .....	99
4.2.4. <i>Soil Descriptions: Field and Laboratory Analyses</i> .....	102
4.2.5. <i>K – Factor</i> .....	103
4.2.6. <i>L and S Factors</i> .....	103
4.2.7. <i>Land-Cover and C-Factor maps of 1976, 2008 and 2040</i> .....	104
4.2.8. <i>P – Factor</i> .....	106
4.3. Results and Discussion.....	107

4.3.1. <i>Erosivity Map Layer – MFI</i> .....	107
4.3.2. <i>Soil Erodibility and Slope Steepness Maps</i> .....	108
4.3.3. <i>Land-Cover Map Layer</i> .....	109
4.3.4. <i>Average Annual Soil Loss in Past, Present and Possible Future Scenarios.</i> .....	111
4.3.5. <i>Methodological limitations</i> .....	114
4.4. <i>Conclusions</i> .....	114
4.5. <i>Acknowledgements</i> .....	115
4.6. <i>References</i> .....	115
CAPÍTULO V: .....	123
5. <i>Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk of a semiarid basin of the Andes</i> .....	123
Abstract.....	123
5.1. <i>Introduction</i> .....	124
5.2. <i>Study area</i> .....	126
5.3. <i>Materials and methods</i> .....	129
5.3.1. <i>Rainfall erosivity</i> .....	130
5.3.2. <i>Soil erodibility</i> .....	133
5.3.3. <i>Topographic factor</i> .....	135
5.3.4. <i>Land cover factor</i> .....	135
5.4. <i>Results</i> .....	137
5.4.1. <i>Relations found between altitude, topography and climatic conditions</i> .....	137
5.4.2. <i>Soil erosion risk processes</i> .....	140



5.5. Discussion.....	144
5.6. Conclusions.....	149
5.7. Acknowledgments .....	151
5.8. References.....	151
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES .....	161
6.1. Discusión general .....	161
6.2. Conclusiones generales.....	171
6.3. Bibliografía.....	173
CAPÍTULO VII: ANEXOS .....	187
7.1. Hoja de campo (a), con su descripción (b) y fotografías del muestreo (c).....	188
7.2. Análisis estadísticos.....	191
7.3. Coordinador de fase de campo del muestreo de suelos.....	207
7.4. Protocolos de laboratorio de MOS y textura. ....	208
7.5. Informe del laboratorio de suelos agrícolas del proyecto PCI_Iberoamérica – AECID. ....	215
7.6. Proyecciones futuras en relación al manejo y conservación del suelo en el sur de Ecuador. ....	218
7.7. Información climática utilizada. ....	220

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Capítulo I. Introducción general</b> .....	
<b>Figura 1.1.</b> Depresión de los Andes en el Sur de Ecuador. ....	8
<b>Figura 1.2.</b> Vulnerabilidad a la erosión hídrica en los Andes y Ecuador .....	9
<b>Capítulo II. Materiales y métodos</b> .....	
<b>Figura 2.1.</b> Climo-secuencia Andina - área de estudio de la tesis .....	21
<b>Figura 2.2.</b> Análisis a escala local, de 7 cuencas abastecedoras de agua para la ciudad de Loja. ....	26
<b>Figura 2.3.</b> Esquema geológico de la cuenca de Loja. ....	27
<b>Figura 2.4.</b> (a) Mapa de la Cuenca Catamayo a escala regional, (b) Cuencas hidrográficas del Ecuador, (c) Cuencas tributarias de la Catamayo – Chira.....	32
<b>Figura 2.5.</b> Triángulo textural según la clasificación textural USDA .....	41
<b>Figura 2.6.</b> Movimiento del agua a través de texturas a) granular, b) bloques subangulares, c) prismática, d) laminar .....	46
<b>Figura 2.7.</b> Modelo conceptual de erosión de suelo en laderas .....	49
<b>Figura 2.8.</b> Representación esquemática de la erosión y depósito sobre superficies inclinadas .....	51
<b>Figura 2.9.</b> Mapa y esquema de muestreo del área local de estudio. ....	58
<b>Capítulo III. El papel de la cobertura vegetal en la generación de sedimentos y calidad de agua de los Andes Ecuatorianos</b> .....	
<b>Figura 3.1.</b> (a) Susceptibilidad a la erosión del suelo (b) deforestación de las cuencas de estudio; Loja - Ecuador.....	82
<b>Figura 3.2.</b> Densidad aparente del suelo en función del porcentaje de cobertura vegetal	

natural de las cuencas. .... 84

**Figura 3.3.** Indicador biológico de calidad de agua en función de la cobertura vegetal natural (a) y la densidad aparente del suelo (b). .... 86

**Figura 3.4.** Condición hidrológica de las cuencas de estudio en relación a cómo la cubierta vegetal protege el suelo. .... 87

**Figura 3.5.** Relación del MOS (%) con la altitud (m s.n.m.), en función de la cobertura vegetal. .... 88

**Capitulo IV. Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the Andes of Southern Ecuador** .....

**Figure 4.1.** Location of the Zamora Huayco watershed, Southern Ecuador. .... 98

**Figure 4.2.** (a) Average monthly precipitation between 2000 and 2009; (b) linear regression, correlation between rainfall amount (mm yr<sup>-1</sup>) and altitude (m). .... 100

**Figure 4.3.** Distribution of observed percent SOM in the study area. .... 104

**Figure 4.4.** (a) Spatial distribution of MFI; (b) spatial distribution of annual *R*-factor. .... 107

**Figure 4.5.** (a) Spatial distribution map of *K*-factor; (b) spatial distribution map of *LS*-factors. .... 108

**Figure 4.6.** Spatial distributions of land-cover maps of (a) 1976, (b) 2008 and (c) 2040. .... 110

**Figure 4.7.** Spatial distribution map of average annual soil loss for 1976, 2008 and 2040 in relationship with *C*-factor. .... 113

**Capítulo V. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk of a semiarid basin of the Andes** .....

**Figure 5.1.** Location of the Catamayo basin (a) natural breaks (elevation ranges), (b) altitudinal gradient of the southern highlands of Ecuador..... 127

Figure 5.2. Land cover map of the Catamayo basin..... 136

Figure 5.3. Monthly trend of soil erosion risk according to seasonal changes of the **C-factor**..... **137**

**Figure 5.4.** Annual air temperature in the study area. .... 138

**Figure 5.5.** Annual correlations between (a) air temperature and altitude, (b) rainfall and altitude. .... 139

**Figure 5.6.** (Left column) Spatial distribution of rainfall in mm a, c, e. (Right column)  $E_{i30}$ , for (b) March, (d) August, and erosivity (f) annual map ( $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$ ). ... 141

Figure 5.7. Soil erosion susceptibility map ( $K$ -factor + topographic factor); with decision rule..... 142

**Figure 5.8.** Soil erosion sensitivity maps (Susceptibility map +  $C$ -factor maps) for; (a) March, (b) August, and (c) average annual. .... 144

**Figure 5.9.** Soil erosion risk maps (susceptibility map + sensitivity maps + erosivity maps) for; (a) March, (b) August, and (c) average annual. .... 146

**INDICE DE TABLAS**

**Tabla 1.1.** Índices de presión de uso de la tierra, en relación con el manejo del suelo y agua en Sudamérica..... 11

**Tabla 2. 1.** Área de cuencas tributarias del sistema hidrográfico Catamayo-Chira (Figura 2.4.c). ..... 33

**Tabla 2.2.** Materiales finos y gruesos de acuerdo a diferentes sistemas de clasificación (Fuente: basado en Cobertera, 1993). ..... 39

**Tabla 2.3.** Clases de permeabilidad (USDA, 2000). ..... 47

**Tabla 2.4.** Clasificación de cuencas en relación con la superficie (INEFAN, 1995). ... 56

**Tabla 3.1.** Regla de decisión de la susceptibilidad a la erosión del suelo, los resultados se describen en la figura 3.1. .... 83

**Table 4.1.** General conditions of weather stations near the study area (based on 10-year average). ..... 101

**Table 4.2.** Maximum and minimum soil parameters (0–20 cm) of 38 points to calculate the *K*-factor. .... 102

**Table 4.3.** *C*-Factor values and relative proportion of the land-cover class for 1976, 2008 and 2040. .... 106

**Table 5.1.** General conditions of weather stations near the study area (based on 23-years average). ..... 130

**Table 5.2.** Averages monthly and annual of values of the *C*-factor according to the land cover types. .... 150

## RESUMEN

El manejo y la conservación de los recursos suelo y agua han sido y son motivo de gran preocupación para la sostenibilidad del Planeta en cuanto a la soberanía alimentaria y el desarrollo de la vida en general, esto se remarca en los países en vías de desarrollo que presentan fuertes contrastes, como lo es el Ecuador. Las limitaciones en la recolección de los datos climatológicos, de suelo, cobertura vegetal, entre otros; así como la aplicación de metodologías que se adapten a las realidades locales en cuanto a la medición de parámetros de calidad de agua y suelo, y la estimación de la erosión, motivaron el desarrollo de esta investigación; que inicialmente genera y analiza datos originales, estima con los modelos tradicionales el riesgo de pérdida de suelo, y propone un nuevo modelo para implementarlo en la región. Esto facilitaría la oferta de políticas o estrategias de manejo y conservación de los recursos naturales a diferentes escalas.

En el Capítulo I, se hace una introducción general al tema de la tesis en relación al área de estudio, con una revisión del estado de la cuestión con algunos datos de investigaciones previas para la región. Se plantea el estado actual y en relación a este se describe el fin y los objetivos de la investigación.

El Capítulo II, describe a detalle el área general de estudio y las zonas específicas, que por motivos de formato y limitaciones de espacio no pudieron ser incluidos en los artículos de los capítulos siguientes. También se describen los materiales y métodos que fueron requeridos para la generación de información de campo y laboratorio, durante el proceso de investigación y desarrollo de la tesis.

En el Capítulo III, se describen las primeras relaciones de la cobertura vegetal con algunos parámetros de suelo y agua. Este capítulo describe un acercamiento al tema

de investigación tanto de campo como de laboratorio a escala local (7 cuencas). El muestreo del suelo fue sistemático y el del agua uno en la estación seca y otro en la lluviosa. En este apartado se analiza únicamente la erodabilidad y topografía del suelo.

El Capítulo IV, estima el riesgo de erosión del suelo causado por el cambio de la cubierta vegetal en un ecosistema de bosque de neblina montano, este análisis es a escala local. Fue modelada para esta zona la Ecuación Universal de Perdida de Suelo Revisada (*RUSLE*), para entender cómo se desarrolla el proceso erosivo y estimar los posibles escenarios futuros si es que la dinámica del cambio de uso de suelo continuara al ritmo actual.

En el Capítulo V, se desarrolla el modelo a escala regional, en una cuenca semiárida con un fuerte gradiente altitudinal y pluviométrico. La cuenca representa un corte transversal del sistema montañoso de los Andes del sur de Ecuador. Aquí se observan grandes diferencias climáticas en distancias relativamente cortas, principalmente con la precipitación, estas diferencias son producto de una topografía accidentada. En este capítulo se propone una metodología con buenas posibilidades de ser utilizada para estimar el riesgo de la erosión del suelo, en regiones con datos escasos.

Finalmente, el Capítulo VI contiene la discusión general de la tesis, incluyendo las conclusiones más relevantes. Fue posible analizar la espacio-temporalidad de los procesos erosivos para dos ecosistemas de un gradiente altitudinal y pluviométrico de los Andes. Por lo tanto, consideramos este trabajo útil para emprender investigaciones a mayor detalle y a diferentes escalas de los procesos erosivos del suelo, y así ir entendiendo y midiendo la relación e influencia de los diferentes factores que intervienen en dichos procesos, para proponer alternativas fundamentadas en bien del manejo y conservación del recurso suelo.



## SUMMARY

The management and conservation of soil and water resources have been and are of great concern for the sustainability of the planet in terms of food sovereignty and for the development of life in general; this is more evident in developing countries where strong contrasts are present, which is the case of Ecuador. Limitations in collecting weather, soil, and vegetation cover data, among others; applying methodologies to suit local realities in terms of measuring the water and soil quality parameters; and the estimation of erosion were the motivating factors to carry out this research, which initially generates and analyzes raw data and estimates - with traditional models - soil loss and proposes a new model to be implemented in the region. This will allow to have proposals of management or conservation policies and strategies for natural resources at different scales.

In Chapter I, a general introduction of the thesis topic is done, which is related to the study area and includes a review of the state of the art; it also has data from previous research done in the region. Furthermore, the current status is aimed and based on it, the purpose and objectives of the research are described.

Chapter II describes in detail the general study area and the specific zones, which - because of format and space limitations - were not included in the articles of the next chapters. Moreover, the materials and methods that were required to gather the field and laboratory information - during the research process to carry out the thesis - are described.

In Chapter III, the first relations of the vegetation cover with some parameters of soil and water are described. This chapter also describes an approach towards the study

topic in regards to the field and laboratory research at a local scale (7 basins). The soil sampling was systemic and for the water sampling, one was taken in the dry and the other in the rainy season. In this regard, erodibility and soil topography were also analyzed.

Chapter IV includes the estimates of soil erosion risk caused by the change of the vegetation cover in an ecosystem of montane fog forest; this analysis is done at a local scale. The Universal Soil Loss Revised (RUSLE) equation was modeled for this zone to understand how the erosion process is developed and estimates possible future scenarios if the dynamics of change in land use continues at the current pace.

In Chapter V, a model at regional scale is developed in a semi-arid basin which has a strong altitudinal gradient and rainfall. The basin represents a cross section of the Andes mountain range in southern Ecuador. Here, great climatic differences over relatively short distances are observed, mainly related to precipitation; these differences are the result of a very steep sinuous topography. This chapter also proposes methodology with good possibilities of being used to estimate the risk of soil erosion in regions with limited data.

Finally, Chapter VI contains the general discussion of the thesis where the most relevant conclusions are included. It was possible to analyze the spatio-temporality of the erosive processes in two ecosystems with altitudinal gradient and rainfall in the Andes. Therefore, we consider this work useful to undertake research on the erosive processes of soil with more detail and at different scales and thus, being able to understand and measure the relationship and influence of the different factors that affect such processes to propose founded alternatives for the sake of the soil resource management and conservation.

**CAPÍTULO I:  
INTRODUCCIÓN GENERAL**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO Y AGUA EN  
LOS ANDES DEL SUR DE ECUADOR**



## CAPÍTULO I:

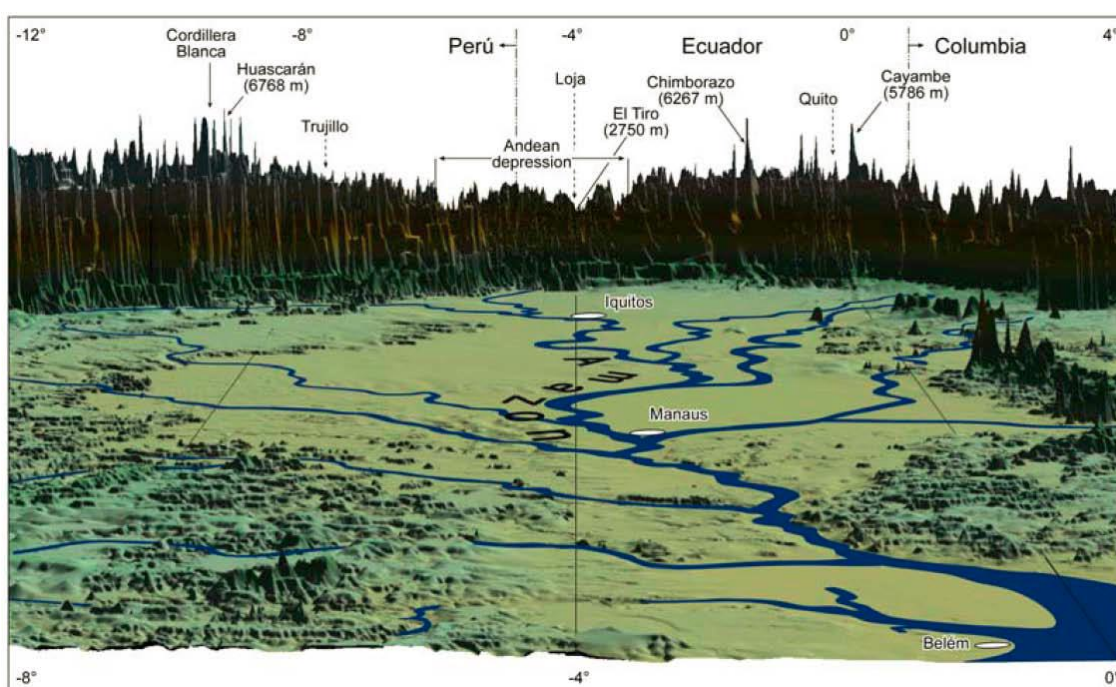
### 1.1. Introducción general

El tratado de los ciencias del suelo así como las relaciones con sus usos y específicamente el uso agrícola, son los campos de estudio inherentes a la Geografía física y humana respectivamente (Strahler y Strahler, 2006). Los estudios iniciales de las ciencias del suelo estaban enfocados únicamente en aspectos agronómicos y es desde 1980 que se ha intentado cambiar este enfoque a cuestiones ambientales más amplias (Hartemink, 2006; Brevik et al., 2015). El manejo sustentable de los recursos suelo – agua – planta, la incoherente y deficiente capacidad de administrarlos, la soberanía alimentaria, entre otros objetivos, constituyen ser hoy una preocupación global, regional y local, planteada por organizaciones mundiales como la ONU que en el año 2000 propuso los “Objetivos del Milenio” y los dos que afectan directamente a la relación que se estudia en este trabajo son: *“Erradicar la pobreza extrema y el hambre”* y *“Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”*.

Si bien la ONU formula directrices globales, no se han podido hasta la fecha concertar políticas locales o regionales para algunos países; a pesar de tener relativamente clara la problemática, p.ej. crisis de gestión, falta inclusión del funcionamiento ecosistémico, admisión de la relación suelo – agua – planta como temas centrales frente al cambio climático; y que estas políticas estén en corresponsabilidad entre el Estado y la sociedad en su conjunto.

A escala global muchos países que presentan elevada degradación de sus recursos se encuentran con fuertes condiciones climáticas, topográficas y antropológicas como población, economía y socio-cultural (Wilkinson y McElroy, 2007). En países Andinos como Ecuador, se encuentra una enorme diversidad de paisajes relacionados

con la cobertura vegetal y el uso del suelo; producto de las variaciones a distancias cortas de la topografía, clima, suelos, entre otros (Baquero et al., 2004; Pineda et al., 2013). La joven y aún en construcción zona montañosa de los Andes posee toda una gama de gradientes de inclinación y altitudes desde las tierras bajas (costas) hasta los 6000 m s.n.m (Figura 1.1). Con climas muy variados que van desde el tropical, subtropical hasta el frío en las zonas altas de montaña; y precipitación desde los 400mm hasta más de 4000mm anuales (De Koning et al., 1997; Emck, 2007).

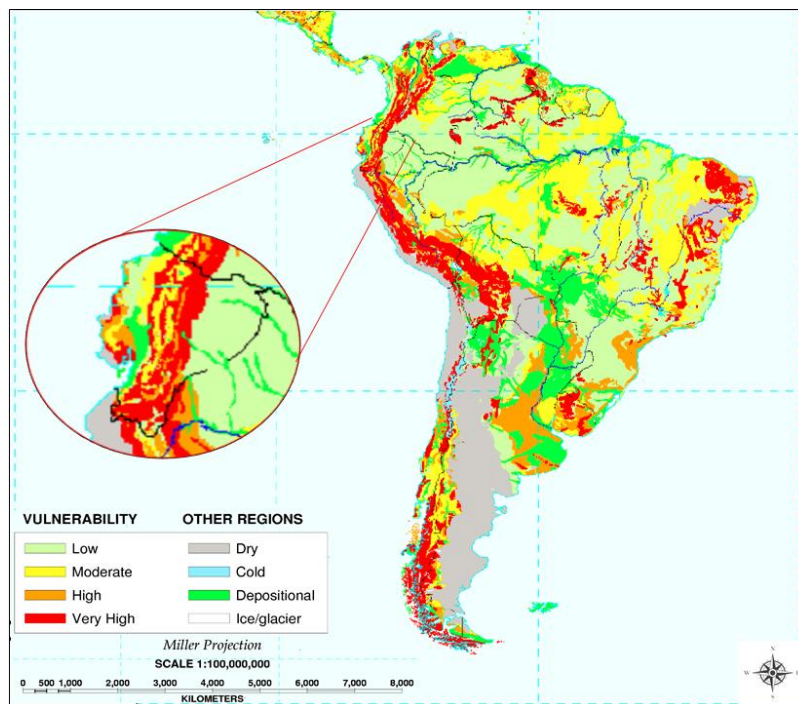


**Figura 1.1.** Depresión de los Andes en el Sur de Ecuador (Emck, 2007 en Fries, 2012).

La precipitación es el principal factor que produce la degradación del suelo, pero a su vez es el recurso agua es el que resulta mayormente afectado por dicha degradación porque disminuye su disponibilidad en calidad y cantidad; esto a escala de UPA's (Unidades de Producción Agropecuarias), localmente o a escala regional de grandes cuencas hidrográficas, consecuentemente su desabastecimiento para consumo agrícola, urbano o industrial (Pla, 2006).

La erosión hídrica es el resultado de la separación y el transporte de los

materiales del suelo por efecto erosivo del agua, que hoy en día se produce de forma natural como parte de la evolución geológica del paisaje o debido a la intervención de los seres humanos en el medio ambiente (Morgan, 2005). Este proceso geomorfológico continuo de degradación del suelo, ha sido poco estudiado en los Andes ecuatorianos (Harden, 1988; Vanacker et al., 2007; Tote et al., 2011). Probablemente porque en el Ecuador como en muchas regiones tropicales y sub-tropicales del mundo, los datos del suelo, cobertura vegetal y su manejo, recopilación de datos climáticos, entre otros; no están del todo disponibles (Figura 1.2). Esta es también una limitante de los Andes del sur de Ecuador para hacer análisis e implementación de modelos de erosión sobre el uso actual o potencial del suelo, así como también para proponer planes efectivos de control y manejo del suelo y agua. Favorablemente, algunos avances en teledetección (sensores remotos) y uso de los sistemas de información geográfica (SIG) vienen ayudando para disminuir esta deficiencia y poder proponer análisis y metodologías espacio-temporales con los escasos datos disponibles *in situ* (USDA, 2002; Ochoa et al., 2014).



**Figura 1.2.** Vulnerabilidad a la erosión hídrica en los Andes y Ecuador (USDA, 2002)



Según el criterio de expertos, mencionan una disminución en la geomorfología de la zona de estudio por los deslizamientos frecuentes que se observan en sus montañas, mismas que no superan los 4000m s.n.m en la región. Además de encontrarse en la depresión Andina de “Huancabamba”, misma que se conforma de una serie de ramales bajos de fuertes pendientes unidos por nudos, y que se alternan con valles secos aluviales que son característicos en el área general de estudio, ver Figuras 1.1 y 1.2.

En la historia del Ecuador, se han promulgado políticas como la denominada “Reforma Agraria” implementada desde la década de 1960 y finalizando en los 1990 (Southgate y Runge, 1990; Vanacker et al., 2003), con la que se adjudicaron aproximadamente 3 millones de hectáreas a colonizadores; probablemente esta reforma dio origen a procesos progresivos de deforestación, por lo que la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2011), ubica al Ecuador como el país con las tasas más altas de deforestación de Sudamérica para los periodos 1990-2000 con el 1.5% y para el 2001-2010 el 1.8%.

A pesar de lo expuesto el Ecuador está catalogado como uno de los países con mayor mega-diversidad del mundo, por su biodiversidad y endemismo en relación a su superficie (el 0.17% del total del Planeta); posee más del 11% de todas las especies de vertebrados terrestres, 16.087 especies de plantas vasculares y alrededor de 600 especies de peces marinos (Brehm et al., 2005; Werner et al., 2005; MAE, 2010). Sin embargo los ecosistemas del sur del Ecuador como el bosque húmedo tropical, bosque de neblina montano y bosque seco tropical; que hospedan gran parte de esta diversidad biológica están siendo fuertemente amenazados por la deforestación y cambio de uso del suelo (Nöske et al., 2008; Mosandl et al., 2008).

A más de la diversidad biológica y de ecosistemas, Ecuador también posee diversidad cultural con un entorno social complejo, lo que ha venido provocando

efectos directos en el uso de la tierra. Si bien ciertas comunidades conservan sus tradiciones ancestrales sobre un uso “sustentable” del suelo, otras comunidades son más oportunistas y utilizan el suelo de acuerdo a las necesidades económicas o políticas del momento (Castro et al., 2013; Knoke et al., 2014). Según Primack et al. (2001), los hábitats que antiguamente ocupaban grandes áreas continuas están siendo rápidamente divididos por caminos, cultivos, ciudades y/o una amplia gama de otras actividades antrópicas. La fragmentación del hábitat constituye una de las formas más comunes de degradación de los ecosistemas forestales en Latinoamérica. En el área de estudio, las prácticas agrícolas de roza y quema suelen ser las más comunes a la hora de extender la frontera agrícola (Bahr et al., 2013).

**Tabla 1.1.** Índices de presión de uso de la tierra, en relación con el manejo del suelo y agua en Sudamérica. **Fuente:** WRI, 2005.

	Tierras (ha.10 <sup>6</sup> )		Población		Usos de tierras (%)			
	Total	Agric.	hab./km <sup>2</sup>	Urbana %	Cultivos	1985 - 2005 (Riego)*	Pastos	Bosques
Argentina	273	27	14	90	8 - 13	5,4	58-52	13-12
Brasil	846	68	22	84	6 - 8	4,4	30-35	64-57
Chile	75	2,3	21	88	4 - 3	82	15-17	20-22
Colombia	104	4,2	44	77	5 - 4	21	39-40	46-44
<u>Ecuador</u>	28	3,1	<u>47</u>	63	<u>10 - 11</u>	<u>29</u>	22-36	59-39
Perú	128	4,2	22	75	3 - 4	28	18-21	56-50
Venezuela	88	3,5	30	88	4 - 4	17	35-42	61-54
<b>AMR. LAT.</b>	<b>2017</b>	<b>170</b>	<b>25</b>	<b>80</b>	<b>7 - 9</b>	<b>11,4</b>	<b>26-30</b>	<b>53-46</b>

\* Hace referencia al porcentaje bajo riego dentro del área destinada a cultivos.

La tabla (1.1) muestra al Ecuador con la tasa más alta de superficie cultivada que utiliza gran cantidad de recursos para el riego al igual que Perú, también describe la densidad poblacional como la más alta de Sudamérica, sin embargo esta información debería estar contrastada en relación con la superficie del país, porque este es uno de los

países más pequeños de Sudamérica territorialmente hablando (283.561 km<sup>2</sup>).

Otro fenómeno social en la región sur del Ecuador ha sido el “Boom” de las ONG’s (Organizaciones no gubernamentales) que se produjo entre la última década del siglo pasado y la primera del presente. Las múltiples “fundaciones” ofertaban considerable cooperación técnica y económica para la gestión de los recursos suelo, agua, bosques; sin embargo los programas y proyectos tenían baja proyección en el tiempo, además que eran carentes de información social e investigación de base, al mantener un “disocio” con la academia y/o gobiernos locales por lo que resultaron insostenibles en el tiempo y han ido desapareciendo.

Existen algunos modelos para estimar la erosión del suelo desarrollados en diferentes continentes, p.e., (RUSLE) Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (Renard et al., 1997), Estimación de Pérdida de Suelo Modelo para África Austral (modelo SLEMSA - Stocking, 1981), o el Modelo de Erosión del Suelo Europeo (EUROSEM - Morgan et al, 1998); todos han sido validados en zonas con condiciones diferentes a las de Sudamérica. Y, para aplicar estos modelos fuera de su zona de origen, se requieren datos de clima y suelo local como insumo adicional, y/o con características similares al sitio donde fueron validados; lo que ha dificultado la demostración a la comunidad para la valoración ambiental o para la creación de propuestas de manejo y conservación de los recursos suelo y agua para el área de estudio.

Por las razones antes presentadas se emprende con el análisis, estudio y propuesta metodológica de los procesos erosivos que pueda adaptarse al medio local y regional, de fácil aplicabilidad y que permita la implicación de la comunidad de forma integral para una propuesta futura efectiva de manejo de estos recursos naturales en el sur de Ecuador. A escala local el trabajo se lo desarrollo en el cantón Loja en siete

cuencas pequeñas que proveen de agua a la ciudad con un área de 59.1 km<sup>2</sup> y a escala regional en la cuenca hidrográfica Catamayo con un área de 4184 km<sup>2</sup> (Figura 2.2.).

## 1.2. Objetivos

En relación a la problemática descrita en la sección anterior y para alcanzar el fin que nos hemos propuesto en esta investigación que pretende inicialmente (i) Hacer una caracterización general del recurso suelo en el sur del Ecuador para identificar algunos parámetros que nos describan su estado actual; (ii) estimar el riesgo potencial del suelo a erosionarse presente o futuro para poder establecer propuestas de manejo; (iii) explicar la influencia de los factores que influyen en los procesos erosivos, en una climosecuencia de los Andes del sur del Ecuador (Figura 2.1); y (iv) contribuir con una propuesta metodológica para determinar la vulnerabilidad de los suelos a erosionarse en esta región u otras con características similares de datos limitados.

Por lo expuesto los objetivos de esta tesis se detallan a continuación:

- (i) *Evaluar la influencia de la cobertura vegetal en la calidad del suelo y el agua en cuencas abastecedoras de agua para el consumo a escala local (Ciudad de Loja).*
- (ii) *Estimar la erosión potencial del suelo causada por el cambio de la cobertura vegetal; análisis espacio-temporal con proyecciones futuras en una cuenca de bosque de neblina montano al sur del Ecuador.*
- (iii) *Determinar los efectos de la cubierta vegetal, la topografía y el clima en los procesos de erosión del suelo a escala regional en una cuenca semiárida de los Andes del Sur del Ecuador.*
- (iv) *Proponer una metodología para estimar el riesgo de erosión del suelo*

*para zonas con datos limitados.*

De acuerdo a los procedimientos descritos en este trabajo se podrá tener una herramienta para ser aplicable no solo en otras zonas del área de estudio sino para otras regiones con condiciones tropicales, montañosas y/o con datos limitados.

### **1.3. Bibliografía**

Baquero, F., et al., 2004. La Vegetación de los Andes del Ecuador. Memoria explicativa de los mapas de vegetación: potencial y remanentes a escala 1:250000 y del modelamiento predictivo con especies indicadoras. EcoCiencia CELSA CORPORACIÓN EcoPar/MAG SIGRAGO/CDC-Jatun Sacha/ División Geográfica-IGM, Quito. 56 pp.

Bahr, E., Hamer, U., Chamba, D., Makeschin, F., 2013. Different fertilizar types affected nitrogen and carbon cycling in eroded and colluvial soils of Southern Ecuador. *Agric. Sci.* 4, 19–32.

Brehm, G., Pitkin, L.M., Hilt, N., Fiedler, K., 2005. Montane Andean rain forests are a global diversity hotspot of geometrid moths. *J. Biogeogr.* 32, 1621–1627.

Brevik, E.C., et al., 2015. The interdisciplinary nature of *SOIL*, *SOIL*. 1, 117-129, DOI:10.5194/soil-1-117-2015.

Castro, L.M., Calvas, B., Hildebrandt, P., Knoke, T., 2013. Avoiding the loss of shade coffee plantations: How to derive conservation payments for risk-averse land-users. *Agrofor. Syst.* 87, 331–347.

De Koning, G.H.J., van de Kop, P.J., Fresco, L.O., 1997. Estimates of sub-national nutrient balances as sustainability indicators for agro-ecosystems in Ecuador. *Agric.*

- Ecosyst. Environ. 65, 12-139.
- Emck, P., 2007. A Climatology of South Ecuador. PhD Thesis, Univ. Erlangen. 275pp.
- FAO, 2011. State of The World's Forests 2011. Roma.
- Fries, A., 2012. Implementation of new methods for the regionalization of climate data. PhD Thesis, Univ. Marburg. 179pp.
- Harden, C., 1988. Mesoscale estimation of soil erosion in the Rio Ambato drainage, Ecuadorian Sierra. Mountain Research and Development. 8, 331-341.
- Hartemink, A.E. coordinator., 2006. The Future of Soil Science. Wageningen. IUSS.
- Knoke, T., et al., 2014. Afforestation or intense pasturing improve the ecological and economic value of abandoned tropical farmlands. Nat. Commun. 5, 5612.
- MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador), 2010. Reservas de Biosfera del Ecuador: lugares excepcionales. Quito, Ecuador.
- Morgan, R.P.C., et al., 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University.
- Morgan, R.P.C., 2005. Soil Erosion and Conservation, 3rd ed. Blackwell, Malden.
- Mosandl, R., Günter, S., Stimm, B., Weber, M., 2008. Ecuador suffers the highest deforestation rate in South America. In: Beck, E., Bendix, J., Kottke, I., Makeschin, F., Mosandl, R., (eds.), Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador. Ecological Studies **198**, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany. 37-40.
- Nöske, N., Hilt, N., Werner, F.A., Brehm, G., Fiedler, K., Sipman, H.J., et al., 2008. Disturbance effects on diversity of epiphytes and moths in a montane forest in Ecuador. Basic and Applied Ecology. 9, 4-12.
- Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., Willems, P., 2014. Evaluation of TRMM 3B42

- precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 3179–3193.
- Pineda, L., Ntegeka, V., Willems, P., 2013. Rainfall variability related to sea surface temperature anomalies in a Pacific–Andean basin into Ecuador and Peru. *Adv. Geosci.* 33, 53–62.
- Pla, I., 2006. Problemas de degradación de suelos en América Latina: Evaluación de causas y efectos. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo. Guayaquil, Ecuador.
- Primack, R., Rozzi, R., Feinsinger, P., Massardo, F., Dirzo, R., 2001. Fundamentos de conservación biológica. Perspectivas Latinoamericanas. 1era. Ed. México. Fondo de Cultura Económica. 797pp.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. USDA Agriculture Handbook, No. 703. 404pp.
- Southgate, D., y Runge C.F., 1990. The institutional origins of deforestation in Latin America. University of Minnesota, Department of Agriculture and Applied Economics Staff paper no P90-5 St Paul, MN: University of Minnesota.
- Stocking, M., 1981. A working model for the estimation of soil loss suitable for underdevelopment areas, Development Studies Occasional Paper No. 15, University of East Anglia, UK.
- Strahler, A.N., Strahler, A., 2006. *Introducing Physical Geography*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc. 728pp.
- Tote, C., et al., 2011. Effect of ENSO events on sediment production in a large coastal basin in northern Peru. *Earth Surf. Processes Landforms.* 36, 1776–1788.



- USDA, 2002. World map of water erosion vulnerability - (South America). 1:100.000.000. World soil resources, Soil Survey Division / Natural Resources Conservation Service / U.S. Department of Agriculture. Washington D.C.
- Vanacker, V., et al., 2003. The impact of environmental change on the intensity and spatial pattern of water erosion in a semi-arid mountainous Andean environment. *Catena*. 51, 329–347.
- Vanacker, V., et al., 2007. Restoring dense vegetation can slow mountain erosion to near natural benchmark levels. *Geology*. 35, 303-306.
- Werner, F.A., Homeier, J., Gradstein, S.R., 2005. Diversity of vascular epiphytes on isolated remnant trees in the montane forest belt of southern Ecuador. *Ecotropica*. 11, 21–40.
- Wilkinson, B.H. y McElroy, B.J., 2007. The impact of human on continental erosion and sedimentation. *GSA Bulletin*. 119, 140-156.
- World Resources Institute (WRI) in collaboration with United Nations Development Programme, and World Bank, 2005. *World Resources 2005: The Wealth of the Poor—Managing Ecosystems to Fight Poverty*. Washington, DC.







**CAPÍTULO II:  
MATERIALES Y MÉTODOS**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

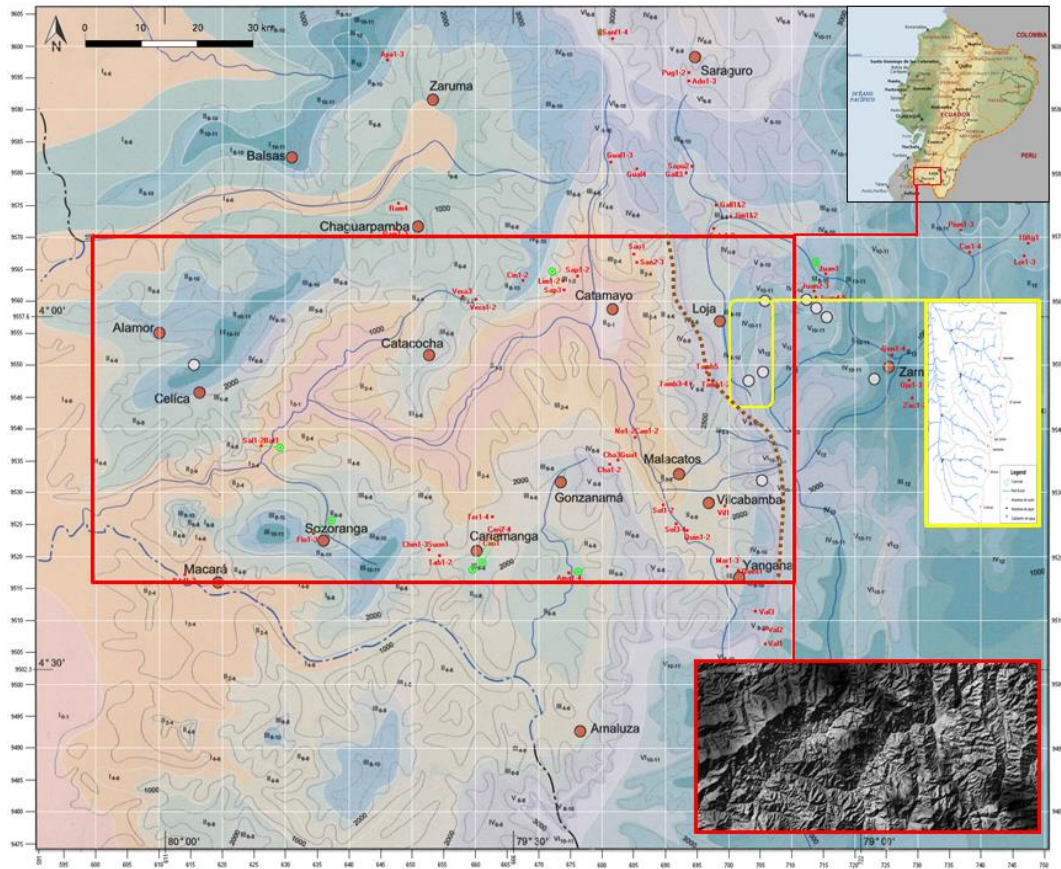
**MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO Y AGUA EN  
LOS ANDES DEL SUR DE ECUADOR**



## CAPÍTULO II:

### 2.1. Descripción general del área de estudio

El Ecuador se encuentra al norte de Sudamérica, ubicado en la zona tropical andina, ligada estrechamente con la latitud y longitud y el factor de radiación solar. Está atravesado de norte a sur por la cordillera de los Andes (690 km aprox., desde la frontera con Colombia al norte hasta sus límites con el Perú) y constantemente influenciado por las corrientes marinas (cálida de “El Niño” y fría de Humboldt); también por los vientos Alisios establecidos en la parte media y alta de la Tropósfera.



**Figura 2.1.** Climo-secuencia Andina - área de estudio de la tesis (Fuente: M. Richter, 2003).

La provincia de Loja es la más austral del Ecuador y una de las tres provincias con mayor amenaza de procesos erosivos (entre el 55 y 75% de su territorio) y riesgos

de desertificación y sequía (MAE, 2002). Los recursos naturales renovables de la provincia de Loja se encuentran en un estado de degradación muy avanzado, producto de la alteración de sus ecosistemas. La causa principal es la acción antrópica sobre el suelo, la cobertura vegetal y la calidad y cantidad del agua.

La figura 2.1, describe el área general de estudio, que se encuentra en la provincia de Loja que tiene una superficie aproximada de 10.790 km<sup>2</sup>, equivalente al 4% de toda la superficie del país. En el área general de estudio se observa una diversidad de climas en distancias cortas (40 km) desde el clima árido con cerca de 400mm/año, al hiper-húmedo con más de 4000mm/año (De Koning et al., 1997); esto producto de las condiciones geomorfológicas y climáticas descritas anteriormente para todo el país.

Los Andes ecuatorianos son la región más poblada del país, lo que causa mucha presión sobre los ecosistemas naturales. Sin embargo, se encuentra una flora única y rica en especies en una gran variedad de zonas de vida y ecosistemas determinados por su topografía inclinada y su gran rango altitudinal y latitudinal. En la provincia de Loja encontramos dos zonas de vida fuertemente amenazadas por deforestación y cambio de uso del suelo el Bosque de neblina montano y el Bosque seco tropical. La tala de la cobertura vegetal disminuye la capacidad de protección del bosque y afecta en las fases del ciclo hidrológico; también prácticas agrícolas como: el arado y riego por superficie en dirección de la pendiente, sobrepastoreo, quema de los residuos de las cosechas (rastros); con el propósito de tener más área para cultivos o para ganadería.

En términos generales la Geología de la provincia de Loja se conforma de: a) rocas metamórficas, localizadas al Noroeste y al Este de la provincia, constituyendo el basamento rocoso; estas rocas datan de la Era Paleozóica, b) rocas de origen magmático, efusivas y tipo Flysch de la era Cretácica, c) al este rocas de origen



sedimentario, que han rellenado las depresiones de Loja y Malacatos, de la era Terciaria, d) rocas volcano-sedimentarias, localizadas al noreste de la provincia de la era Cuaternaria; y, e) rocas de origen magmático intrusivas (granitos, granodioritas) que se localizan en toda la provincia y que han intruido a las rocas paleozóicas, cretácicas y terciarias (Kennerley y Almeida, 1975).

En la geomorfología de la provincia de Loja comprenden los Grandes Paisajes, que se han definido de acuerdo a su génesis, topografía, litología, hidrología, vegetación así como los procesos dinámicos que han modelado estas formas. En el área de estudio estos grandes paisajes de acuerdo a su origen son: Modelado Glacial, Estructural Fluvio-Erosional, Estructural Denudativo, y Fluvial Acumulativo.

- *Modelado Glacial.*- la parte alta de la Sierra o Páramo, posee sus características particulares, localizada arriba de los 3000m s.n.m. Se define la forma del relieve, labrado por la excavación de los glaciares, o construido por los depósitos ligados a ellos. Estas huellas bien marcadas producidas en el Pleistoceno indican que en esa época estuvieron cubiertos por glaciares y nieve.
- *Estructural Fluvio-Erosional.*- Este sistema montañoso estructural en el área de estudio muestra sus propias características; topográficamente forma parte de diversas ramificaciones montañosas influenciadas estructuralmente. En ésta área encontramos los siguientes ramales montañosos principales; la cordillera Real con dirección N-S, la cordillera de Chontacruz, que forma parte de nudo de Cajanuma, y encierra junto a la cordillera occidental (Villonaco) a la ciudad de Loja. Estas ramificaciones montañosas están entre los 2500m a 3600m s.n.m. presentando un relieve montañoso muy accidentado con pendientes dominantes entre el 30 y 50%. Se encuentra estructuralmente influenciado por fallas regionales y desarrollado en un clima desde frío a templado-húmedo, cubierto generalmente con una

vegetación densa, las formas agudas del relieve son relativamente jóvenes, el sistema hidrográfico desciende a la cuenca amazónica, formando cauces muy encajonados y estrechos en forma de “V” con gargantas profundas sin dar lugar a valles en la zona oriental. Procesos activos en forma de movimientos en masa y erosión definen este gran paisaje.

- *Estructural Denudativo.*- Corresponde a los sedimentos de la parte inferior de la vertiente occidental de la cordillera Real de los Andes en la cuenca de Loja; originados por procesos denudativos con sedimentos provenientes de la parte alta montañosa que rellenaron la cuenca de sedimentos fluviales y marinos en el Mioceno. Caracterizada por conglomerados, lutitas y limolitas, sus cotas oscilan entre los 2200m a 2800m s.n.m. La tectónica ocurrida allí brinda un paisaje plegado con cuevas monoclinales, pequeñas mesetas y pliegues, anticlinales y sinclinales. La dinámica exógena está relacionada al agua, originando terrazas de río y colinas alargadas con filos agudos moderadamente disectadas, con vertientes de pendientes de moderadamente escarpadas a muy escarpadas. La vegetación primaria es escasa y existe predominio de pastizales y cultivos.
- *Formas aluviales.*- este relieve se caracteriza por la formación de depósitos superficiales, por donde fluyen ríos ramificados. Los paisajes derivados de este gran paisaje son las terrazas y los valles aluviales.

Las cabeceras cantonales de la provincia carecen en su gran parte de un sistema adecuado de suministro de agua para consumo humano, incluso en algunas parroquias se abastecen mediante sistemas de agua tratada (Foto 2.1). Existen algunos proyectos del gobierno central o gobiernos locales destinados a atender a muchas de estas poblaciones. La capital provincial cuenta con un sistema moderno de potabilización de agua, sin embargo para el abastecimiento del sistema aún se construyen obras de

conducción desde una cuenca oriental para la ciudad de Loja.



**Foto 2.1.** Sistemas de abastecimiento de agua en parroquias de la provincia de Loja  
(Fuente: NCI-GCA, 2006).

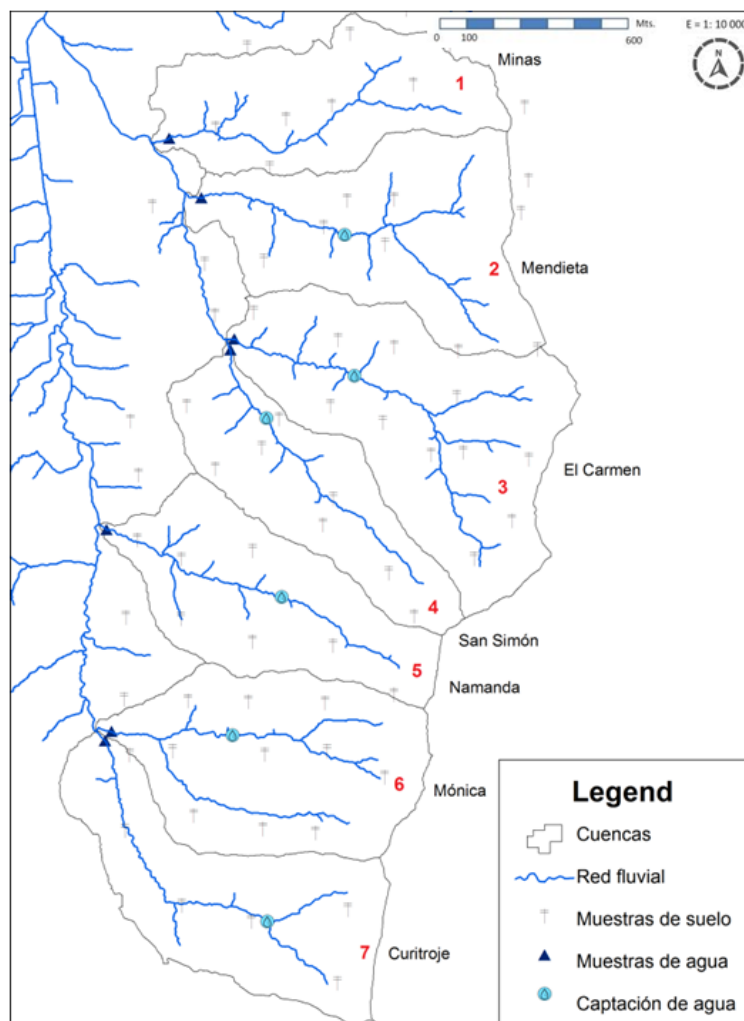
Los fuertes cambios en las temperaturas, así como la estacionalidad climática bien marcada (periodo seco y lluvioso) han favorecido a la meteorización de los diferentes tipos de rocas, por procesos físicos, químicos y/o biológicos. Las rocas meteorizadas presentan suelos de diferente coloración, p.e., amarillo, rojo, negro, gris claro y oscuro; dependiendo de los procesos de óxido - reducción o acumulación de materia orgánica. Estos suelos posteriormente son erosionados con presencia de escorrentía superficial, regueros, cárcavas, sobre todo tipo de formas de pendientes (rectas, cóncavas, convexas); para finalmente ser conducidos los sedimentos por los ríos hacia valles aluviales o represas en el país vecino.

Estudios a profundidad sobre el manejo y la conservación del suelo y agua a diferentes escalas espaciales y/o temporales son muy escasos en esta región.

### **2.1.1. Escala local**

A escala local nuestro estudio fue realizado al sureste de la ciudad de Loja, cantón y provincia del mismo nombre. La cuenca de la ciudad de Loja, tiene una forma elíptica alargada (dirección Norte-Sur con aproximadamente 25km), por el ancho (dirección Este-Oeste con 10km). El área urbana consolidada de la ciudad de Loja está

en el centro de la cuenca a una altitud de 2100m s.n.m. (Figura 2.2). Esta cuenca es constantemente humedecida y drenada por el río Zamora.



**Figura 2.2.** Análisis a escala local, de 7 cuencas abastecedoras de agua para la ciudad de Loja.

La cuenca alta del río Zamora la componen las siete cuencas hidrográficas (área local del estudio), que abastecen con más del 55% de agua para esta ciudad. Las cuencas se encuentran entre 3° 59' y 4° 06' Sur y entre los 79° 09' y 79° 12' Oeste. Sus límites geográficos son por el norte con la cuenca San Cayetano, al sur con el parteaguas de Cajanuma, al este con la Cordillera Real de los Andes (Oriental) y al oeste con la estribación occidental de la cuenca del Río Malacatos. El rango altitudinal

va desde los 2120 m hasta los 3420 m s.n.m. y cubren un área aproximada de 59.1 km<sup>2</sup> (Figura 2.2).

El clima es Templado Andino (Lluvioso), con un promedio de precipitación anual de 1000mm y una temperatura media anual oscila entre 15,3°C en el fondo del valle a 7,3°C en las cumbres de las montañas. La distribución de las lluvias del sitio de estudio es bimodal; la temporada de lluvias va desde Diciembre hasta Abril, siendo Agosto y Septiembre los meses más secos (Rollenbeck y Bendix, 2011).

La hidrografía de estas cuencas tiene su origen en los páramos del Parque Nacional Podocarpus (PNP), este parque fue establecido el 15 de Diciembre de 1982, mediante Acuerdo Ministerial de No. A-0398 del Instituto Ecuatoriano Forestal de Áreas Naturales y Vida Silvestre (INEFAN, 1995), y tiene un área aproximada de 1462,8 km<sup>2</sup>. El nombre del parque “Podocarpus” es debido a la presencia de la única conífera nativa de la zona andina, cuyo nombre científico es *Podocarpus spp.*, y que comúnmente se lo conoce como el árbol de Romerillo, que ha sido fuertemente extraído del área de estudio.

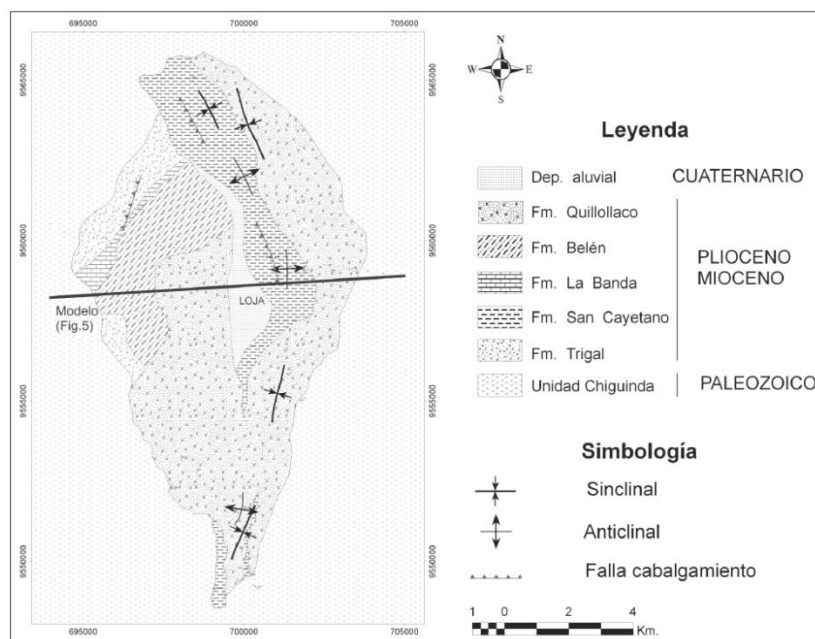
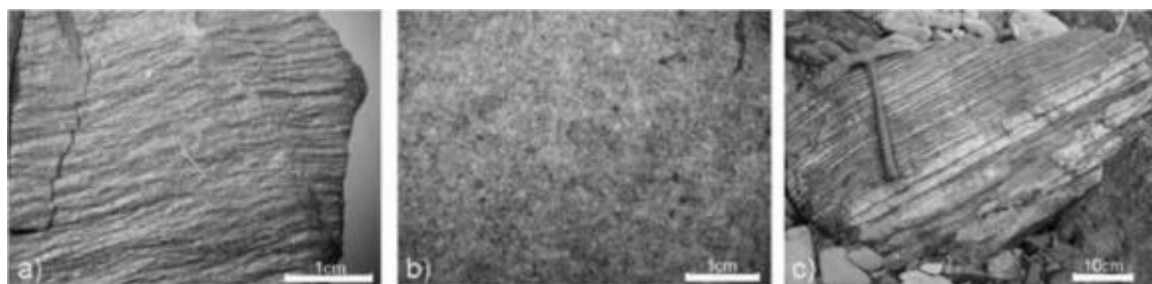


Figura 2.3. Esquema geológico de la cuenca de Loja (Galindo-Zaldívar et al., 2010).

Las cuencas de estudio, tienen una base geológica del batolito Zamora en la “Unidad Chiguinda”; esta, forma una franja de hasta 30 km de ancho en la parte sur de la Cordillera Real, y está flanqueada al este por la formación “Quillollaco” y al oeste por depósitos aluviales del cuaternario “Tres Lagunas” (Figura 2.3).

De acuerdo a Litherland et al. (1994), esta base litológica variable de rocas metamórficas bastante plegadas, es consecuencia del ciclo orogénico del Paleozoico, con lutitas conglomerados y areniscas superpuestas.



**Foto 2.2.** Rocas típicas de la Unidad Chiguinda: a) Filitas, b) Metalimonitas /piedra de areniscas c) Metalimonita en capas finas alternadas con filitas (**Fuente:** Haubrich Frank, en Burneo, 2013).

Estas rocas metamórficas son producto de formaciones sedimentarias antiguas que fueron sometidas a un metamorfismo regional que las transformo en pizarras, esquistos, cuarcitas y metacuarcitas (Foto 2.2). Es importante hacer esta descripción por la influencia que tiene el material parental en el desarrollo de los suelos, así como su nivel de nutrientes, como la posibilidad de que tendrían las plantas de absorber los mismos.

Los suelos que predominan en estas cuencas son Entisoles, gran grupo de los Troprothents, suborden Orthents ubicados desde la zona media a baja de las cuencas con formación coluvio-aluvial y en las unidades colinadas y de montaña predominan los Inceptisoles (MAG-PRONAREG-ORSTOM, 1984).

Las **zonas de vida** que encontramos en estas cuencas de acuerdo a la clasificación de Baquero et al. (2004), son: Páramo arbustivo (Pa), este tipo de



vegetación está conformado por arbustos, paja o hiervas de varios tipos (plantas en roseta y en las zonas más húmedas almohadillas) con temperaturas mínima y máxima de 8 y 17°C respectivamente y un rango altitudinal que va desde los 2000 hasta los 4000 m.s.n.m. (Foto 2.3. a). Bosque de Neblina Montano (Bnm) que se caracteriza por una alta presencia de musgo y epifitas con temperaturas mínima y máxima de 10 y 21°C respectivamente, y un rango altitudinal desde los 2000 hasta los 3500 m.s.n.m. (Foto 2.3. b). Bosque Siempre-verde Montano Alto (Bsvma), con características de vegetación similares a la anterior pero sus temperaturas mínima y máxima son de 17 y 27 °C respectivamente y el rango altitudinal esta entre los 2500 y 3500 m.s.n.m. (Foto 2.3. c).



**a)** *Páramo arbustivo (Pa)*



**b)** *Bosque de neblina montano (Bnm)*



c) *Bosque siempre verde montano alto (Bsvma)*

**Foto 2.3.** Zonas de vida del área de estudio a escala local (**Fuente:** El autor)

Estas zonas de vida representan a los tipos de cobertura vegetal natural de las cuencas de estudio, que se encuentran fuertemente alteradas por actividades antrópicas que son analizadas en los capítulos III y IV de la tesis. Las coberturas generadas por acción antrópica son ilustradas a continuación en la foto 2.4.



a) *Sucesión.-* refiere a las zonas de transición entre una cobertura natural y un uso antrópico (pastos o pino). En esta zona se han desarrollado especies “pioneras” como la *Llashipa (Pteridium sp.)* o *Chusquea sp.* Crecen con facilidad luego de una roza o incendio del bosque.



b) *Plantación de Pino (Pinus patula).* Una de las especies exóticas utilizadas para reforestar estas cuencas luego del fuerte proceso de deforestación que se produjo desde la década de 1950.





c) **Pastizales.-** *Kikuyo* (*Pennisetum* sp.), es el tipo de pasto que crece en esta área local de estudio. El uso pecuario predomina al agrícola, que solo se observa en las cuencas para el autoconsumo (minifundio).

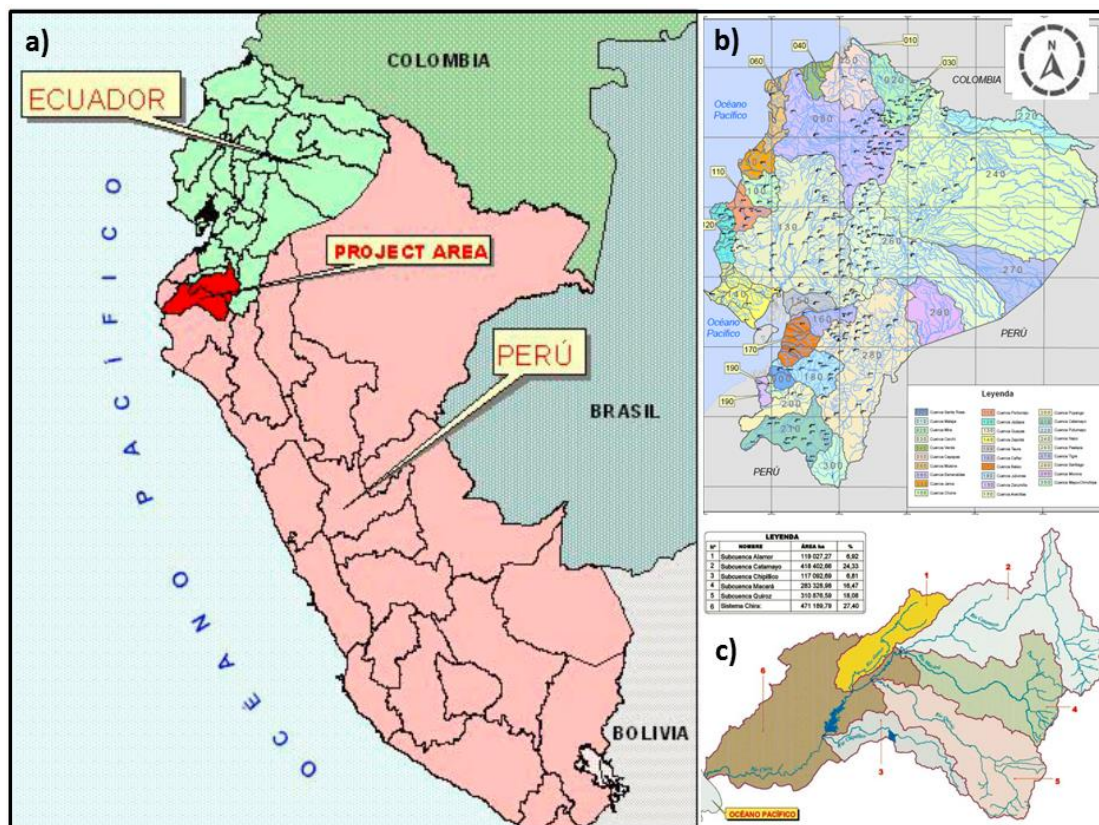
**Foto 2.4.** Coberturas antrópicas del suelo del área de estudio a escala local (**Fuente:** El autor)

Las actividades económico-productivas de los habitantes de estas cuencas son, ganadería en un 35%, agricultura 27%, construcción 11%, comercio 8% y actividades varias 19%. Siendo la ganadería y la agricultura las que predominan en las estas comunidades. El ganado bovino está destinado principalmente para la producción lechera; también se crían porcinos y aves en sitios puntuales de las cuencas, las familias que no se dedican a estas actividades son principalmente por falta de dinero (46%), por escaso asesoramiento técnico (19%), por falta de superficie de terreno (12%), y otras manifiestan que no tienen limitaciones ni desean implementar estas actividades (23%). En la producción agrícola existen policultivos o cultivos asociados de maíz, fréjol, papa, arveja, hortalizas varias y algunas frutas como el tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.) y el babaco (*Carica pentagona*) originarios de la zona. Esta producción en minifundios, es para consumo familiar, y cuando hay excedentes se los comercializa en los mercados de la ciudad (NCI-GCA, 2006).

La infraestructura con que cuentan algunas cuencas como la San Simón y El Carmen, son servicios de agua entubada, alumbrado público, luz eléctrica domiciliar, vías de tercer orden (lastradas), casa comunal, capilla, escuela pública y privada.

### 2.1.2. Escala regional

A escala regional el estudio fue desarrollado en la cuenca hidrográfica Catamayo, que está localizada entre los 3°39'S y 4°31'S (latitud), 79°05'W y 80°11'W (longitud) al centro de la provincia de Loja, sur de Ecuador, junto al límite con Perú (Figura 2.4).



**Figura 2.4.** (a) Mapa de la Cuenca Catamayo a escala regional, (b) Cuencas hidrográficas del Ecuador, (c) Cuencas tributarias de la Catamayo – Chira. **Fuente:** a) y c) Proyecto Catamayo-Chira, b) INAMHI - Estaciones meteorológicas por cuencas.

La cuenca Catamayo es la principal tributaria del sistema hidrográfico transfronterizo entre Ecuador y Perú, denominado Catamayo – Chira (Tabla 2.1); mismo que drena sus aguas en el Océano Pacífico (Tote et al., 2011). El promedio anual de flujo de agua del Río Catamayo es de 35m<sup>3</sup>/s, pero en época de estiaje podría disminuir a 22m<sup>3</sup>/s (Oñate-Valdivieso and Bosque, 2010). La cuenca, abastece de agua

para el consumo humano a la población del sur del Ecuador y norte del Perú, pero principalmente sus aguas son utilizadas para el riego en valles aluviales de la provincia de Loja en los que se produce principalmente caña de azúcar, maíz y arroz, y en menor proporción algunas frutas tropicales.

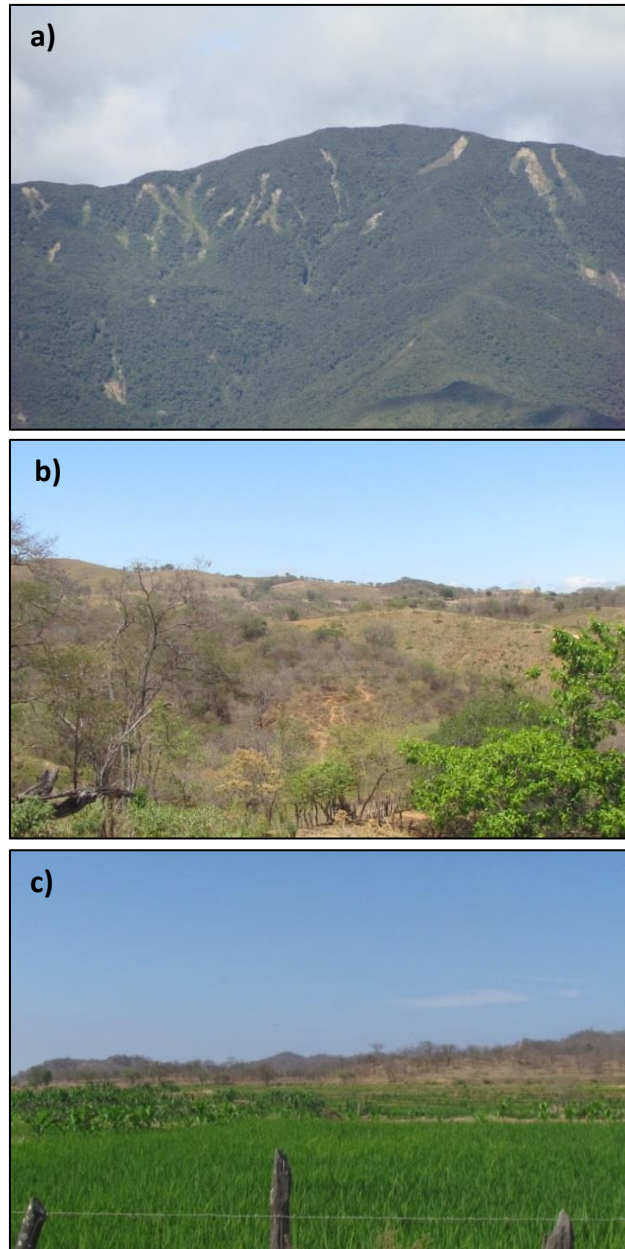
**Tabla 2.1.** Área de cuencas tributarias del sistema hidrográfico Catamayo-Chira (Figura 2.4.c).

Nombre	Área	
	(km <sup>2</sup> )	(%)
Cuenca Alamor	1190.27	6.92
Cuenca Catamayo	4184.26	24.61
Cuenca Chipillico	1170.92	6.81
Cuenca Macará	2833.29	16.47
Cuenca Quiróz	3108.76	18.08
Subsistema Chira	4511.89	26.53
Sistema Catamayo-Chira	17001.39	100

La geomorfología del área de estudio es bastante particular, hay un cambio brusco en la organización del paisaje. Lo que se venía observando desde la frontera con Colombia; es decir, las dos cordilleras bien diferenciadas Oriental y Occidental, desaparece por completo en la provincia de Loja desde su extremo Noroeste; sufren una gran depresión desde los Ríos León y Jubones, hasta la entrada del río San Lucas, que conduce hasta la ciudad de Loja. La cordillera Oriental o Real es la única línea continua de relieve en la prolongación a la del Centro-Norte del país. Sus rangos altitudinales para el área de estudio van desde los 2800m hasta los 3791m s.n.m., al Sur ya en las proximidades con el Perú. Mientras que las alturas del relieve occidental disminuyen en dirección oeste y noroeste, en principio esta disposición de formas es confusa con relieves sin orientación preferencial, separados por valles con cambios de dirección en su orientación (Winckell et al., 1997a). Se estima que entre los 900 y 3000m s.n.m. (10% territorio del país) crecen cerca de la mitad de todas las especies de plantas

ecuatorianas (Balslev, 1988, citado por Baquero et al., 2004).

A escala de paisaje el área regional de estudio describe principalmente relieves montañosos, colinados y ondulados (Foto 2.4).



**Foto 2.4.** Principales relieves del área de estudio (a) montañosos, (b) colinados, y c) ondulados (**Fuente:** El autor).

Los relieves montañosos se clasifican en un rango de pendiente mayor al 30% y representan el 60% del área total, esto es debido a la especial distribución de la cadena montañosa de los Andes en la provincia de Loja. Las áreas colinadas, con pendientes



que van desde 15% a 30%, estas áreas representan un 26%, principalmente en el oeste de la cuenca Catamayo, específicamente en parte del cantón Loja, Catamayo y el sector el Lucero. Finalmente la geomorfología ondulada que tendría pendientes desde 1 al 14%, representando pendientes planas e inclinadas; con un área aproximada del 14% del total del área de estudio (INERHI-PREDESUR-CONADE, 1994).

Los últimos procesos superficiales asociaron el escurrimiento difuso en capa y los aportes coluviales que provocaron, en las partes bajas, la acumulación de los depósitos arrancados a las vertientes, bajo forma de glaciares de esparcimiento a ambos lados de las arterias mayores (Foto 2.5). Restituyen una antigua topografía, más elevada de por lo menos unos 100 m por encima de la red hidrográfica actual.



**Foto 2.5.** Desprendimientos y depósitos coluvio-aluviales en la cuenca Catamayo (Fuente: El autor).

En el sur del Ecuador están las lavas más ácidas (riolítica y dacítica), de composición andesítica y riolítica en la cordillera occidental. Lo que ha favorecido el desarrollo de suelos fersialíticos (rojo-amarillentos) que se observan actualmente en muchas áreas de la zona de estudio; y más aún el principio de ferruginización que los afecta, manifiesta la existencia de estaciones climáticas alternadas bien marcadas, es decir con periodos secos y luego lluviosos.

La variedad de climas es una de las características de los Andes ecuatorianos. La temperatura tiene una fuerte relación con la altitud, y normalmente se presenta una

disminución aproximada de 0,6 °C por cada 100 m de ascenso. Las temperaturas medias anuales en el área de estudio van desde los 25°C, hasta los 7°C en las partes altas en altitudes superiores a los 3200m s.n.m.

En el ámbito socio - económico del área regional de estudio se practican tres sistemas de tecnología agrícola entre los cuáles tenemos: el tradicional, el tradicional mejorado y el semi-tecnificado. El calendario de cultivos cambia de una zona de producción a otra (por cantón); pero por lo general se enmarcan dentro de la época de inicio de la temporada de lluvias que empieza en noviembre, diciembre o enero y termina desde el mes de mayo y junio (estas variaciones dependen del año, en ocasiones se adelantan las lluvias, cuando eso sucede terminan así mismo antes).

Dentro de las prácticas pre-culturales del suelo está la preparación de la tierra, la práctica más generalizada es la roza y quema, en menor proporción el arado tirado por “yunta” (tracción animal) y para los valles y zonas planas utilizan máquina ya que la topografía del terreno así lo permite. Las prácticas culturales de deshierbas con herramientas manuales donde es muy común el uso de la mano de obra familiar, y dependerá de la extensión sembrada para que se contrate mano de obra externa, para esta actividad y para la cosecha.

La presencia de plagas y enfermedades a los cultivos es cada vez mayor por lo que los campesinos se ven obligados a utilizar agroquímicos para no perder la producción; en los cultivos semi-tecnificados como el maíz también se utilizan los agroquímicos para controlar las malas hierbas; y para la producción de maíz en las sitios de secano de la provincia de Loja, se utilizan técnicas de cultivo tradicionales. El arroz en Macará y la caña de azúcar el valle de Catamayo podríamos decir que son los únicos cultivos que se manejan con un sistema tecnificado, porque sus productores emplean tecnología contemporánea, uso de máquinas, sistema de riego, aplicación de fertilizantes, control

Fito-sanitario, entre otras (Erazo y Martínez, 2004).

En función a la superficie de cultivo y en relación con la temporada lluviosa de la cuenca, el maíz es el cultivo más importante; seguido de la caña de azúcar que está presente en algunos valles como Vilcabamba, Malacatos, Quinara y Catamayo; y finalmente el cultivo del arroz, el cual se encuentra en todas el cantón Macará y pequeñas zonas de Zapotillo (Proyecto Catamayo-Chira, 2005). La mayor contaminación de los suelos podríamos relacionarla con el uso de agroquímicos en las áreas agrícolas.

## 2.2. Materiales y métodos

Para describir este apartado se procederá a hacer una descripción general principalmente de los elementos en el ecosistema que están directamente relacionados con el abordaje de esta investigación. Iniciamos describiendo el estado de la cuestión y luego cómo se generó la información de línea base necesaria para la propuesta general de investigación y finalmente la construcción de la propuesta metodológica.

### 2.2.1. Estado de la cuestión

A pesar de que en cada capítulo de esta tesis se hace una descripción del estado de la cuestión, en función a las condiciones mismas de cada zona a investigar; y para no redundar se ha descrito en este apartado una pequeña introducción a los conceptos o principios básicos y algunos modelos para estimar la erosión hídrica en el suelo, así como el proceso del muestro in situ (trabajo de campo), así como el tratamiento de las muestras en el laboratorio.

#### *El Suelo*

Según Plaster (2009), el suelo es un conjunto de cuerpos naturales de la superficie terrestre que contienen materia viva, capaz de soportar el crecimiento de las plantas. Jordán (2006), lo considera como un sistema disperso de tres fases (sólida, líquida y gaseosa). Sullivan (2007), lo describe con cuatro componentes básicos: minerales, aire, agua y materia orgánica. En un suelo típico los minerales representan alrededor de 45% del volumen total, el agua y aire cerca de 25% del espacio poroso cada uno; estas proporciones de agua y aire están en constante variación, y la materia orgánica entre 2% y 5%.



### Características físico-químicas del suelo relacionadas con la Erodabilidad.

- **La textura del suelo;** hace referencia a la composición granulométrica de la fracción mineral del suelo. La textura del suelo determina la proporción de tres tamaños de partículas de suelo: arena, limo y arcilla; considerada propiedad fundamental porque influye sobre las otras propiedades edáficas como: capacidad de retención hídrica y conductividad hidráulica (Jordán, 2006), cantidad de agua disponible para las plantas, infiltración y circulación del agua, laboreo, erosión hídrica o almacenamiento de nutrientes (Porta et al., 1999). El tamaño de la partícula afecta a dos importantes características del suelo: a la superficie interna y al número y tamaño de los espacios de poros.

**Tabla 2.2.** Materiales finos y gruesos de acuerdo a diferentes sistemas de clasificación (Fuente: basado en Cobertera, 1993).

Dimensión de la partícula elemental (mm)	Attemberg – (Sistema Internacional)	U.S. Dep. De Agricultura	Ex – U.R.S.S.
<0,001	Arcilla	Arcilla	Arcilla
<0,002			Limo fino
0,005	Limo	Limo	Limo medio
0,01			Limo grueso
0,02			Arena muy fina
0,05	Arena fina	Arena fina	Arena fina
0,1		Arena fina	Arena media
0,25		Arena gruesa	Arena gruesa
0,2		Arena muy gruesa	Arena gruesa
0,5	Arena gruesa	Arena gruesa	Arena gruesa
1,0		Arena muy gruesa	Arena gruesa
2,0	Grava fina	Grava fina	Grava
3,0		Grava	Grava
5,0		Grava	Grava
10,0	Grava gruesa y piedras	Grava gruesa y piedras	Grava gruesa y piedras
20,0		Grava gruesa y piedras	Grava gruesa y piedras
>20,0		Grava gruesa y piedras	Grava gruesa y piedras

**La superficie interna de un suelo,** es el total de la superficie de todas las partículas

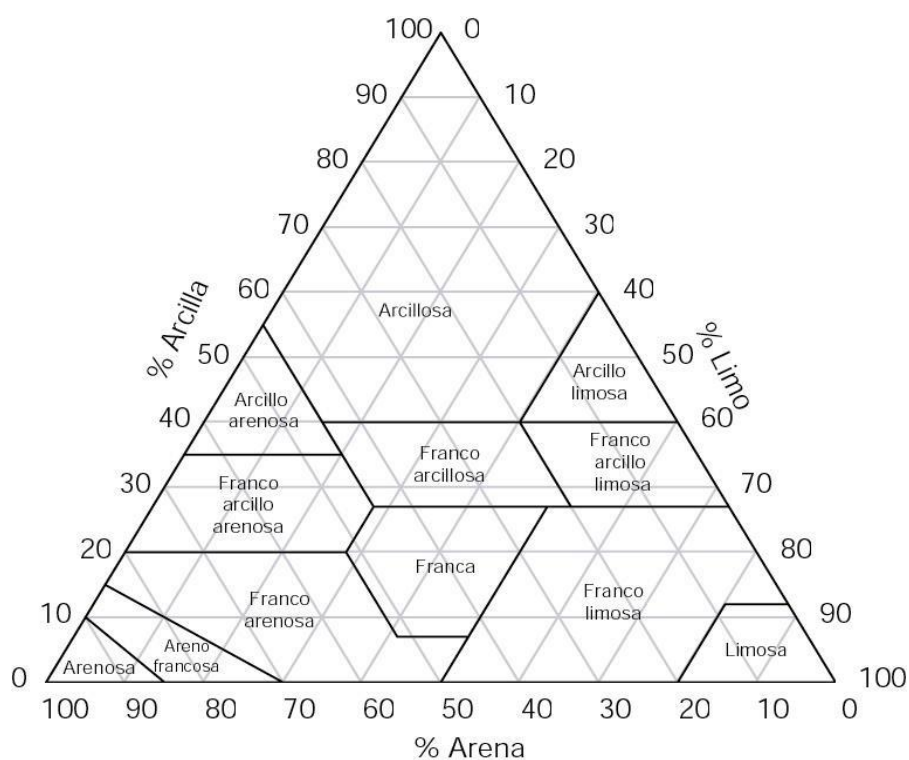
en el suelo; y es importante porque las reacciones ocurren en la superficie de las partículas del suelo. Debido a que los suelos con partículas más pequeñas (como limo y arcilla) tienen la superficie interna más grande, retienen mayor capacidad de retener humedad. Ruiz-Sinoga et al. (2011), puso de manifiesto la importancia de la textura en la disponibilidad de agua para la vegetación en un gradiente pluviométrico; en sitios más lluviosos, al ser el suelo más arcilloso el agua estaba retenida con más fuerza y, paradójicamente, había menos agua disponible para las plantas que en los sitios menos lluviosos, donde la textura era más arenosa.

**El tamaño y el número de los poros**, también dependen del tamaño de las partículas; es así que el agua se escurre más rápidamente a través de poros grandes llamados macro-poros o poros de aireación; mientras que los poros pequeños o micro-poros tienden a retener el agua. Ambos tamaños de poros son importantes, debido a que el comportamiento de un suelo resulta de la acción combinada de las diferentes fracciones texturales que interaccionan entre sí, y la materia orgánica.

**Fracciones del suelo**; las partículas minerales se dividen en grupos de tamaño llamados fracciones del suelo y define tres grandes clases: arena, limo y arcilla. **La arena**, la fracción de suelo más grande (2.00 a 0.02 mm de diámetro), está compuesta principalmente de granos de cuarzo meteorizados. Los granos individuales de arena son de forma irregular y son perceptibles a simple vista, excepto los más finos. **El limo**, es la fracción de suelo de tamaño medio (0.02 a 0.002 mm); las partículas de limo son irregulares también, pero suaves como el polvo al tacto (similar al talco). De todas las fracciones, el limo tiene la mejor capacidad para retener grandes cantidades de agua en el suelo en una forma que pueda ser usada por las plantas. **La arcilla**, es la fracción de suelo más pequeña (< 0.002 mm de diámetro) como una lámina de cristal; la arcilla es una fracción coloidal resultado de

reacciones químicas entre minerales meteorizados para formar partículas diminutas de nuevos minerales clasificadas en arcillas amorfas y cristalinas (Jordán, 2006).

Los suelos arenosos, tienen una baja adhesividad y plasticidad, con alta permeabilidad pero baja capacidad de retención de agua, al tener inactividad química presentan poca capacidad de almacenamiento de nutrientes. Los suelos limosos presentan una fertilidad física deficiente con escasa capacidad de retención de iones por tanto bajo almacenamiento de nutrientes. Tienen alto riesgo de sellado superficial y erodabilidad; pero baja infiltración, permeabilidad e inestabilidad estructural. Mientras, los suelos arcillosos tienen una alta capacidad de retención de iones con alta fertilidad química (según su mineralogía); alta capacidad de retención de agua, plasticidad y adhesividad, pero baja permeabilidad y dificultad para la penetración de las raíces (Porta *et al.*, 1999). En partículas más pequeñas, el suelo tiene mayor capacidad de retener agua y nutrientes.



**Figura 2.5.** Triángulo textural según la clasificación textural de la USDA (2000).

**Clasificación textural del suelo;** los suelos normalmente están formados por más de una fracción de suelo; las tres fracciones se encuentran todas en la mayoría de los suelos, La proporción exacta o el porcentaje de las tres fracciones se llama textura del suelo. Las doce clases de textura se muestran en el triángulo textural de suelo propuesto por la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos).

- a. **Los suelos del grupo arenoso,** son ásperos al tacto, no forman cintas sino terrones cuando secos, que se desmenuzan fácilmente con el más ligera movimiento. Las clases de este grupo son: *Arenoso*, que tienen entre 85 y 100% de arena, 0 y 15% de limo y de 0 a 10% de arcilla. *Arenoso franco*, que tienen de 70 a 85% de arena, 0 a 30% de limo y 0 a 15% de arcilla. *Franco arenoso*, que tienen de 44 a 85% de arena, 0 a 50% de limo y 0 a 20% de arcilla.
- b. **Los suelos del grupo mediano,** se sienten ligeramente suaves con el suelo húmedo, se forman cintas cortas cuando se presiona entre el índice y el pulgar, dando una superficie rizada; estos suelos secos se desmenuzan con mayor trabajo. Las clases de este grupo son: *Limoso*, que tienen de 0 a 20% de arena, 80 a 100% de limo y 0 a 12% de arcilla. *Franco limoso*, que tienen de 0 a 52% de arena, 50 a 88% de limo y 0 a 27% de arcilla. *Franco*, que tienen de 23 a 52% de arena, 28 a 50% de limo y 7 a 28% de arcilla. *Franco arcillo arenoso*, que tienen de 45 a 100% de arena, 0 a 28% de limo y 20 a 35% de arcilla.
- c. **Los suelos del grupo arcilloso,** son altamente plásticos y adhesivos cuando húmedos, si se presionan entre el índice y pulgar forman una cinta delgada de más de 2cm. Cuando secos forman terrones que difícilmente se rompen. Las clases de este grupo son: *Arcilloso*, que tiene de 0 a 45% de arena, 0 a 40% de limo y 40 a 100%. *Arcillo limoso*, que tiene de 0 a 20% de arena, 40 a 60% de

limo y 40 a 60% de arcilla. *Franco arcilloso*, que tiene de 10 a 45% de arena, 15 a 52% de limo y 27 a 40 % de arcilla. *Franco arcillo limoso*, que tiene de 0 a 20% de arena, 40 a 73% de limo y 27 a 40% de arcilla. *Arcillo arenoso*, que tiene de 45 a 65% de arena, 0 a 20% de limo y 35 a 55% de arcilla (USDA, 1975).

- **La materia orgánica del suelo (MOS).** Representa del 95 al 99% del peso total de los seres vivos, pero su presencia en suelos agrícolas suele ser escasa y en contadas zonas superar el 2% (Navarro et al., 1995). Jordán (2006), manifiesta que esta proporción de la MOS, puede ser muy variable dependiendo del momento del año; en suelos agrícolas de acuerdo a la fenología del cultivo, y en suelos naturales dependerá del tipo de cobertura p.e., ecosistemas con especies perennes o caducifolias. Alvarado (2004), describe que la MOS en los bosques proviene de hojas, troncos y raíces de la vegetación existente. En este componente del suelo se observan dos procesos simultáneos; el primero que consiste en transformar todos estos restos de hojas, raíces, vegetación y animales muertos en humus (humificación), para posteriormente este humos transformarse en elementos minerales CO y agua (mineralización) (Porta et al., 1999). Dunn y Stears (1987) encontraron que la materia orgánica, entre otros factores, estaba significativamente relacionada con la composición del bosque y especies herbáceas de Wisconsin (U.S.). Su cantidad se expresa en porcentaje y es considerada como uno de los elementos claves para determinar la calidad de los suelos porque contribuye a la mejora de sus propiedades físicas p.e., aumentando la capacidad de retención de agua, mejorando su estructura, disminuyendo la erosión y la compactación, entre otras (Soil Quality Institute, 1996; Whalen y Sampedro, 2010). El contenido de materia orgánica incrementa el proceso de agregación y la estabilidad de los

agregados en suelos de Chile (Ellies et al., 2005). Taguas (2007), examina la incidencia de la MOS en la estructura del suelo y la intensidad de infiltración de un cultivo de Olivar. Cobertera (1993), manifiesta que existe una estrecha relación entre la temperatura y precipitación media anual con la MOS, bajo las mismas técnicas de cultivo. Otros estudios describen un incremento del carbón orgánico, al finalizar una estación húmeda, mientras que en estación seca siempre decrecían. Cerdá (1998), Ruíz-Sinoga y Romero Díaz (2010); describieron una tendencia similar en estudios de suelos no enmendados, campos abandonados y pastizales bajo condiciones semiáridas.

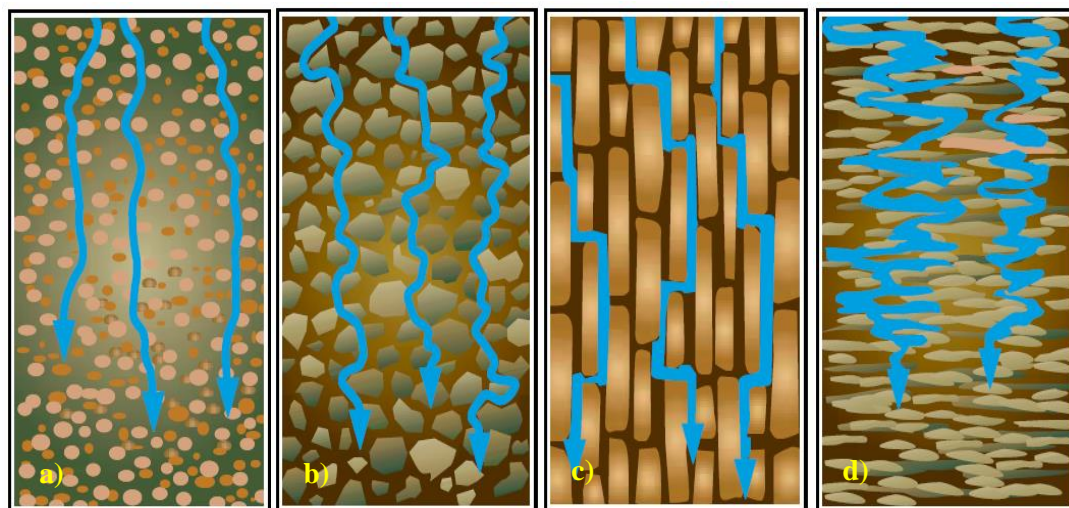
Desde el punto de vista químico, la materia orgánica está compuesta por carbono, nitrógeno, fósforo, azufre, entre otros elementos, siendo el carbono el que se encuentra en mayor cantidad (Denef et al., 2009), lo que hace muy relevante estudiar principalmente este elemento cuando hay cambios de uso y manejo, y queremos valorar los contenidos de materia orgánica. En cambio desde el punto de vista físico, diversos estudios han establecido básicamente dos fracciones o tamaños de la MOS que difieren en la velocidad de mineralización y con ello la cantidad de nutrientes que puedan aportar al suelo (Zech et al., 1997). Una de las fracciones está ligada a las partículas más finas (arcilla y limo), está más protegida de la degradación microbiana y puede permanecer en el suelo por cientos de años por lo que podría ser considerada en cierto modo recalcitrante (Zech et al., 1997). La otra fracción suele representar la mayor parte de la materia orgánica, está en los agregados de mayor tamaño, también llamados macro-agregados, compuesta principalmente por fragmentos de raíces y hojas (Cambardella y Elliott, 1992). Es la más fácilmente mineralizable porque está más expuesta a los microorganismos y se descompone en pocas semanas o meses, de manera que se la puede denominar la fracción lábil. Esta

última fracción es más sensible a los cambios de uso, de bosque a pasto o cultivos (Zech et al., 1997).

Así pues, los cambios de la cobertura vegetal con la gestión del territorio podrían resultar obvios, pero han sido poco estudiados en algunos ecosistemas de Ecuador (Reiners et al., 1994).

- **La estructura y agregación del suelo.** La estructura se refiere a cómo están aglomerados los elementos minerales del suelo (arena, limo y arcilla) en unidades de suelo discretas agregados o peds (FAO, 2006) resultado de procesos pedogenéticos. Boix-Fayos (1999), la describe como la organización, tamaño, forma y disposición de partículas (agregación) y sus espacios porosos (porosidad). Tanto la textura como la estructura determinan el espacio poroso para la circulación de aire y agua, resistencia a la erosión, soltura, facilidad para ararse y penetrar las raíces. Algunos autores describen que, la estabilidad de los agregados del suelo bajo condiciones mediterráneas, están relacionados con las condiciones de humedad y temperatura del suelo e incluso podrían variar estacionalmente bajo diferentes condiciones climáticas, de vegetación o de manejo (Lavee et al., 1996; Cerdà, 1998; Taguas, 2007). Aunque la estructura tiene estrecha relación con la textura que no cambia con las actividades agrícolas, la estructura en cambio podría mejorarse o destruirse con facilidad dependiendo de la selección de la práctica agrícola como de sus condiciones (Sullivan, 2007). Así mismo tiene fuerte relación con la porosidad, es decir, el espacio poroso que está entre las partículas de los agregados, por donde fluye el aire y agua, que a su vez cambia por alteraciones de la vegetación, la fauna, empaquetado de partículas, contracción de arcillas y tareas de laboreo (Marshall et al., 1996, en Gabarrón-Galeote, 2011).





**Figura 2.6.** Movimiento del agua a través de texturas a) granular, b) bloques subangulares, c) prismática, d) laminar (USDA, 2000).

En consecuencia la capacidad de infiltración como de almacenamiento de agua depende de su porosidad y estructura, y su movimiento depende de la disposición u organización textural como lo describe la figura 2.7.

- **Permeabilidad del suelo**, la permeabilidad es la facilidad con que el aire, el agua o las raíces se mueven a través del suelo (Plaster, 2009). Si bien la permeabilidad es una propiedad del suelo que no puede medirse directamente, pero si se puede medir el movimiento del agua (conductividad hidráulica) en función de la velocidad de flujo de agua a través del suelo durante un periodo de tiempo determinado (USDA, 1999). La conductividad hidráulica saturada está influenciada por la textura, estructura (Figura 2.7), densidad aparente y porosidad (número de poros, tamaño y continuidad). Y la conductividad hidráulica no saturada se presenta en suelos en los que existen procesos de humectación y desecación. Generalmente se expresa como una tasa de permeabilidad ( $\text{cm}\cdot\text{hr}^{-1}$ ), y como lo describe la tabla 2.3., se la puede relacionar con la conductividad hidráulica del suelo.



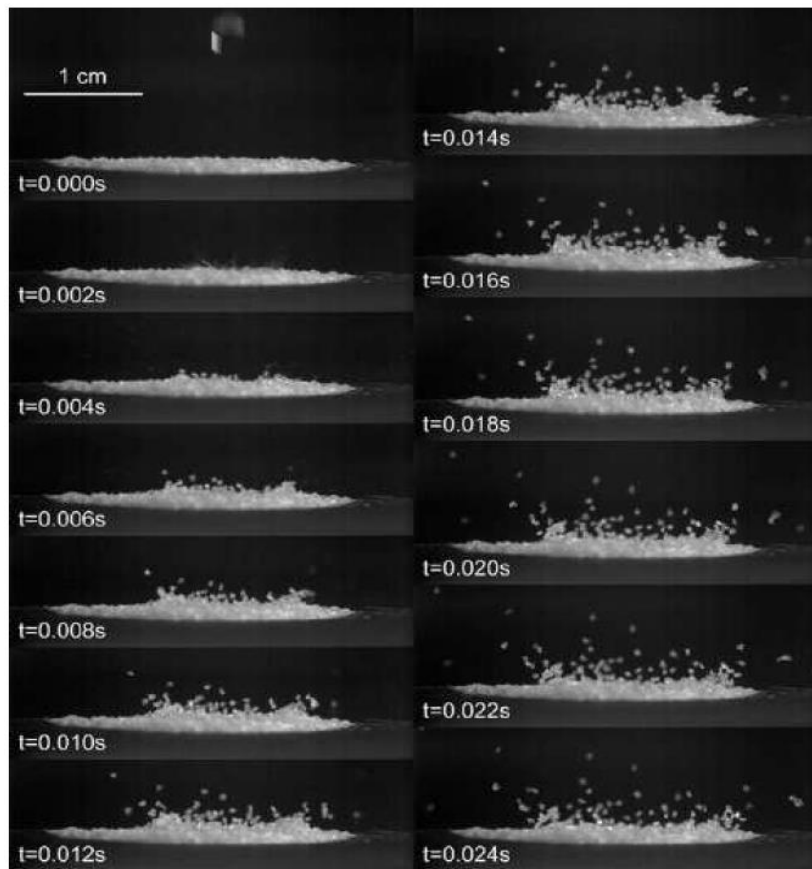
**Tabla 2.3.** Clases de permeabilidad (USDA, 2000).

<b>Clases</b>	<b>Tasa de Infiltración (cm.hr<sup>-1</sup>)</b>
<i>Impermeable</i>	< 0.0015
<i>Muy Lento</i>	0.0015-0.06
<i>Lento</i>	0.06-0.2
<i>Moderadamente lento</i>	0.2-0.6
<i>Moderado</i>	0.6-2.0
<i>Moderadamente rápido</i>	2.0-6.0
<i>Rápido</i>	6.0-20
<i>Muy rápido</i>	>20

## Erosión del Suelo

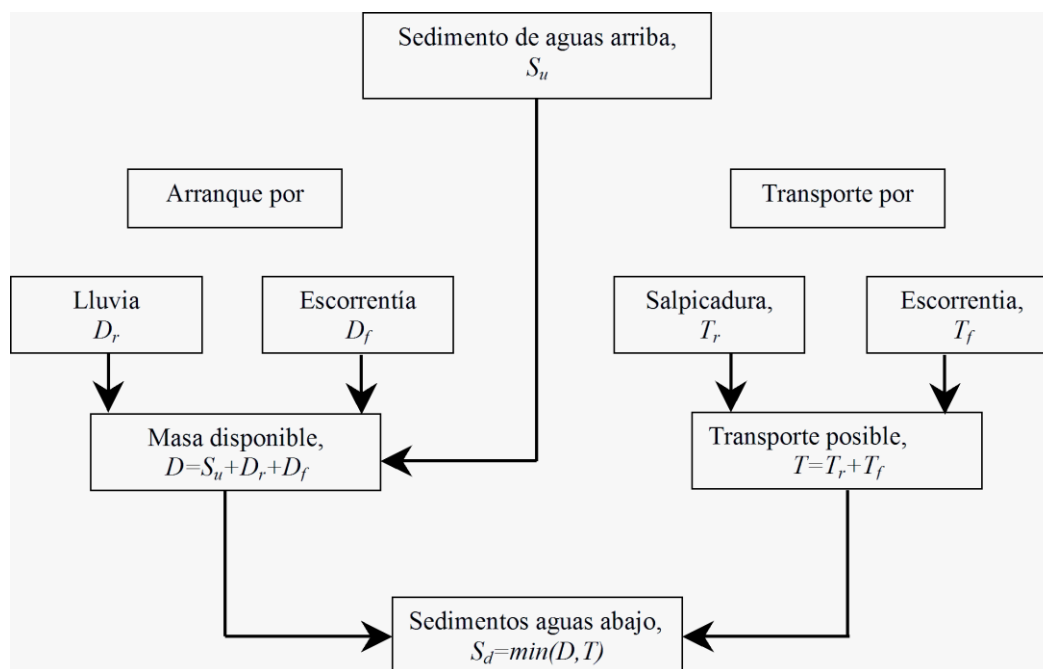
Los procesos erosivos de rotura o separación, transporte y sedimentación o depósito, se han venido produciendo desde hace cientos o miles de años (D´Odorico et al., 2001), incluso antes de la aparición del ser humano sobre estos ecosistemas Andinos aún en construcción. La erosión hídrica es parte de la evolución del paisaje que tenemos actualmente; pero se ha visto incrementada en algunas regiones por la presión de las actividades antropogénicas sobre estos ecosistemas naturales (Morgan, 2005).

Uno de los primeros modelos sencillos del proceso de la erosión hídrica fue propuesto por Meyer y Wischmeyer (1969), que se muestra la figura 2.8. El impacto de las gotas de lluvia al caer sobre el suelo se lo conoce como erosión por “salpicadura”, que es el esfuerzo físico de compresión y corte del agua, que supera a la fuerza intersticial que sostiene a los agregados del suelo juntos (Foto 2.6); a estas partículas individuales desprendidas del suelo también se las conoce como sedimentos (Thornes, 1990).



**Foto 2.6.** Secuencia de fotogramas de impacto de gota de agua sobre arena seca (Furbish et al., 2007).

Cuando la capacidad de desprendimiento (“Arranque” en la Figura 2.7), del suelo es menor a la capacidad de transporte (como sucede en el caso de algunas arcillas), decimos que la erosión del suelo está limitada por su capacidad de desprendimiento (Van Rompaey et al., 2003); y al contrario cuando la capacidad de desprendimiento es mayor a la de transporte como en las arenas (Harmon y Doe, 2001), decimos que la cantidad y magnitud de la erosión está limitada por su capacidad de transporte.



**Figura 2.7.** Modelo conceptual de erosión de suelo en laderas (Meyer y Wischmeier, 1969).

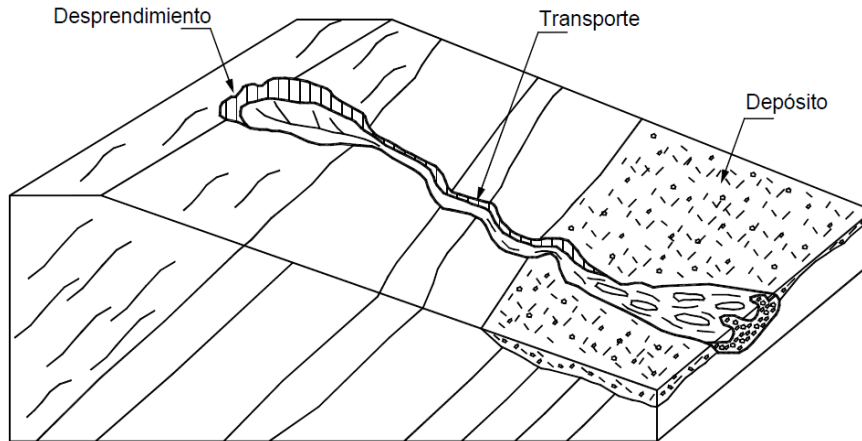
A medida que las precipitaciones continúan el agua puede o infiltrarse a través del suelo o a su vez empezar a acumularse si la superficie es plana o escurrirse en una superficie inclinada o con cierta pendiente. La distribución espacial de la humedad del suelo es considerada una variable clave para determinar los patrones del suelo que influyen en los procesos de escorrentía (Zehe et al., 2005). Esta capacidad del suelo para permitir la infiltración dependerá principalmente de parámetros físicos del suelo, su permeabilidad (Ley de Darcy), así como del uso y manejo que se le esté dando a ese suelo. La disponibilidad de agua en el suelo, es un factor limitante para el crecimiento de las plantas, principalmente para los ecosistemas semiáridos, en los que se ve reflejado en su distribución espacial y estructura; que describe un patrón espacial de la infiltración y escorrentía; así como de la altitud y topografía (Wilcox et al., 2003). Lamentablemente, este patrón espacial de la humedad del suelo y su dinámica es difícil de observarlo directamente, y por lo tanto muy difícil de modelar.

A escala de cuenca hidrográfica este flujo superficial del agua (“*runnoff*”), es diferente para el área de cabecera que en la parte baja de la misma, esto se debe a que la parte alta recibe el agua de todas las direcciones, y al irse acumulando provoca un flujo preferencial que está influenciado por la forma del relieve, lo que a su vez favorece la formación de canales de poca profundidad denominados “regueros”. A medida que el poder erosivo aumenta, estos regueros pueden favorecer la formación de un canal de mayor superficie y profundidad denominado “cárcavas” o “barrancos” (Poesen et al., 2003). Al momento en que la trayectoria del flujo de agua disminuye su velocidad, ya sea por cambio de pendiente, por el uso o manejo del suelo, entre otras; las partículas se depositan ya que el flujo de agua no puede continuar arrastrando todo el sedimento.

En las cuencas Andinas descritas este mismo capítulo en los apartados de la sección 2.1., la producción de sedimentos incluye la erosión en regueros, canales y movimientos en masa conocidos como deslizamientos (Foto 2.3.a), pero no todo el sedimento desprendido va directamente a los ríos, parte se deposita en zonas colinadas y planas de la cuenca baja, antes de llegar al río (Foto 2.3. b y c). Existe diferencia entre el desplazamiento del material más pesado, que rueda, salta, o se desliza, del más fino que es empujado por las partículas del fluido mientras está en suspensión. Al caudal sólido de las partículas pesadas se le conoce como *carga de fondo*, mientras que al de las finas se denomina *carga suspendida*, así como su suma es la *carga total*.

Suárez-Díaz (2001), describe el proceso de erosión y depósito en laderas en la figura 2.9. El depósito de los sedimentos se produce cuando la capacidad de transporte del flujo superficial es menor que la velocidad de sedimentación de las partículas, debido a la fuerza de gravedad; si bien estas partículas se depositan libremente, también pueden ser fácilmente removidas nuevamente por el impacto de las gotas de lluvia. Pendiente abajo la velocidad de flujo podría aumentar más eficientemente en laderas

pronunciadas, ya que a medida que aumenta la superficie de la pendiente, disminuye la velocidad de desprendimiento del suelo.



**Figura 2.8.** Representación esquemática de la erosión y depósito sobre superficies inclinadas (Suárez Díaz, 2001).

La “erosión de cauces”, consiste en la eliminación directa de los sedimentos de cualquiera de las riberas de los ríos (erosión de flujo lateral o en eventos de inundación), o en el lecho mismo de los ríos. Los sedimentos también pueden ingresar en la corriente debido a los hundimientos en las riberas, socavadas por el flujo de canal. La mayoría de estos tipos de erosión descritos no se producen de forma aislada, sino más bien simultáneamente, y esto está influenciado principalmente por la forma del paisaje así como por las características de las precipitaciones. Desafortunadamente, gran parte de los modelos de erosión hídrica tienden a predecir uno solo de estos tipos de erosión descritos, p.e., escorrentía, regueros, canales (Summer et al., 1998). Y el rendimiento total de una cuenca hidrográfica es la suma de todos los tipos de erosión presentes en la misma (Rustomji y Prosser, 2001).

Un factor muy importante que interviene en los procesos de erosión es sin duda la cobertura vegetal, principalmente porque influye en la regulación del ciclo hidrológico. Entender cómo es la interacción planta-suelo puede ser muy útil al

momento de proponer estrategias de manejo o conservación del suelo para evitar su riesgo de degradación (Zalewski, 2000).

Aunque el proceso de erosión es complejo, es posible caracterizar los principales factores que intervienen con algunos modelos. Un modelo de erosión pretende entender las leyes físicas y los elementos del paisaje, así como la escorrentía con el material parental del suelo. El modelo traduce estos factores en relaciones matemáticas y lo expone en los procesos de erosión hídrica fundamentales de desprendimiento, transporte y deposición (Jetten et al., 2003).

De acuerdo a la clasificación propuesta en Morgan (2005), tenemos tres tipos o categorías de modelos que destacar los de base física, los conceptuales y los empíricos.

**Los modelos físicos;** no surgieron hasta la década de 1970 y se basan en el análisis físico de los procesos de erosión y transporte de los sedimentos, utilizando ecuaciones que describen la transferencia de masa, cantidad de movimiento y energía. Ya que sus parámetros tienen comprensión física, se los puede cuantificar directamente, sin necesidad de recurrir a registros largos hidrometeorológicos (Smith et al., 1999). Algunos ejemplos de modelos de base física son el ANSWERS - Aerial Non Point Source Watershed Environment Response Simulation, propuesto por (Beasley et al., 1989); CREAMS – Chemicals, Runoff and Erosion from Agriculture Management Systems (Knisel, 1995); el WEPP – Water Erosion Prediction Project (Nearing et al., 1989); y uno más reciente el SWAT – Soil and Water Assessment Tool (Arnold y Foster, 2005). A pesar de que estas ecuaciones se han formulado para tener como entrada datos espacio-temporales continuos, en la práctica suelen utilizarse datos de fuentes puntuales para representar la superficie de una cuenca por ejemplo (Saavedra, 2005); estos parámetros calculados en micro-escala no pueden extrapolarse a macro-escala, porque pierden su justificación por la variabilidad en los factores.

**Los modelos conceptuales;** estos modelos reflejan los procesos físicos que rigen el sistema, pero son descritos con relaciones empíricas, usando sistemas mecánicos o eléctricos análogos al sistema bajo investigación. Estos modelos representan a una cuenca como una serie de almacenes internos y por lo general lineales (Sivapalan et al., 2002); y tienden a incluir una descripción general de los procesos a escala de cuenca, sin incluir detalles específicos de las interacciones de procesos complejos. Lo que favorece a estos modelos para explicar efectos cualitativos o cuantitativos del cambio de uso del suelo, por ejemplo; sin necesidad de muchos datos espacio-temporales de entrada. Una alternativa es usar modelos conceptuales agrupados, es decir que puedan ser aplicados de una manera semi-distribuida al desagregar una cuenca en subcuencas en las que se aplica el modelo (Flanagan y Nearing, 1995; Arnold y Fohrer, 2005). Los valores para utilizar en estos modelos conceptuales, pueden obtenerse normalmente a través de la calibración con los datos observados, como la medición de la concentración de descargas de corriente y sedimentos (Zhou y Liu, 2002). Por esta medición de datos observados estos modelos suelen sufrir problemas de identificación de los valores de los parámetros; sin embargo el papel de estos modelos es cumplir un rol intermedio entre los modelos con base física y los empíricos.

**Los modelos empíricos;** son considerados modelos sencillos, que se basan principalmente en el análisis de los experimentos de campo y buscan caracterizar la respuesta de las parcelas de erosión utilizando inferencia estadística. La rigurosidad en los datos así como los requisitos computacionales suelen ser menores que los otros dos tipos de modelos. Estos modelos por lo general tienen una alta agregación espacio-temporal, y se basan en el análisis de los procesos de erosión utilizando técnicas estadísticas. Suelen ser muy utilizados como la etapa inicial para identificar posibles fuentes de sedimentos. Estos modelos suelen criticarse por emplear suposiciones sobre

la física del sistema de la cuenca, o por ignorar la heterogeneidad característica de los datos de entrada de las mismas, por ejemplo el tipo de precipitación o de suelo, o por ignorar linealidades inherentes a un sistema de captación (Foster, 1996). A pesar que alguna de estas críticas podrían aceptarse como válidas, existen muchas regiones del Planeta que no disponen de datos suficientes para poder aplicar los modelos de base física o los modelos conceptuales, por ejemplo una red de estaciones meteorológicas, la fuerte heterogeneidad espacial de los suelos, insuficiente información espacial sobre el uso y manejo del suelo, entre otros; en los que modelos más flexibles como los empíricos son la mejor alternativa para ser aplicados, y suelen ser un paso muy útil para detectar las causas y fuentes de sedimentos (Lu et al., 2004).

Por la rigidez en los datos de entrada el uso de estos modelos podría limitar el potencial para predecir efectos de cambios en las cuencas, y al mismo tiempo resulta difícil modelar procesos de precipitación-escorrentía por su baja sensibilidad al cambio (Kandel et al., 2004).

Como se ha descrito, los modelos de erosión de suelo utilizan expresiones matemáticas, para presentar las relaciones entre los diversos factores y procesos que ocurren. Los factores que intervienen en casi todos los modelos son la topografía, el clima, las propiedades del suelo, la cobertura vegetal y el uso y manejo del suelo. Estos parámetros fueron descritos en la famosa Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE) propuesta por Wischmeier y Smith (1978). A partir de este modelo se han derivado algunas versiones de modelos. Merrit et al. (2003), hace una amplia revisión de modelos, usos y desempeño. En esta descripción general mencionaremos a tres que se relacionan en función al área geográfica en que fueron desarrollados (continentes) p.e., SLEMSA, Modelo de estimación de la pérdida de suelo para el sur de África (Stocking, 1981); EuroSEM, Modelo de erosión de Suelo Europeo (Morgan et al.,



1998); **RUSLE**, que es una revisión de la ecuación universal de pérdida del suelo (USLE), propuesta por (Renard et al., 1997).

El modelo **RUSLE**, fue elegido para estimar el riesgo de erosión del suelo a escala local en la zona de estudio, por ser un modelo que se puede adaptar a sitios con información escasa que en nuestro caso las principales limitantes fueron el clima y el suelo. La ecuación universal de pérdida de suelo propuesta por Renard et al. (1997) es la siguiente:

$$A_{(x,y)} = R_{(x,y)} K_{(x,y)} LS_{(x,y)} C_{(x,y)} P_{(x,y)} \quad (2.1)$$

Dónde:  $A$  es el promedio anual de riesgo de erosión del suelo por unidad de área ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ),  $R$  es el factor de erosividad provocado por las lluvias ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ),  $K$  es el factor de erodabilidad del suelo ( $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ),  $LS$  son los factores de largo de la pendiente y grado de pendiente (expresado en porcentaje),  $C$  es la cobertura vegetal del suelo y  $P$  es el factor que describe las prácticas de manejo del suelo (Morgan, 2005). Todo este análisis lo desarrollamos en una constante espacial de 30m que es el tamaño de la celda (x,y) tomada del modelo digital de elevación (MDE).

### 2.2.2. Generación de información de línea base para implementar el modelo

El material utilizado en el proceso de muestreo de campo fue:

Barrenos cilíndricos y tipo edelman, cilindros de kopecky, machetes, navaja para suelo, bolsas plásticas, etiquetas, flexómetro, altímetro, GPS, podadora manual, espátulas, cuerda plástica, libreta de campo, mapas y cámara fotográfica.

### Muestreo y descripción del suelo en campo

De acuerdo a los objetivos de la tesis, la metodología tiene cierta variación en relación a

las dos escalas de muestreo en la misma. A escala local (59.1 km<sup>2</sup>), denominada microcuencas de acuerdo a la clasificación que propone el INEFAN, (1993); y a escala regional (4184 km<sup>2</sup>), cuenca o sistema hidrográfico de acuerdo a esta misma clasificación.

**Tabla 2.4.** Clasificación de cuencas en relación con la superficie (INEFAN, 1995).

CLASIFICACIÓN	SUPERFICIE
Sistema hidrográfico	> a 300 000 ha (3 000 km <sup>2</sup> )
Cuenca	100 000 a 300 000 ha (1 000 a 3 000 km <sup>2</sup> )
Subcuenca	15 000 a 100 000 ha (150 a 1 000 km <sup>2</sup> )
Microcuenca	4 000 a 15 000 ha (40 a 150 km <sup>2</sup> )

En la fase de análisis del trabajo de campo a escala local, se inició definiendo el área de estudio en función de las limitantes del momento (recursos escasos para movilización y de personal). De acuerdo a la accesibilidad al terreno y las limitantes mencionadas, el trabajo de campo y laboratorio para la primera escala fue completado en un periodo de 12 meses. Y en la segunda escala de la investigación (regional), el tiempo fue de 18 meses aproximadamente.

El fin del trabajo de campo a escala local, se lo realizó en función a los requerimientos específicos que plantea el modelo de la RUSLE, es decir de acuerdo a los parámetros que exige la fórmula de erodabilidad del suelo:

$$K = 0.277 \cdot 10^{-6} M^{1.14} (12 - OM) + (0.0043(s - 2) + 0.0033(p - 3)) \quad (2.2)$$

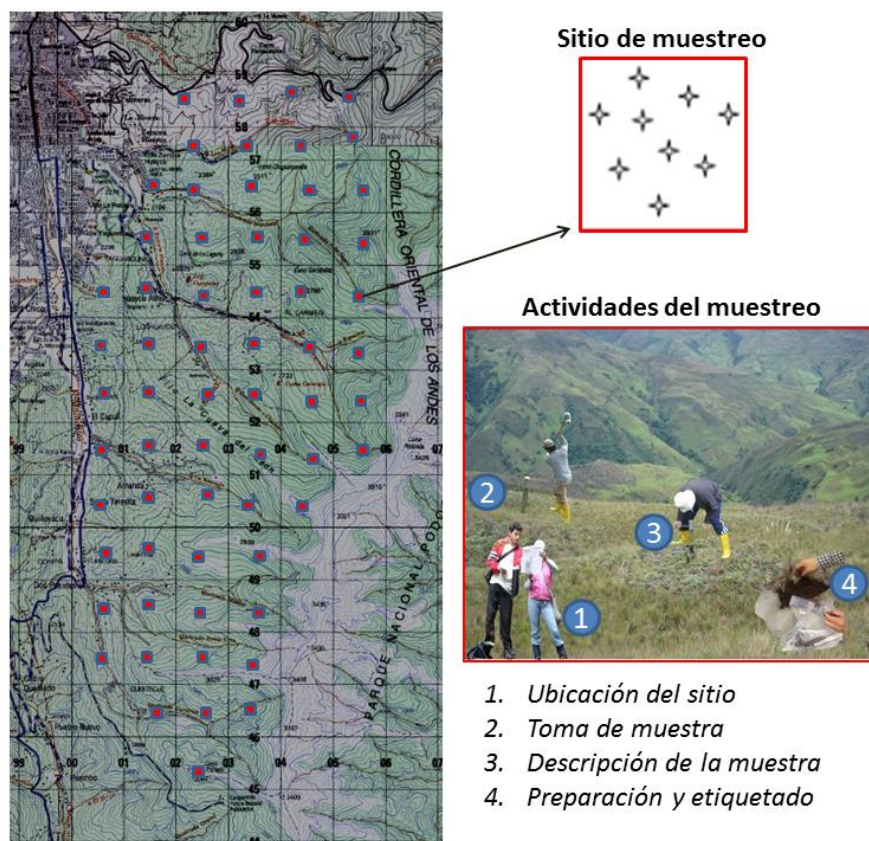
Donde:  $K$  es el factor de erodabilidad;  $M$  representa a (limo % + arena muy fina %) \* (100 – arcilla %);  $OM$  es la materia orgánica en %;  $s$  es el parámetro estructural basado en el primer horizonte del suelo y  $p$  es el parámetro de permeabilidad.

Para cumplir con la evaluación de todos estos parámetros de esta fórmula, en el

campo fue realizado un muestreo estratificado - sistemático (Carter, 1993). Este método consiste en seleccionar los puntos de muestreo a distancias uniformes entre sí, con el propósito de brindar cobertura total a todas las cuencas en relación con sus condiciones específicas (cobertura natural e intervenida). Esta técnica es considerada “clásica” para la estimación en superficies y se recomienda su uso para reducir la variabilidad de las muestras, además de ser un procedimiento de selección de la muestra fácil de ubicar sobre un mapa o fotografía aérea. En este tipo de muestreo puede realizarse por rejilla rectangular o polar. Para esta actividad fue utilizada una carta topográfica puesta a disposición del por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM) a escala 1:50000, y por cada cuadrante de la grilla se tomó 1 muestra de suelo. El total de los sitios a muestrear para estas 7 cuencas pequeñas fue de 64 puntos de muestreo.

Al parámetro de estructura del suelo se lo determina *in situ*, en condiciones del suelo de preferencia secas o ligeramente húmedas, para ello se debe tomar con la ayuda de una pala, un terrón de suelo grande del horizonte del primer perfil a analizar. La estructura del suelo se la describe en términos de tamaño, grado (s/estructura, débil, moderado y fuerte), y tipo de agregados (granular, migajosa, laminar, blocosa, prismática). A la estructura también se la puede comprobar con la información de textura y densidad aparente siguiendo las directrices para descripción de suelos de la FAO (2006).

La permeabilidad del suelo puede medirse mediante su coeficiente de conductividad hidráulica; y esta conductividad se calcula a partir de la velocidad de infiltración (Tabla 2.3), esta velocidad varía según el tipo de suelo y el contenido de humedad presente en el suelo (Jordán, 2006).



**Figura 2.9.** Mapa y esquema de muestreo del área local de estudio.

Como lo describe la figura 2.10 cada sitio de muestreo representa a una muestra compuesta, es decir que tenía de 8 a 9 sub-muestras. La profundidad de muestreo fue de 0 – 20 cm (suelo mineral). El barreno de muestreo fue tipo cilindro con un diámetro de 5,4 cm obteniendo un volumen de suelo de  $458 \text{ cm}^3$  por cada sub-muestra. Las actividades como ubicación del sitio (1) se refiere a la identificación exacta del sitio a tomar la muestra, así como su georreferenciación con la ayuda de un GPS, todo esto fue descrito en la hoja de campo (Anexo 1.a). En esta hoja, además de los datos geográficos es recomendable colocar la fecha, así como el código del sitio de muestreo. La actividad denominada “(3) descripción de la muestra”, se refiere a las características del suelo como su estructura, características del paisaje p.e., cobertura, manejo, relieve, pendiente local, entre otras sugeridas en las directrices para descripción de los suelos de la FAO (2006). También en estas directrices recomienda evitar muestrear cerca de lugares con

influencias antrópicas como caminos, senderos, deslizamientos o en pastizales de las deyecciones de animales, fuentes de agua, etc. Buduba (2004), también recomienda tomar las muestras en la misma época del año y en el caso de estar en temporada invernal dejar que transcurran aproximadamente 48 horas luego de producido un evento de precipitaciones. En este tema el Anexo 1.b), sugiere describir algunas condiciones del clima, paisaje, relieve, etc.

Para tener una muestra correcta para ser analizada en el laboratorio es necesario homogenizar todas las sub-muestras en un recipiente o una superficie limpia, disgregando los terrones y eliminando las piedras y materia orgánica como pedazos de madera u hojas. En una bolsa limpia y etiquetada fue tomada la muestra final mediante el cuarteo, el peso aproximado de la muestra fue de 1 Kg. La muestra de DA, no se la debe retirar del anillo de kopecky, sino más bien se debe colocar las tapas plásticas en ambos extremos del anillo y llevar al laboratorio para ponerlo en la estufa a 105°C por 24 horas y tomar el peso seco de la muestra. La DA del suelo resulta de dividir el peso seco del suelo para el volumen del cilindro de muestreo y se lo expresa en ( $\text{g.cm}^{-3}$ ).

En las etiquetas de las bolsas del suelo y DA, se recomienda que el código de campo de la muestra coincida con el de DA y el de la hoja de campo que describe el sitio de muestreo lo más completo e ilustrativo posible. En nuestro caso los códigos de cada muestra fueron las 3 primeras letras mayúsculas del nombre de la subcuenca (p.e., MIN\_01), más el número que le correspondía del mapa de campo (Figura 2.10).

A escala regional la generación de la información de suelo se fundamentó en el enfoque geo-pedológico, por la alta relación geomorfología-suelo (Fotos 2.4 y 2.5); con este enfoque se puede caracterizar los suelos con un nivel de estudio semi-detallado y de cartografía 1:25000, utilizando el perfil de suelo como base del análisis edafológico. La selección y distribución de las observaciones *in situ*, fue usando el método de mapeo

libre y el de transectos. *Mapeo libre*, consiste en muestrear sin una regla fija, pero respetando el nivel de estudio y la hipótesis propuesta, en este caso fue paisaje-geoforma-suelo, en la delimitación, la fotointerpretación y los sistemas de información geográfica (SIG), fueron utilizados para conseguir este propósito. La técnica de los transectos fue utilizada cuando ya conocíamos la dirección de los límites generales de la fisiografía de los suelos; en este caso se puede trabajar a mayor detalle perpendicular a estos límites y con menor detalle paralelo a los mismos (UTPL-CLIRSEN, 2012). Este muestreo fue parte del proyecto de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional, escala 1:25000, el cual fue financiado por la SENPLADES (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo del Ecuador), fiscalizado por el CLIRSEN (Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales y Sensores Remotos) y ejecutado para el área de estudio por la UTPL (Coordinador de la fase de campo del muestreo de suelos agrícolas – Anexo 3).

### **Análisis del suelo en el laboratorio**

La compra de material y equipos para el laboratorio de suelos agrícolas de la UTPL, fue gracias a la AECID, con uno de sus programas que financiaron parte de este proyecto de tesis (PCI\_Iberoamérica A/024199/09 - Anexo 4). Estos fueron indispensables para poder desarrollar los análisis en los parámetros materia orgánica y textura del suelo mineral.

El material utilizado en el laboratorio para el parámetro de materia orgánica, es: tamiz (2 mm), balanza de precisión, tabla Munsell, agitador magnético, picetas, probetas, pipetas, balones de aforo, matraces, buretas.

En el laboratorio las muestras de suelo disturbadas fueron preparadas para su proceso de análisis, primero secadas al aire y pasadas por un tamiz de 2mm; la intención de este proceso es separar las fracciones gruesas de las finas del suelo, de acuerdo a

como lo describe la tabla 2.2, que suele utilizarse para diferentes países.

**La materia orgánica del suelo (MOS)** fue determinada mediante el método Walkley-Black, de oxidación húmeda (Soil Survey Staff, 1996), de acuerdo al protocolo validado para el laboratorio de suelos que se encuentra en el Anexo 4. La determinación real en el laboratorio es del carbón orgánico (Nelson y Sommers, 1996) y los cálculos del mismo fueron estimados de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% CO = \frac{(B-M) \cdot N \cdot 0.003 \cdot 1.3}{W_m} 100 \quad (2.3)$$

Donde, % CO es el carbón orgánico expresado en porcentaje, B es el volumen de Sulfato Ferroso utilizado en la titulación del “blanco” (ml), M es el volumen de Sulfato Ferroso utilizado en la titulación de la muestra (ml),  $W_m$  es el peso de la muestra (g), y N es la normalidad real de la solución de sulfato ferroso utilizado en la titulación que se la determina con la fórmula (1.4).

$$N = \frac{V_{Cr_2O_7K_2}(\text{blanco})}{V_{SO_4Fe}(\text{blanco})} \quad (2.4)$$

Donde,  $V_{Cr_2O_7K_2}$ , es el volumen del dicromato de potasio que como describe el protocolo de análisis del Anexo 4, es (5 ml) y  $V_{SO_4Fe}$ , es el volumen de sulfato ferroso que se utilizó para titular el blanco (ml).

El factor (0.003) utilizado en la fórmula 2.3, representa el peso en gramos de un mili-equivalente de carbono, obtenido al dividir el peso atómico del carbono (12) entre el número de la valencia del carbono (4), y luego dividido entre 1000.

El factor (1.3) utilizado en la fórmula 2.3, representa la eficiencia del método de oxidación del carbono orgánico, obtenida al dividir 100 entre 77, y el factor (100) es porque los valores se los expresa en porcentaje.

Como en la mayoría de investigaciones lo que se requiere es que el carbono



orgánico esté representado cómo porcentaje de materia orgánica del suelo (MOS), se utiliza la formula a continuación para este proceso.

$$\% \text{ MOS} = \% \text{CO} \times 1.724 \quad (2.5.)$$

El factor 1.724, resulta de la división de la MOS (100) entre el CO (58).

**La textura del suelo** fue determinada por el método del hidrómetro, también llamado de Bouyoucus; mismo que fue implementado y validado para el Laboratorio de suelos agrícolas de la UTPL. Los análisis estadísticos de desempeño (precisión), fueron realizadas 10 repeticiones a un total de 10 muestras de suelo escogidas al azar, 5 representan a cobertura natural (bosques) y 5 a cobertura intervenida (pastizal).

Los pasos del proceso de implementación y validación se describen a continuación.

**a.- Preparación de la muestra,** como estos análisis generalmente se determinan en la fracción fina (<2 mm) del suelo, que se ha secado a una temperatura no superior a 40 °C, hasta masa constante, constituyendo lo que se denomina “suelo seco al aire”. Las ventajas de usar el suelo seco al aire consisten en que generalmente este posee un contenido de humedad óptimo para manipularlo y procesarlo, la masa de suelo seco al aire permanece relativamente constante y la actividad biológica es baja durante el almacenaje.

**b.- Principio y alcance del método.** El principio de este método se basa en la Ley de Stokes: *“la resistencia ofrecida por un líquido a la caída de una partícula esférica rígida varía con la circunferencia de la esfera y con su superficie, es además proporcional a la viscosidad (y por tanto a la temperatura) y a tres veces a la velocidad de caída”* (Soil Science Society of América, 2002).

$$V = \frac{2(Dr - Df) g r^2}{9\mu} \quad (2.6.)$$



Donde:  $V$  es la velocidad de caída de la partícula ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $D_r$  es la densidad real ( $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  $D_f$  es la densidad del fluido ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  $r$  es el radio equivalente de la partícula (cm),  $\mu$  es la viscosidad del fluido (poises).

El método del hidrómetro nos ayuda a determinar los porcentajes de arena, arcilla y limo presentes en una muestra de suelo y así mismo su clasificación textural (Fuentes, 1998). El hidrómetro a utilizar debe estar calibrado para determinar la densidad de la suspensión ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), la cual es función de la cantidad de partículas que todavía no se han sedimentado. Los resultados de un análisis de laboratorio son más representativos si se expresan en relación al peso del suelo que se ha utilizado en el análisis. En este caso, el peso del suelo en base seca es considerado como el mejor estándar para basar los cálculos en diferentes análisis de suelos.

Para este método el **material y equipos** utilizados fueron: Hidrómetro calibrado de 0-60 g/L, Probetas graduadas de 1000 ml, Agitador mecánico, Termómetro electrónico, Balanza analítica, vasos de precipitación de 250ml, pipetas de 5ml, pissetas, varillas de agitación, temporizador. Los **reactivos** utilizados fueron: como agentes dispersantes (Hidróxido de sodio 1 N y Oxalato de Sodio sobresaturado), su función es separar las partículas de limo y arcilla. Alcohol amílico, para eliminar la espuma que pueda impedir la lectura con el hidrómetro.

c.- **Procedimiento.**- el flujograma del procedimiento justo con el archivo fotográfico se encuentra en el Anexo 4.

d.- **Cálculos:**

- Corregir las lecturas del hidrómetro, tomando en cuenta la media aritmética de las 2 lecturas de la temperatura, por cada grado centígrado mayor o menor a 20 °C se suma o se resta 0,36 a la primera y segunda lectura del hidrómetro.

- Determinar el material en suspensión con la siguiente expresión

$$\%MS = \frac{\text{Primera lectura corregida}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (2.7)$$

- Determinación del porcentaje de arena (% Ao)

$$\%Ao = 100 - MS \quad (2.8)$$

- Determinación del porcentaje de arcilla (% Ac)

$$\%Ac = \frac{\text{Segunda lectura corregida}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100 \quad (2.9)$$

- Determinación del porcentaje de limo (% Lo)

$$\%Lo = 100 - (\%Ac + \%Ao) \rightarrow \%Lo = \%MS - \%Ac \quad (2.10)$$

Los parámetros relacionados con la erodabilidad del suelo (estructura y permeabilidad) fueron analizados en campo y en gabinete, por lo que no se mencionan en este apartado.

### Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó tanto para la validación del método de textura en el laboratorio como para la estimación de algunos parámetros de campo. En lo referente al laboratorio la intención de la validación o calibración de un método es que este pueda ser confiable y reproducible a futuro, para ello el parámetro de desempeño elegido fue precisión.

**Precisión.**- expresa la cercanía de coincidencia (grado de dispersión) entre una serie de mediciones obtenidas de múltiples muestreos de una misma muestra homogénea bajo condiciones establecidas. Las dos medidas más comunes de la precisión, que generalmente se define en términos de la desviación estándar o el coeficiente de variación (desviación estándar relativa) son la repetibilidad y la reproducibilidad.

Repetibilidad obtenida bajo las mismas condiciones de operación en un intervalo corto de tiempo, por un mismo analista (Fabiola Martínez – TFT), en la misma muestra homogénea y usando los mismos materiales y equipos. Para este análisis fueron utilizados los datos de las lecturas del hidrómetro (1era y 2da) corregidos; para analizarlos con el coeficiente de variación (CV); el total de las muestras elegidas para esta implementación fue de 10. Este CV, nos permite comprobar si existe dispersión de los resultados obtenidos para ambas lecturas.

$$\%CV = \frac{S}{\hat{y}} \times 100 \quad (2.11)$$

Donde: CV es el coeficiente de variación que resulta de división de la desviación estándar (S), para la media ( $\hat{y}$ ) y multiplicado por 100.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(y-\hat{y})^2}{n-1}} \quad (2.12)$$

En el análisis de la repetibilidad es necesario conocer si existe diferencia significativa entre la repetición de análisis a la misma muestra (10 repeticiones), para ello se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) en donde la variable de respuesta (explicada) fue la densidad de las partículas, que se la hará depender de un solo factor (CV), de tal manera que las causas de su variabilidad obedezcan a dos fuentes: al factor y al error aleatorio. (Martínez, 2009).

Los resultados de este análisis estadístico los podemos ver en las tablas 1 - 10 del Anexo 2 de esta tesis.

Reproducibilidad que es la precisión bajo las condiciones de reproducibilidad, es decir poder obtener los mismos resultados con el mismo protocolo, ya sea en distintos laboratorios o con diferentes analistas, utilizando los materiales y equipos especificados.

Para este análisis fueron comparados dos conjuntos de 5 datos y se probó la hipótesis de no diferencia a través de la prueba  $t$  de Student. El análisis de prueba está dado por la siguiente fórmula:

$$T_{exp} = \frac{\hat{y}}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (2.13)$$

Estos análisis los podemos ver en las tablas 11 a la 30 del Anexo 2.

### **Regresión y correlación lineal**

Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, para analizar la asociación lineal entre la MOS con la altitud, la cobertura vegetal, la pendiente (para el capítulo III); y entre la altitud y los factores climáticos (temperatura y precipitación para los capítulos IV y V); y se probó la significación. La ecuación 2.14 representa esta relación lineal que podría presentarse entre 2 variables:

$$y = a + bx \pm S \quad (2.14)$$

Donde:  $y$ , es la variable dependiente;  $x$ , la variable independiente;  $a, b$ , parámetros de la ecuación y  $S$ , el error estándar.

En esta tesis fueron desarrollados estos análisis de relación para los capítulos III, IV y V. El capítulo III describe las relaciones entre el porcentaje de MOS, con la altitud, la cobertura vegetal y la pendiente. Y en los parámetros de calidad de agua fueron analizados el índice biológico IMEERA-B ajustado para los Andes por Villamarín et al. (2013), con la cobertura vegetal y la DA del suelo.

Los análisis estadísticos (gráficos, diagramas de distribuciones y tendencias, estadísticos descriptivos) fueron hechos usando el programa XLSTAT-Base y el programa SPSS 17.0 (Norusis, 2007).

## 2.3. Bibliografía

- Alvarado, A., 2004. Producción de madera con bajos insumos: Reciclaje de nutrientes en plantaciones y bosques tropicales. Memorias de IX Congreso Ecuatoriano y I Binacional (Ecuador-Perú) de la Ciencia del Suelo.
- Arnold, J.G., y Fohrer, N., 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19, 563-572.
- Baquero, F., et al., 2004. La Vegetación de los Andes del Ecuador. Memoria explicativa de los mapas de vegetación: potencial y remanentes a escala 1:250000 y del modelamiento predictivo con especies indicadoras. EcoCiencia CELSA CORPORACIÓN EcoPar/MAG SIGRAGO/CDC-Jatun Sacha/ División Geográfica-IGM, Quito. 56 pp.
- Balslev, H. 1988. Distribution patterns of Ecuadorian plant species. *Taxon*. 37, 567-577.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F., y Monke, E.J., 1989. ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of ASAE*, 23, 938-944.
- Boix-Fayos, C., 1999. Procesos geomórficos en diferentes condiciones ambientales mediterráneas: el estudio de la agregación y la hidrología de suelos. Tesis doctoral, Univ. de Valencia, 394 pp.
- Buduba, C., 2004. Muestreo de Suelos: Criterios Básicos. Ficha técnica. Patagonia Forestal. Año X. 1, 9-12.
- Burneo, J.I., 2013. Dynamics of Bio-Elements in Soils along a Land-Use Gradient in the Tropical Mountain Rain Forest of Southern Ecuador. PhD Thesis, Technische Universität Dresden. 143pp.
- Cambardella, C.A., Elliott, E.T., 1992. Particulate soil organic matter changes across a

- grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*. 56, 777-783.
- Carter, M., 1993. *Soil sampling and methods of analysis*. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida.
- Cerdà, A., 1998. Relationships between climate and soil hydrological and erosional characteristics along climatic gradients in Mediterranean limestone areas. *Geomorphology*. 25, 123-134.
- Cobertera, E., 1993. *Edafología aplicada. Suelos, producción agraria, planificación territorial e impactos ambientales"*, Cátedra, Madrid.
- De Koning, G.H.J., van de Kop, P.J., Fresco, L.O., 1997. Estimates of sub-national nutrient balances as sustainability indicators for agro-ecosystems in Ecuador. *Agric. Ecosyst. Environ.* 65, 12-139.
- Denef, K., Plante, A. F., Six, J., 2009. Characterization of soil organic matter. In Kutsch, W.L., Bahn, M., Heinemeyer, A. (Eds.), *Soil Carbon dynamics an integrated methodology*. Cambridge, United Kingdom.
- D'Odorico, P., Porporato, A., Ridolfi, L., 2001. Transition between stable states in the dynamics of soil development. *Geophysical Research Letters*. 28. DOI:10.1029/2000GL012290.
- Dunn, C.P., y Stearns, F., 1987. Relationship of vegetation layers to soils in southeastern Wisconsin forested wetlands. *American Midland Naturalist*. 118, 366-374.
- Ellies, A., Ramírez, C., McDonald, R., 2005. Organic matter and wetting capacity distribution in aggregates of Chilean soils. *Catena*. 59, 69-78.

- Erazo, J.C., y Martínez, J., 2004. Determinación de diez indicadores ambientales para la provincia de Loja. TFT de Ingeniería en Gestión Ambiental – UTPL, Loja.166 pp.
- FAO, 2006. Guidelines for soil description. Food and Agriculture Organization of the United Nations (p. 109). Rome.
- Foster, G.R., 1996. Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In: J. Boardman, I.D.L. Foster and H.D. Dearing (Editors), Soil Erosion on Agricultural Land. Wiley, Chichester, pp. 429-445.
- Fuentes, J., 1998. Técnicas de Riego. 3era. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 215pp.
- Furbish, D.J., Hamner, K.K. Schmeckle, M. Borosund M.N. y Mudd, S.M., 2007. Rain splash of dry sand revealed by high-speed imaging and sticky paper splash targets. *J. Geophys. Res.*, 112, F1 doi:10.1029/2006JF000498.
- Flanagan, D.C., y Nearing, M.A., 1995. Hillslope profile and watershed model documentation. *In: USDA-ARS-USDI (ed.). Technical documentation. Water Erosion Prediction Project (WEPP). Report No. 10. NSERL West Lafayette, IN, USA. pp: 11.1-11.9.*
- Gabarrón-Galeote, M.A., 2011. La vegetación como reguladora del recurso hídrico en ambiente mediterráneo. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía. Univ. de Málaga. 317pp.
- Galindo-Zaldívar, J. et al., 2010. Geometría y estructuras de la Cuenca neógena de Loja a partir de datos gravimétricos (Andes Ecuatorianos). *GEOGACETA*. 48, 215-218.
- Harmon, R.S. y Doe, W.W., 2001. Landscape Erosion and Evolution Modelling. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, USA, 540 pp.
- INEFAN., 1995. “Principales Estadísticas Forestales del Ecuador”. Dirección General

de Planificación (preparado por M. Almeida). Quito.

INERHI-PREDESUR-CONADE-OEA.1994. Plan integral de desarrollo de los recursos hídricos de la provincia de Loja. Washington D.C. Disponible en: <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea02s/ch64.htm> Revisado: Enero, 2015.

Jaramillo, D., 2001. Introducción a la Ciencia del Suelo. Medellín Colombia. 582pp.

Jetten, V., Govers, G., Hessel, R., 2003. Erosion models: quality and spatial predictions. Hydrological Processes. 17, 887-900.

Jordán López, A., 2006. Manual de edafología. Universidad de Sevilla. 144pp.

Kandel, D.D., Western, A.W., Grayson, R.B., Turrall, H.N., 2004. Process parameterization and temporal scaling in surface runoff and erosion modelling. Hydrological Processes. 18, 1423-1446.

Knisel, W.G., 1995. CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems., US Dept of Agriculture. Agricultural Research Service.

Kennerley, J.B. y Almeida, L., 1975. Mapa geológico de Ecuador, hoja de Loja (56) 1:100.000. Instituto Geográfico Militar.

Lavee, H., Sarah, P., Imeson, A.C., 1996. Aggregate stability dynamics as affected by soil temperature and moisture regimes. Geografiska Annaler. 78, 73-82.

Litherland, M., Aspden, J.A., Jemielita, R.A., 1994. The metamorphic belts of Ecuador. Overseas Memoir of the British Geological Survey 1113

Lu, H., Moran, C., Prosser, I., Sivapalan, M., 2004. Modelling sediment delivery ratio based on physical principles. In: C. Pahl-Wostl, S. Schmidt and T. Jakeman (Editors), IEMSS 2004 International Congress: "Complexity and Integrated



- Resources Management". International Environmental Modelling and Software Society, Osnabrueck, Germany. 600 pp.
- Martínez, F., 2009. Influencia de la textura en la permeabilidad del suelo de la subcuenca Zamora Huayco, cantón Loja. TFT. IGA-UTPL, Loja. 85pp.
- MAE (Ministerio del Ambiente del Ecuador), 2002. Informe Nacional del Ecuador sobre la lucha contra la Desertificación y Mitigación de la Sequía. Quito.
- MAG-PRONAREG-ORSTOM, 1984. Mapa de Suelos: Loja 1:200,000. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Programa Nacional de Regionalización and Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Printed in IGM. Quito.
- Marshall, T.J., Holmes, J.W., Rose, C.W., 1996. Soil physics. Cambridge University Press. Third Ed. 374 pp.
- Meyer, L.D., y Wischmeier, W.H., 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water, Trans. ASAE. 12, 754-758.
- Morgan, R.P.C., et al., 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University.
- Morgan, R.P.C., 2005. Soil Erosion and Conservation, 3rd ed. Blackwell, Malden.
- Navarro, J., Moral, L., Beneyto, M., 1995. Residuos Orgánicos y Agricultura. Universidad de Alicante. España. 108 pp.
- NCI-GCA, 2006. Valoración del recurso hídrico en microcuencas abastecedoras de agua para el cantón Loja (Naturaleza y Cultura Internacional – GCA-Consultores) Loja. 157 pp.
- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J., y Finkner, S.C., 1989. A process-based soil erosion model for USDA: water erosion prediction project technology. Transactions

of ASAE, 32, 1587–1593.

Nelson, D., y Sommers, L., 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Bartels, J.M, Bigham, J.M., (eds). *Methods of soil analysis, part 3. Chemical Methods*, 3rd edn. (Agronomy series nº 5) ASA, SSSA, Madison, Wis, pp 961-1010 p.

Norusis, M., 2007. *SPSS Statistic Base 17.0 User's Guide*. Chicago.

Oñate-Valdivieso, F., Bosque, J., 2010. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. *J. Hydrol.* 395, 256–263.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. y Valentin, C., 2003. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. *Catena.* 50, 91-113.

Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C., 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. Madrid. 849 pp.

Plaster, E.J., 2009. *Soil Science and Management*. 5th Edition. Delmar Cengage Learning. New York. 495pp.

Proyecto Catamayo-Chira, 2005. *Caracterización hídrica y adecuación entre la oferta y la demanda, caracterización territorial y documentación básica*. Consorcio ATA-UNP-UNL. Loja-Piura. 110pp.

Reiners, W.A., Bouwman, A.F., Pearsons, W.F.J., Keller, M., 1994. Tropical Rain Forest Conversion to Pasture: Changes in Vegetation and Soil Properties. *Ecological Applications.* 4, 363-377.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised*

- Universal Soil Loss Equation. USDA Agriculture Handbook, No. 703. 404pp.
- Richter, M., 2003. Using epiphytes and soil temperatures for eco-climatic interpretations in Southern Ecuador. *Erdkunde*. 57, 161-181.
- Rollenbeck, R., y Bendix, J., 2011. Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmospheric Research*. 99, 277-289.
- Ruiz-Sinoga, J.D., y Romero Diaz, A., 2010. Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in Southern Spain. *Geomorphology*. 118, 359–368.
- Ruiz-Sinoga, J.D., Gabarrón-Galeote, M.A., Martínez-Murillo, J.F., García-Marín, R., 2011. Vegetation strategies for soil water consumption along a pluviometric gradient in southern Spain. *Catena*. 84, 12-20.
- Rustomji, P., y Prosser, I., 2001. Spatial patterns of sediment delivery to valley floors: Sensitivity to sediment transport capacity and hillslope hydrology relations. *Hydrological Processes*, 15, 1003-1018.
- Sivapalan, M., Jothityangkoon, C., y Menabde, M., 2002. Linearity and non-linearity of basin response as a function of scale: discussion of alternative definitions. *Water Resources Research*, 38 (2) DOI: 10.1029/2001WR000482.
- Soil Quality Institute, 1996. Indicators for soil quality evaluation. USDA.
- Soil Science Society of América, 2002. *Methods of Soil Analysis Physical: methods*. Part 4. Editor-in-Chief SSSA: Warren A. Dick. Madison, Wisconsin, USA.
- Soil Survey Staff., 1996. *Soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Rep. Vol. 42. US Dept. Agric.-Nat. Res. Cons. Serv., Washington,

DC.

Sullivan, P., 2007. El Manejo Sostenible de Suelos. ATTRA. 40 pp. Disponible en:  
[www.attra.ncat.org/espanol/pdf/suelos.pdf](http://www.attra.ncat.org/espanol/pdf/suelos.pdf)

Summer, W., Klaghofer, E. y Zhang, W., 1998. Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Process, IAHS-AISH Publication. N° 249. IAHS, 453 pp.

Suárez Díaz, J., 2001. Control de erosión de suelos en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 555pp.

Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A. y Unkrich, C.L., 1995. KINEROS: a kinematic runoff and erosion model. In: V.P. Singh (Editor), Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Colorado, pp. 697-732.

Stocking, M., 1981. A working model for the estimation of soil loss suitable for underdevelopment areas, Development Studies Occasional Paper No. 15, University of East Anglia, UK.

Taguas, E., 2007. Evaluación de la pérdida de suelo en olivar a escala de microcuena bajo distintos manejos de suelo. Tesis doctoral. Univ. Córdoba. 354pp.

Tote, C., et al., 2011. Effect of ENSO events on sediment production in a large coastal basin in northern Peru. *Earth Surf. Processes Landforms*. 36, 1776–1788.

Thornes, J.B., 1990. *Vegetation and Erosion: Processes and Environments*. Wiley, Chichester, London, UK. 518pp.

USDA, 2000. *From the Surface Down - An Introduction to Soil Surveys for Agronomic Use*. Washington D.C. 26pp.

UTPL–CLIRSEN, 2012. Memoria Técnica Geopedología, Proyecto de geoinformación

para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1:25000, SENPLADES – disponible en: <http://sni.gob.ec/planes-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial>

Van Rompaey, A.J.J., Krasa, J., Dostal, T. y Govers, G., 2003. Modelling sediment supply to rivers and reservoirs in Eastern Europe during and after collectivization period. *Hydrobiologia*. 494, 169-176.

Villamarín, C., Rieradevall, M., Paul, M.J., Barbour, M.T., Prat, N., 2013. A tool to assess the ecological condition of tropical high Andean streams in Ecuador and Peru: The IMEERA index. *Ecological Indicators* 29, 79–92.

Winckell, A., Zebrowski, C., Sourdat, M., 1997a. Los paisajes naturales del Ecuador. Quito, EC, CEDIG, IPGH, ORSTOM, IGM. v. 2 (Geografía Básica del Ecuador), tomo 4. Geografía Física. 417 pp.

Wischmeier, W.H., y Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC, USA.

Wilcox, B., Breshears, D., Allen, C., 2003. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: effects of scale and disturbance. *Ecological Monographs*, 73, 223–239.

Whalen, J., y Sampedro, L., 2010. Soil ecology and management. Cambridge University Press, Cambridge.

Zalewski, M., 2000. Ecohydrology - the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*. 16, 1–8.

Zech, W., et al., 1997. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma*. 79, 117-161.

Zehe, E., Becker, R., Bárdossy, A., Plate, E., 2005. Uncertainty of simulated catchment sale runoff response in the presence of threshold processes: role of initial soil moisture and precipitation. *Journal of Hydrology*. 315, 183-202.

Zhou, Q., y Liu, X., 2002. Error assessment of grid-based flow routing algorithms used in hydrological models. *International Journal of Geographic Information Science*. 16, 819-842.

### CAPÍTULO III:

#### *El papel de la cobertura vegetal en la generación de sedimentos y calidad de agua de los Andes Ecuatorianos.*

Este capítulo fue publicado en el Libro de Actas de las VI Jornadas de Ingeniería del Agua: *La precipitación y los procesos erosivos* (Córdoba, 2015)

**Enviado:** 22 de Abril, 2015 / **Aceptado:** 19 de Mayo, 2015 / **Publicado:** 23 de Octubre, 2015.

Código: **B.31: 507 – 514 pp.**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## **CAPÍTULO III:**

### **3. El papel de la cobertura vegetal en la generación de sedimentos y calidad de agua de los Andes Ecuatorianos.**

#### **Resumen**

Ecuador presenta la tasa más alta de deforestación de América del Sur, lo que ha venido afectando a las condiciones ecológicas de las fuentes de agua que presentan gran cantidad de sedimentos producto de la erosión del suelo. Las cuencas interandinas se ven afectadas por un rápido crecimiento poblacional lo que ha provocado el cambio de grandes zonas de bosque natural en pastos, tierras de cultivo, o infraestructura urbana. Por estos cambios presentes se analizó la influencia de la cubierta vegetal en 7 cuencas que abastecen de agua a la ciudad de Loja. Se tomaron muestras de suelo y agua por cada una de las cuencas a diferentes escalas. Para determinar la calidad del agua fueron utilizados parámetros biológicos como físico-químicos. Mientras que a escala de cuenca se determinaron zonas susceptibles a erosionarse en función a la erodabilidad del suelo y las condiciones topográficas del paisaje. Con los resultados obtenidos fueron propuestas como estrategias de manejo de las riberas de los ríos, un “buffer” de conservación o reforestación de 30m de ancho, por el largo de todo el caudal. Mayor susceptibilidad a la de erosión fue descrita para zonas altas de montaña, donde las condiciones del suelo y pendiente son muy altos y la cantidad de precipitación también suele ser alta. Sin embargo bajo la vegetación del bosque natural, la erosión del suelo es muy baja, incluso sobre suelos de fuerte pendiente. Determinándose a la cobertura vegetal como el factor más importante para evitar la erosión del suelo, mientras que los demás factores estudiados son secundarios en la zona de estudio.

### 3.1. Introducción

Gestionar el agua y el suelo ha sido importante en el transcurso de la historia de la humanidad, y en la actualidad esa importancia se remarca porque estos recursos se encuentran sometidos a fuertes presiones climáticas y/o antropogénicas (Wilkinson y McElroy, 2007). En América del Sur, la tasa más alta de deforestación la tiene Ecuador (FAO, 2010), lo que puede estar afectando directamente al suelo y a la condición ecológica de las fuentes de agua.

En Ecuador, las cuencas andinas se ven especialmente afectadas por un rápido cambio del uso de suelo lo que viene provocando la conversión de grandes áreas de bosque nativo en zonas con usos antrópicos. Desde la puesta en marcha de la Ley de Reforma Agraria en el Ecuador (1973), una considerable extensión del país ha sufrido pérdida de su cubierta vegetal nativa, principalmente por la ampliación de la frontera agropecuaria; y recientemente el desarrollo urbano se ha convertido en otro factor causante de la deforestación de varias zonas.

En el sur del Ecuador la deforestación ha llegado a niveles preocupantes, entre el año 1989 y 2008 la tasa anual de deforestación fue de 2.86% y se estima que la vegetación nativa remanente cubre aproximadamente cerca del 49% de la región (Tapia-Armijos et al., 2015). Por este motivo, el estudiar la importancia que tiene la cubierta vegetal en las cuencas andinas es clave para determinar estrategias de gestión, conservación o restauración de las mismas, especialmente porque muchas de ellas abastecen de agua a varias poblaciones.

De acuerdo a los antecedentes expuestos el objetivo de esta propuesta fue analizar la influencia que tiene la cobertura vegetal nativa sobre la generación de sedimentos y la calidad del agua en siete cuencas hidrográficas.

## 3.2. Materiales y métodos

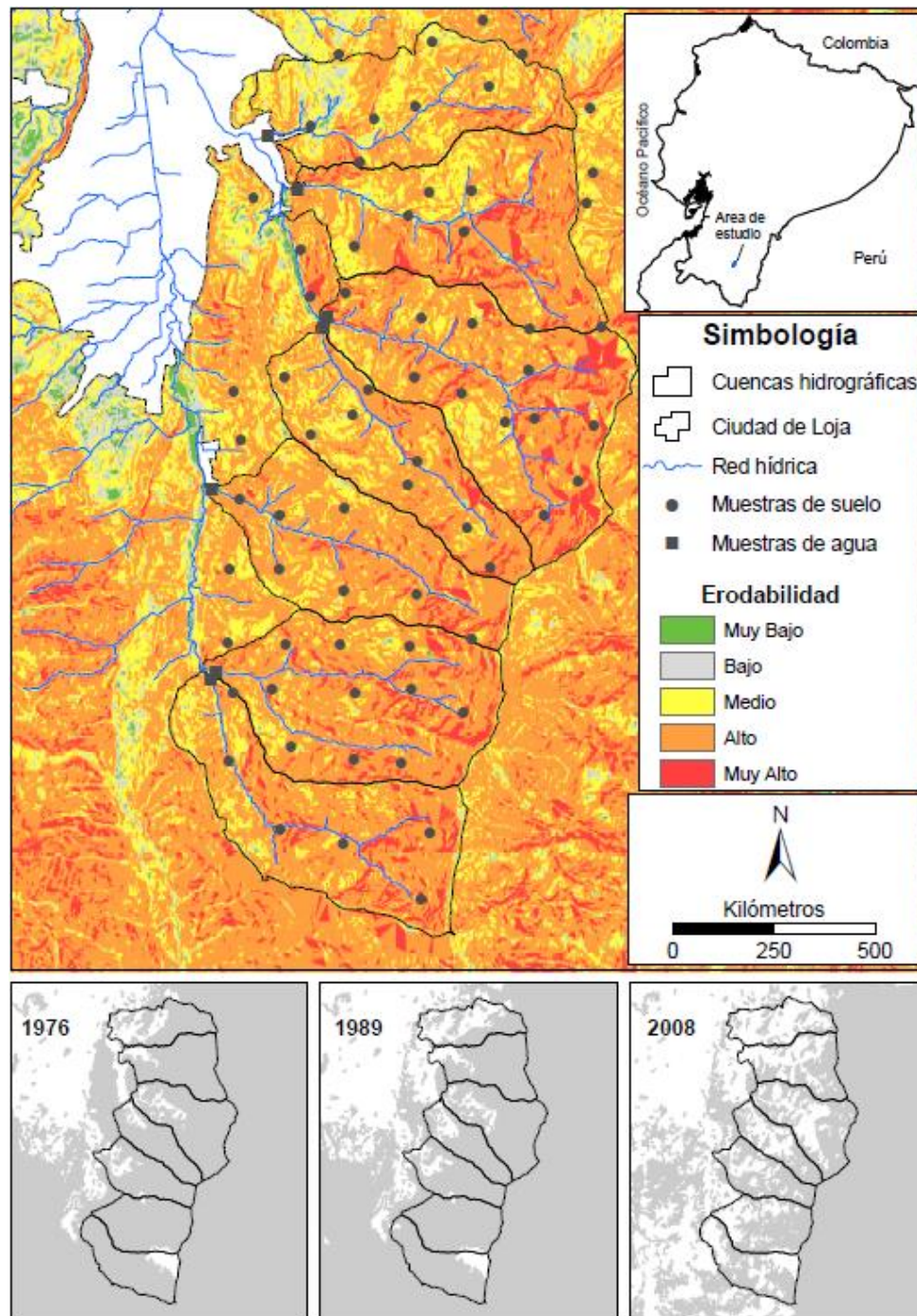
### 3.2.1. Área de estudio

Nuestro estudio fue realizado en un ecosistema de bosque montano del sur de Ecuador, en siete cuencas hidrográficas que abastecen con más del 55% de agua para la ciudad de Loja. Las cuencas bordean el Parque Nacional Podocarpus por el este, con un rango altitudinal de 2120 m a 3420 m s.n.m. Las cuencas se encuentran entre 3° 59' y 4° 06' Sur y entre los 79° 09' y 79° 12' Oeste, cubriendo un área aproximada de 5900 ha (Figura 3.1). El clima es templado lluvioso con un promedio de precipitaciones anuales de 1000 mm y una temperatura de 16 °C. La distribución de las lluvias del sitio de estudio es bimodal; la temporada de lluvias se da entre Diciembre y Abril, siendo Agosto y Septiembre los meses más secos.

Estas cuencas tienen una base litológica variable de rocas metamórficas del Paleozoico, con lutitas conglomerados y areniscas superpuestas. Los suelos que predominan son Entisoles, gran grupo de los Troprothents, suborden Orthents ubicados en la zona media a baja de las cuencas y en las cumbres de las montañas los Inceptisoles.

### 3.2.2. Indicadores del Suelo

El suelo de las cuencas fue muestreado de manera sistemática, de 0 – 20 cm de profundidad, sin analizar el horizonte orgánico de las mismas, la estructura y permeabilidad del suelo fueron determinados directamente en el campo; también el uso del suelo (pastizal o bosque) fue descrito en cada sitio de muestreo (FAO, 2006). En el laboratorio de suelos se determinaron los parámetros de textura, densidad aparente (DA), materia orgánica del suelo (MOS): de acuerdo a lo que describe el Soil Survey Staff (1996).



**Figura 3.1.** (a) Susceptibilidad a la erosión del suelo (b) deforestación de las cuencas de estudio; Loja - Ecuador.

Para determinar las zonas susceptibles a la generación de sedimentos en las cuencas, se utilizó el cálculo del índice de erodabilidad propuesto por Renard et al. (1997)

$$K = 0.277 \cdot 10^{-6} M^{1.14} (12 - MO) + (0.0043(s - 2) + 0.0033(p - 3)) \quad (2.1)$$

Donde **K** es el índice de Erodabilidad,  $M = (\% \text{ limo} + \% \text{ arena muy fina}) \cdot (100 - \% \text{ arcilla})$ , **MO** es la materia orgánica del suelo en porcentaje, *s* es la estructura del primer horizonte de suelo, *p* = parámetro de permeabilidad.

La erodabilidad del suelo y el factor topográfico fueron analizados como lo describe la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Regla de decisión de la susceptibilidad a la erosión del suelo, los resultados se describen en la figura 3.1.

		<i>Rangos del factor topográfico</i>				
		Muy bajo 0 - 5	Bajo 5 - 10	Medio 10 - 20	Alto 20 - 40	Muy alto > 40
<i>Rangos del factor - K</i>		1	2	3	4	5
Bajo	0.01 - 0.02	1 Mb	2 Mb	3 B	4 M	5 A
Medio	0.02 - 0.04	2 Mb	B	M	A	Ma
Alto	> 0.04	3 B	M	A	Ma	Ma

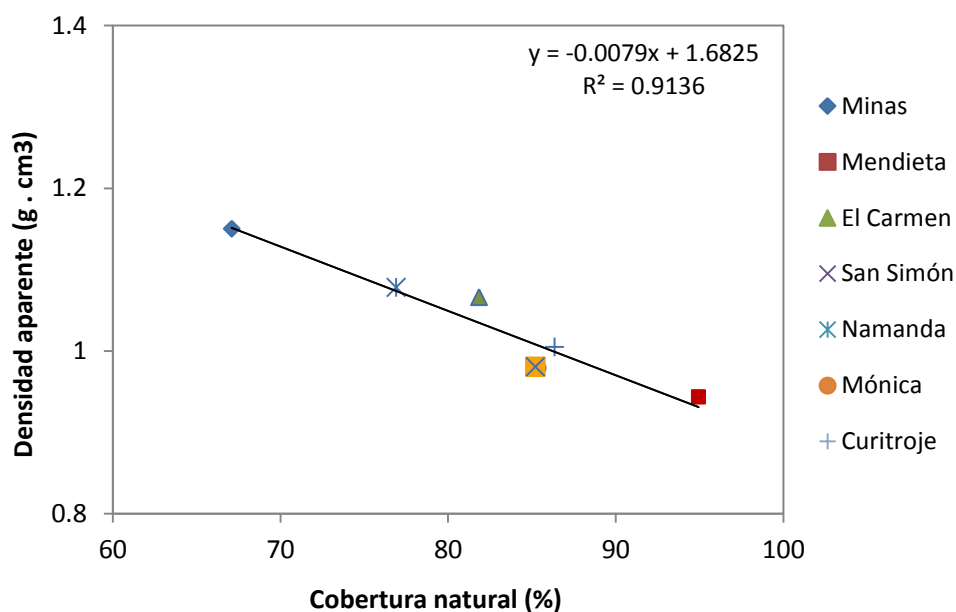
### 3.2.3. Indicadores del agua.

Muestras de agua fueron tomadas en cada uno de los sitios de captación de agua de las cuencas de estudio. Cada sitio fue georreferenciado para su análisis posterior usando los sistemas de información geográfica (SIG). Para determinar la calidad del agua fueron utilizados los índices WQI desarrollado por Brown (1970) como parámetro físico-químico; y como parámetros biológicos el EPT (Lenat, 1988) y el IMEERA-B, adaptado para los Andes Ecuatorianos por Villamarín et al. (2013). Estos resultados fueron analizados con los porcentajes de la cubierta vegetal natural de las cuencas de estudio.

### 3.3. Resultados y discusión

#### 3.3.1. Susceptibilidad a la erosión

Como describe la figura 3.1, observamos una muy alta y alta susceptibilidad a la erosión principalmente en la zona alta de las cuencas (cumbres de las montañas), donde las condiciones del suelo y la pendiente son de igual manera superiores. Sin embargo la vegetación del bosque natural en esas áreas podría disminuir la generación de escorrentía y arrastre de sedimentos del suelo, incluso sobre estos filos de cordilleras donde las lluvias tienen mayor intensidad. Considerándose a la cobertura vegetal natural como el factor más importante para evitar la erosión del suelo de estas cuencas, mientras que los otros dos factores estudiados serían secundarios para las cuencas de estudio.



**Figura 3.2.** Densidad aparente del suelo en función del porcentaje de cobertura vegetal natural de las cuencas.

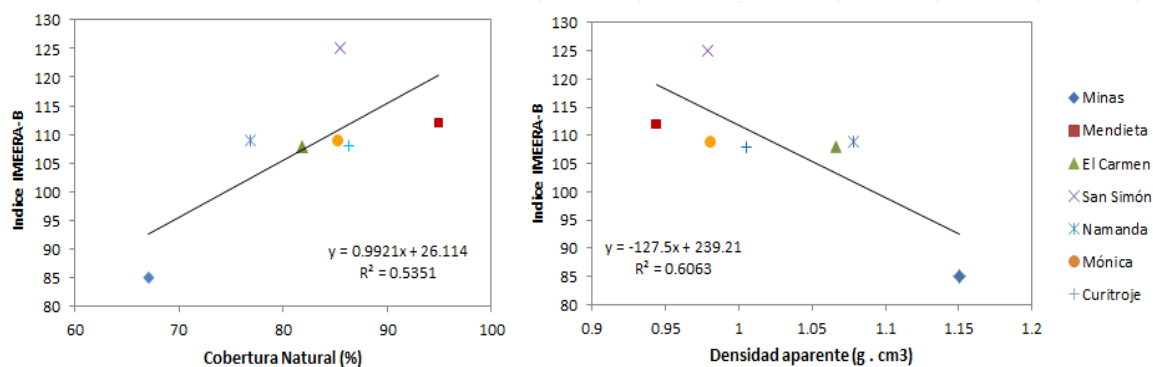
La figura 3.2 muestra una alta relación de dependencia ( $R^2 = 0.91$ ) entre los porcentajes de cobertura vegetal nativa de las cuencas con los valores medios de (DA)

de las mismas. La cuenca Minas que tiene el porcentaje más bajo de cobertura vegetal describe una mayor DA del suelo, y lo contrario la cuenca Mendieta que posee el mayor porcentaje de cobertura vegetal natural, describe una menor DA. Las cuencas Mónica y San Simón son coincidentes en porcentajes de cobertura vegetal natural y la densidad aparente del suelo. Como lo describen algunos autores, la densidad aparente es un indicador del grado de compactación del suelo, lo que podría dificultar la infiltración del agua en el suelo y por ende favorecer en los procesos de generación de escorrentía superficial. Así mismo a los suelos con mayor densidad aparente se los considera a los arcillosos o con bajos porcentajes de MOS, mientras que los suelos con baja densidad serían los que gozan de un mayor aporte de materia orgánica y con texturas más livianas. El contenido de materia orgánica incrementa el proceso de agregación y la estabilidad de los agregados del suelo (Ellies et al., 2005).

### **3.3.2. Calidad del agua**

Si bien como describe la metodología se analizaron otros parámetros para determinar la calidad de agua de estas cuencas como el WQI (índice físico-químico) y el EPT; estos no mostraron una relación significativa de dependencia con la cobertura vegetal natural de las cuencas; sin embargo la figura 3.3 describe una mediana relación ( $R^2 = 0.54$ ) entre el indicador biológico IMEERA-B con la cobertura vegetal natural de las cuencas. Y si se analizara las condiciones de compactación del suelo de las cuencas en función de la densidad aparente de las mismas, se observa una mejor relación con el indicador biológico IMEERA-B, probablemente por lo mencionado anteriormente del aporte de materia orgánica al suelo de las cuencas en sitios cercanos a las riberas de los ríos.





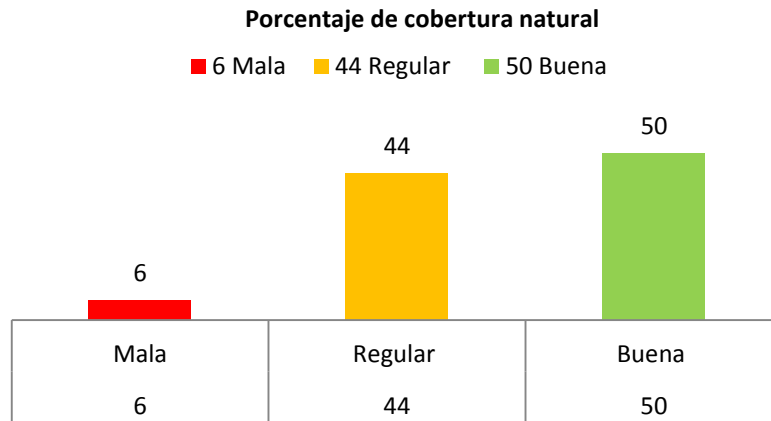
**Figura 3.3.** Indicador biológico de calidad de agua en función de la cobertura vegetal natural (a) y la densidad aparente del suelo (b).

La densidad aparente del suelo aumentó significativamente ( $P < 0.05$ ) en áreas de pastos comparado con áreas de suelo del bosque nativo. Este aumento en la D.A., provoca a su vez un decrecimiento en la porosidad del suelo, relacionado con la pérdida de MOS y la compactación del suelo. La disminución de las características físico-químicas del suelo, fueron afectadas por los procesos erosivos y por la disminución acelerada de la cobertura vegetal.

En las cuencas de estudio fue utilizado el criterio propuesto por Villalobos (2005), para determinar “*in situ*” la condición hidrológica de la cobertura vegetal en función al porcentaje de suelo cubierto por la vegetación. Cuando el dosel de la cubierta protege más del 75% del suelo se considera como buena, cuando lleva los valores entre 50 – 75% es considerado regular, y al cubrir menos del 50% del área del suelo se considera mala.

De acuerdo a los criterios antes expuestos la figura 3.4 describe los porcentajes en relación a la cobertura del suelo de las cuencas. El 50% de las mismas presenta condiciones buenas, el 44% regulares y el 6% tiene malas condiciones.



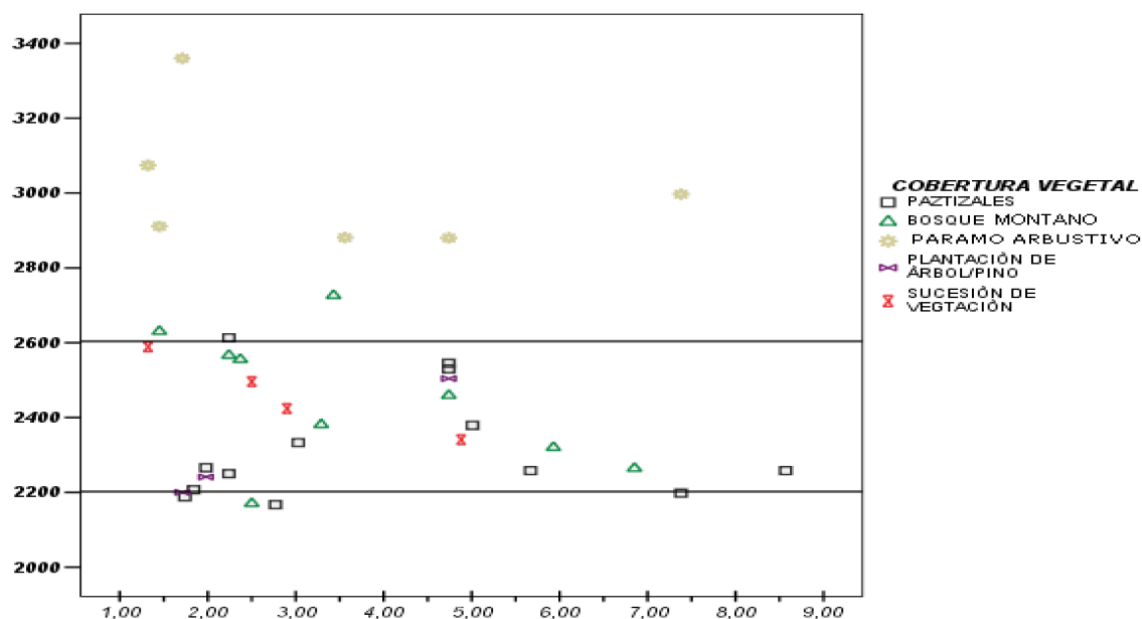


**Figura 3.4.** Condición hidrológica de las cuencas de estudio en relación a cómo la cubierta vegetal protege el suelo.

Los rangos altitudinales de los diferentes tipos de cobertura vegetal muestreados en las cuencas fueron: Pastizales desde 2167m hasta 2613m s.n.m.; Plantaciones de árboles (Pino) desde los 2200m hasta los 2504m s.n.m.; Sucesión de vegetación desde los 2341m hasta los 2589m s.n.m.; Bosque Natural desde 2170m hasta 2726m s.n.m.; Bosque Natural/Filo (Páramo arbustivo) desde los 2880m hasta 3360m s.n.m.

Cobertera (1986), describe una estrecha relación entre la temperatura y precipitación media anual con y el contenido en materia orgánica en suelos agrícolas bajo las mismas técnicas de cultivo. Y, Jordán (2006), manifiesta que sería posible establecer la proporción de la MOS en función del clima, ya que este influye tanto en la producción de biomasa de los ecosistemas como en la transformación posterior de la MOS. En nuestro análisis del área local (ecosistemas húmedos tropicales) observamos que más tiene influencia la cobertura vegetal que el clima en el factor de temperatura (Figura 3.5). El clima lo estamos relacionando en nuestro caso con la altitud (disminuye 0.6 °C por cada 100 de ascenso); y la precipitación en estas cuencas alto andinas es directamente proporcional, a mayor altitud mayor precipitación, por tanto este factor

climático podría estar influyendo en la acumulación de la MOS para las zonas altas de las cuencas.



**Figura 3.5.** Relación del MOS (%) con la altitud (m s.n.m.), en función de la cobertura vegetal.

En la figura 3.5, se muestra a los pastizales con los más altos porcentajes de MOS. De acuerdo al análisis estadístico (Anexo 2, Tabla 31), no se obtuvo ninguna correlación entre MOS y cobertura vegetal, lo cual se debe a que existe una alta dispersión de los datos (variabilidad de la MOS que van desde 1,32% hasta 8,57%). También los valores de la MOS sobre coberturas naturales son bajos, esto concuerda con lo descrito por Stevenson (1982), para suelos tropicales, los valores bajos podrían ser una manifestación de la alta actividad microbiana sobre la MOS, debido a las altas temperaturas.

### 3.3.3. Manejo de las cuencas

En la mayoría de las cabeceras de estas cuencas de estudio se han declarado como parte del Parque Nacional Podocarpus, y al mismo tiempo son las zonas que presentan mayor dificultad de acceso para actividades de deforestación, lo que les ha ayudado a

conservar gran parte de su vegetación natural. Sin embargo para gran parte de estas cuencas en la parte media y baja es donde se ve notablemente disminuida la calidad del agua, debido principalmente a actividades antrópicas como la ganadería y expansión urbana. Es por ello que de acuerdo a los resultados de estos proyectos conjuntos (suelo-agua) proponemos la necesidad de describir como políticas locales; corredores de conservación, mantenimiento un porcentaje de cobertura vegetal natural en la parte alta de las cuencas, así como la delimitación de 30m a lo largo de todas las fuentes de captación de agua para consumo en la ciudad “buffer”. El poder establecer un corredor de vegetación formado desde la cabecera de la cuenca con vegetación ribereña, hasta la desembocadura del río al canal urbano podría contribuir positivamente en la calidad de flora y fauna acuática y a la vez incrementar la calidad del agua. Este búfer de 30 m de ancho, por el largo del caudal del río también ayudaría a contrarrestar la fuerza del agua sobre el cauce del río evitando su erosión al momento en que se produzcan fuertes precipitaciones en cabecera. En estudios previos de estas cuencas se determinó que los conjuntos de comunidades de macro-invertebrados fueron más diversos y relacionados con cuencas cubiertas en gran parte por vegetación natural (Iñiguez-Armijos et al., 2014); que en cuencas que han sufrido fuertes procesos de deforestación o han cambiado su cubierta vegetal por pastizales.

De acuerdo a nuestros resultados, la cubierta vegetal natural es el factor más importante para la conservación de los suelos de estas cuencas de montaña, la propuesta también es establecer como zonas prioritarias de conservación del suelo, a los sitios con muy alto y alto riesgo de susceptibilidad a la erosión del suelo. En cuanto al manejo del suelo que las campañas de reforestación se dirijan en primera instancia a estos sitios denominados prioritarios, si en el caso su cobertura vegetal natural haya sido perturbada anteriormente.

### 3.4. Conclusiones

Estudiar estas cuencas que proveen un caudal considerable para consumo humano (>50%) del total, para la capital de provincia (Loja). Además de proveer un escenario paisajístico e influir en la estabilidad del ciclo hidrológico, disminuyendo el riesgo de inundaciones en la ciudad en la estación invernal o en eventos de fuertes lluvias. Los resultados demostraron que el cambio de la cubierta vegetal y la deforestación, han deteriorado considerablemente la calidad del suelo y agua.

Este estudio puede ser una útil para determinar la importancia de la cubierta vegetal en la gestión del territorio. Además, propone una regulación enfocada al manejo de zonas de amortiguamiento de bosques naturales y riberas de los ríos, que podría tener éxito al momento de aplicar una política local o sistema de soporte de decisiones (SSD) dirigida a la gestión del recurso hídrico en cuencas abastecedoras de agua.

### 3.5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por la Secretaria Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador (SENESCYT) beca doctoral 2008-2, y por proyectos de investigación financiados por la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL). Agradecemos a Carlos Íñiguez & M.F. Tapia-Armijos por su aporte en el desarrollo de esta parte del estudio.

### 3.6. Referencias

- Brown, R. 1970. A Water Quality Index – Do We Dare? *Water Sewage Works* 11, 339–343.
- Cobertera, E., 1993. *Edafología aplicada. Suelos, producción agraria, planificación territorial e impactos ambientales*", Cátedra, Madrid.

- Ellies, A., Ramírez, C., McDonald, R., 2005. Organic matter and wetting capacity distribution in aggregates of Chilean soils. *Catena*. 59, 69-78.
- FAO, 2006. Guidelines for soil description. Food and Agriculture Organization of the United Nations (p. 109). Rome. doi:10.1017/S0014479706384906
- FAO, 2010. Global Forest Assessment 2010: Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Forestry Paper 163, Rome. [www.fao.org/forestry/fra/en/; accessed: verified March 2013]
- Íñiguez–Armijos, C., Leiva, A., Frede, H.G., Hampel, H., Breuer, L., 2014. Deforestation and Benthic Indicators: How Much Vegetation Cover Is Needed to Sustain Healthy Andean Streams? *PLoS ONE* 9(8): e105869.
- Jordán López, A., 2006. Manual de edafología. Universidad de Sevilla. 144pp.
- Lenat, D.R., 1988. Water quality assessment of streams using a qualitative collection method for benthic macroinvertebrates. *Journal of the North American Benthological Society*. 7, 222–233.
- Ochoa-Cueva, P., Frías, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J.A., Boll, J. 2015. Spatial estimation of soil erosion risk by Land-cover change in the Andes of Southern Ecuador. *Land degradation & development*. 26, 565-573. DOI: 10.1002/ldr.2219.
- Ochoa, P.A., et al., 2015. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk of a semiarid basin of the Andes. Aceptado en *Catena*.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook No. 703. (USDA: Washington, DC. EEUU).

- Soil Survey Staff, 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Rep. Vol. 42. US Dept. Agric.-Nat. Res. Cons. Serv., Washington, DC.
- Stevenson, F., 1982. Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions. John Wiley and Sons. New York. 443 pp.
- Tapia-Armijos, M.F., Homeier, J., Espinosa, C.I., Leuschner, C., de la Cruz, M., 2015. Deforestation and forest fragmentation in South Ecuador since the 1970s – losing a hotspot of biodiversity. PLoSONE. 10(9). e0133701.
- Villalobos, M., 2005. Diseño de drenaje superficial. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 97pp. Disponible en: <http://books.google.com.ec/books?id=i5d82Djs8qUC>.
- Villamarín, C., Rieradevall, M., Paul, M.J., Barbour, M.T., Prat, N., 2013. A tool to assess the ecological condition of tropical high Andean streams in Ecuador and Peru: The IMEERA index. Ecological Indicators. 29, 79–92.
- Wilkinson, B.H., y McElroy, B.J. 2007. The impact of humans on continental erosion and sedimentation. GSA Bulletin 119, 140–156.

## CAPÍTULO IV:

### **Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the Andes of Southern Ecuador**

This chapter was published in *Land Degradation and Development* **26**: 565-573 (2015)

**Accepted:** March, 2013 / **Published:** August, 2015



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### **MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO Y AGUA EN LOS ANDES DEL SUR DE ECUADOR**





## CAPÍTULO IV:

### 4. Spatial estimation of soil erosion risk by land-cover change in the Andes of Southern Ecuador

#### Abstract

Ecuador has the highest deforestation rate in South America causing large scale soil erosion. Inter-Andean watersheds are especially affected by a rapid increase of the population leading to the conversion of large areas of montane forest into pasture and cropland. In this study we estimate soil erosion risk in a small mixed land use watershed in the southern Andes of Ecuador. Soil loss was estimated at a spatial resolution of 30 m, using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) where the RUSLE factors were estimated based on limited publicly available data. Land cover maps for 1976, 2008 and 2040 were created assuming increasing deforestation rates over the ensuing decades. Greater erosion rates are estimated for succession areas with agricultural cropland and pasture with maximum values of  $936 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , where slopes and precipitation amounts are greatest. Under natural forest vegetation, the estimated soil erosion rates are negligible ( $1.5$  to  $40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) even at steep slopes and higher elevations where rainfall amounts and intensities are generally higher. When the entire watershed has undergone substantial deforestation in 2040, erosion values may reach  $2021 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . Vegetation cover is the most important factor for potential soil erosion. Secondary factors are related to rainfall (*R*-factor) and topography (*LS*-factors). The spatial predictions of potential soil erosion have only limited meaning for erosion risk, this method provides an important screening tool for land management and assessment of land cover change.

**Keywords:** soil erosion; RUSLE; land cover change; future scenarios; *C*-factor; Ecuadorian Andes.

## 4.1. Introduction

Human impacts such as deforestation and road and building construction increase the risk of soil erosion (Harden, 1988). These impacts cause accelerated reduction in soil fertility and increased sedimentation in rivers (De Koning et al., 1999; Vanacker et al., 2007). Replacing forests and other natural vegetation with pasture and cropland causes soil erosion in the world and in South America in particular (Mosandl et al., 2008). In many parts of the world, however, the consequences of land cover change are not well understood due to a lack of adequate spatial and temporal information about land degradation.

Ecuador has the greatest deforestation rate in South America. Between 2000 and 2010 four million ha of forest per year were lost (FAO, 2010). More than half of the land surface is being affected by erosion. The growing population puts additional pressure on the natural ecosystems (montane forest and páramo).

Inter-Andean watersheds are especially affected, due to agrarian reform of the 1960s and 1970s and a rapid increase of the rural population (Harden, 1988). Large areas of tropical montane landscapes are currently being deforested, typically by slash and burn activities for vegetation clearance (Podwojewski *et al.*, 2002; Molina *et al.*, 2007), followed by establishing cropland and pasture. In deforested areas, unprotected soil experiences sealing or crusting, disturbance of soil structure, and rain drop impact (splash erosion), leading to increased soil erosion potential, especially in steep terrain. This is a key problem for the management and conservation of soil in the 21st century.

Studies related to deforestation and its influence on land degradation, as well as knowledge about soil erosion, are extremely rare in Ecuador compared to other tropical countries (Zehetner and Miller, 2006; Schoorl *et al.*, 2006; Romero *et al.*, 2007). Spatial information for Ecuador only is available at the national scale with low-resolution data

(De Koning *et al.*, 1999); however high resolution potential erosion maps are needed for the sustainable management of Andean watersheds.

The Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Renard *et al.*, 1997) is extensively used worldwide to estimate annual soil loss with rainfall, topography and landuse data. Unfortunately, rainfall data are scarce in tropical high mountains because rain gauges are generally located near the valley bottoms (Podwojewski *et al.*, 2002). The global data fields, for example, the WorldClim database, cannot provide the necessary high resolution, and these data reveal great uncertainties in regions such as the Andes of Ecuador. An advantage of the RUSLE is that distributed erosion rates in watersheds without station data can be estimated, when knowledge about watershed characteristics and local hydro-climatic conditions are available (Andrade *et al.*, 2010).

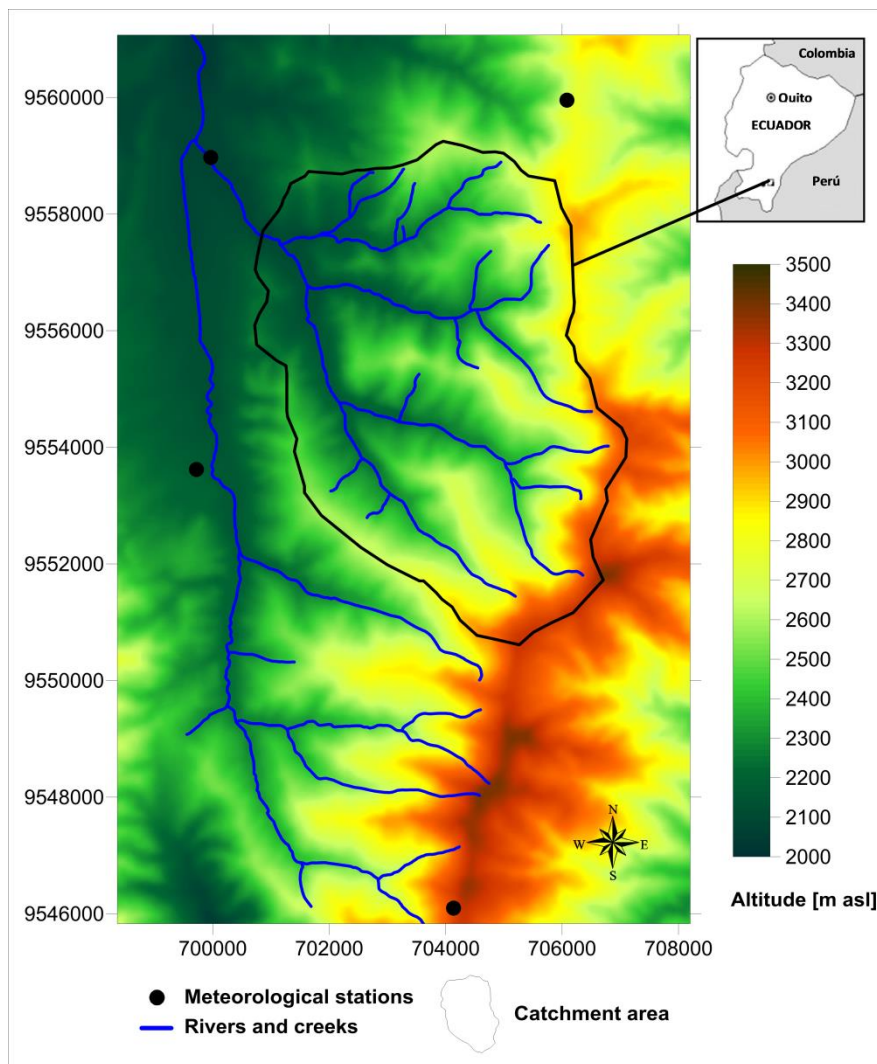
The objective of this study was to generate high-resolution potential erosion maps using the RUSLE to estimate soil erosion in a small watershed in southern Ecuador. Potential soil erosion was calculated in an ungauged watershed, using ground measurements and satellite data. The soil erosion of the past, present and possible future scenarios caused by the land-cover changes was evaluated.

## **4.2. Materials and methods**

### **4.2.1. Study area**

The Zamora Huayco watershed is located on the eastern flank of the Inter-Andean region near the provincial capital of Loja. The watershed borders the Podocarpus National Park in the east and south, and the city of Loja in the north and west. The watershed provides a considerable amount of water for the city of Loja. The watershed is situated between 3°59'24" S and 4°03'48" S and 79°11'02" W and 79°09'04" W, and covers an area of 37.3 km<sup>2</sup> (Figure 4.1). Elevation ranges from 2120 to 3420 m a.s.l.

The watershed is classified as composed of sedimentary rocks with a variable lithologic base of metamorphic rocks, with shales, conglomerates and overlying sandstones. The predominant soils are Entisols in the middle and lower parts, and Inceptisols in the upper part of the study area (MAG-PRONAREG-ORSTOM, 1984). Since the 1960s, natural vegetation near the valley bottom has been widely cleared to create pastures and cropland.



**Figure 4.1.** Location of the Zamora Huayco watershed, Southern Ecuador.

Two precipitation maxima occur during the year, one large rainy season from December to April and one drier season in September and October (Figure 4.2(a); Rollenbeck & Bendix, 2011). During the main rainy season, high intensity rainfall often

occurs because of thunderstorms passing over the Inter-Andean valleys. The annual mean temperature ranges from 15.3 °C in the valley bottom to 7.3 °C on the mountain ridge.

#### 4.2.2. *RUSLE Model*

Potential soil loss was calculated using the RUSLE equation (Renard et al., 1997):

$$A_{(x,y)} = R_{(x,y)} K_{(x,y)} LS_{(x,y)} C_{(x,y)} P_{(x,y)} \quad (4.1)$$

Where:  $A_{(x,y)}$  is average soil loss produced by water erosion per unit of area ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ),  $R_{(x,y)}$  is the erosivity factor caused by rain ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ),  $K_{(x,y)}$  is the erodibility factor of the soil ( $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ),  $LS_{(x,y)}$  is the slope length and steepness factor,  $C_{(x,y)}$  is the coverage and management factor, and  $P_{(x,y)}$  is the support practices factor. All factors are considered to be spatially constant for every 30 m grid cell  $(x,y)$  within the DEM.

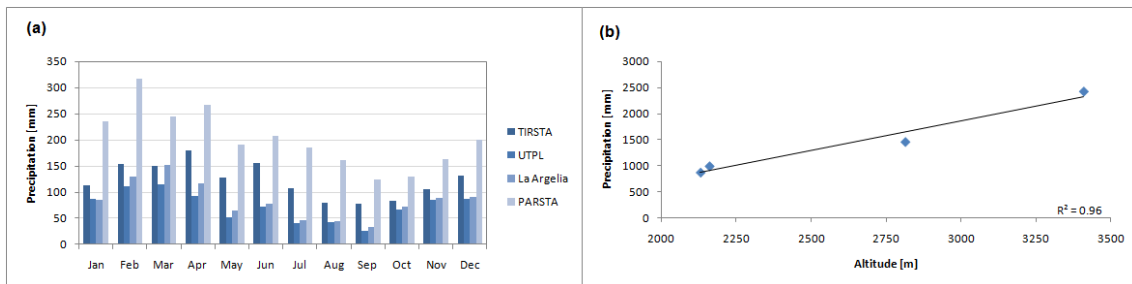
Individual point or location data for each factor were interpolated using Kriging to obtain a spatial resolution of 30 m (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2007). The resulting values for each grid cell  $(x,y)$  were multiplied to determine the spatial distribution of  $A_{(x,y)}$ .

#### 4.2.3. *Rainfall – Runoff R-Factor*

Precipitation data for the study area were obtained by an operational network of three automatic climate stations and an official weather station of INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología), the Ecuadorian National Weather Service (Figure 4.1). Two automated stations from Thiess-Clima (Thiess, Germany) are situated at the mountain ridge (TIRSTA: 2814 m. a.s.l.; PARSTA: 3410 m. a.s.l.). These stations provided hourly precipitation data starting in 1998. Another automated station (DAVIS Instruments, USA) was installed in 2004 near the valley bottom inside the UTPL

(Universidad Técnica Particular de Loja) campus at 2190 m. a.s.l., and provided 5 min precipitation data. An official INAMHI weather station (La Argelia: 2160 m. a.s.l.) is situated inside the campus of the Universidad Nacional de Loja (Table 4.1).

To calculate the monthly mean  $EI_{30}$  values and the yearly mean  $R$ -factor for every grid cell all measured precipitation data were summed to monthly rainfall totals. Due to the different measurement intervals and the different time periods of the available precipitation data, a 10-year time period from 2000 to 2009 was selected. Data for the UTPL station were only available from 2004 to 2009. For this reason, synthetic values were calculated using the official INAMHI La Argelia station data (New *et al.*, 2000) calculating the relationship between monthly mean precipitation at the UTPL station and the La Argelia station. This relationship was used assuming that the relative difference between the stations was stationary over time (synthetic values) (Fries *et al.*, 2012).



**Figure 4.2.** (a) Average monthly precipitation between 2000 and 2009; (b) linear regression, correlation between rainfall amount (mm yr<sup>-1</sup>) and altitude (m).

The 10-year data set of all stations was averaged for each month to obtain the mean monthly precipitation. To regionalize the mean monthly precipitation, kriging with detrended raw data was applied (Fries *et al.*, 2012). This offers more flexibility than simple cokriging, particularly when local trends as the dependence between precipitation and terrain elevation must be considered.

In mountainous regions, precipitation–elevation relationships often vary significantly between region, slope and exposure because of the influence of wind (Johansson & Chen, 2005); however, the majority of the watershed has the same exposure, and the prevailing wind direction is from the east. As Figure 4.2(b) shows, a very good correlation ( $R^2 = 0.96$ ) between precipitation and elevation was obtained. The highest annual mean precipitation was measured at the south-eastern mountain top (2500 mm), decreasing to the north-west down to the valley bottom (900 mm; Figure 4.2.(a), Table 4.1).

**Table 4.1.** General conditions of weather stations near the study area (based on 10-year average).

Weather station	UTMX_17S	UTMY_17S	Altitude (masl)	Average yearly precipitation (mm)
TIRSTA	706084	9559957	2814	1464
UTPL	699964	9558976	2130	877
La Argelia	699719	9553625	2160	998
PARSTA	704138	9546097	3410	2429

To calculate the  $R$ -factor, Equation 4.2, proposed by Renard & Freimund (1994) was used, because the  $R$ -factor equation of Renard et al. (1997) needs rainfall intensity, which was not available inside the study area. Renard & Freimund (1994) included the modified Fournier index (MFI) with values greater than 55 mm.

$$R_{(x,y)} = 95.77 - 6.081 F_{(x,y)} + 0.4770 F_{(x,y)}^2 \quad (4.2)$$

Where:  $R_{(x,y)}$  is the  $R$ -factor in ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ y}^{-1}$ ) at grid cell  $(x,y)$  and  $F_{(x,y)}$  is the MFI.

The MFI was calculated following Arnoldus (1977):

$$F_{(x,y)} = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2(x,y)}{P_{(x,y)}} \quad (4.3)$$

Where:  $pi^2_{(x,y)}$  is average monthly precipitation and  $P_{(x,y)}$  is average annual precipitation, at grid cell (x,y).

**4.2.4. Soil Descriptions: Field and Laboratory Analyses**

Surface soil (0–20 cm depth) in the watershed was systematically sampled using a soil auger of 5.4 cm of diameter and a volume of 458 cm<sup>3</sup>. Each soil sample was composed of 8 to 10 sub-samples, which were mixed. Land cover, soil management and relief near each sampling point were recorded. To obtain at least one soil sample representing the prevailing land cover in each quadrant of 1 km<sup>2</sup>, a total of 38 soil samples were georeferenced using a Garmin GPS (© 2007-2009 Garmin International, Inc., Kansas 66062, USA; [www.garmin.com](http://www.garmin.com)) (accuracy 3m).

In the laboratory, the soil samples were air dried and sieved through a 2-mm mesh. The soil particles’ size distribution was determined using the hydrometer method (Bouyoucos, 1962). The proportion of very fine sand was obtained by wet sieving. Soil organic matter (SOM) was determined by humid oxidation using the Walkley–Black method (Soil Survey Staff, 1996). The permeability for each land-cover class was estimated qualitatively in the field by the method of variable load and structural class. These soil parameters were coded with Wischmeier’s nomograph (Renard et al., 1997; Table 4.2).

**Table 4.2.** Maximum and minimum soil parameters (0–20 cm) of 38 points to calculate the K–factor.

	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	VFS (%)	OM (%)	Permeability Parameter <sup>a</sup>	Structural Parameter <sup>a</sup>	K–factor calculated	Slope (%)
Minimum	7	16	49	4.5	1.3	2	1	0.025	10
Maximum	25	30	78	22.6	8.6	5	3	0.054	115

VFS, very fine sand; OM, organic matter.

<sup>a</sup>Coded values with the Wischmeier monograph.



#### 4.2.5. *K* – Factor

The rate of soil loss per rainfall erosion index unit (*K*-factor) was calculated according to Renard et al. (1997) and converted into SI units, as follows:

$$K = 0.277 \cdot 10^{-6} M^{1.14} (12 - OM) + (0.0043(s - 2) + 0.0033(p - 3)) \quad (4.4)$$

Where: *K* is the erodibility rate, *M* is (% silt + % very fine sand)\*(100 – % clay), *OM* is organic matter (%), *s* is a structural parameter based on the first soil horizon, *p* is a permeability parameter.

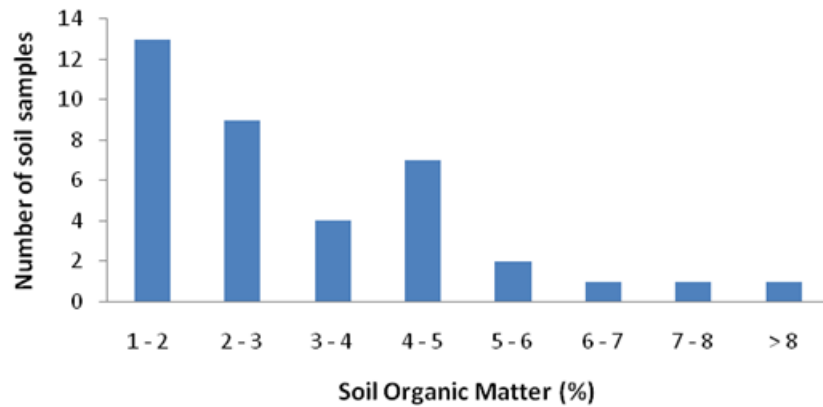
For soils containing more than 4% organic matter (Table 4.2), this value was fixed at 4% because the Wischmeier monograph does not show SOM greater than 4% (Romero et al., 2007; Figure 4.3). Finally, the *K*-factor was calculated for all sample points and interpolated using Kriging (Pérez-Rodríguez et al., 2007).

#### 4.2.6. *L* and *S* Factors

A 30-m DEM of the Zamora Huayco watershed was downloaded from Institut de Recherche pour le Développement. The *L* and *S* factors were derived from the 30-m DEM. The general assumption is that with increasing slope length and slope steepness, greater overland flow velocities occur and, therefore, more soil may be detached and transported. We used the continuous form of the equation for computation of the *L*-factor at a point  $r=(x,y)$  on a hillslope based on Mitsova et al. (1996) as follows:

$$L = (m + 1) \left( \frac{A(r)}{a_0} \right)^m \quad (4.5)$$

Where: *A* is the upslope contributing area, or flow accumulation (*m*),  $m=0.5$ , and  $a_0=22.1\text{m}$  (length of standard USLE plot). The value for *m* was set for sloping terrain based on McCool et al. (1989).



**Figure 4.3.** Distribution of observed percent SOM in the study area.

For the  $S$ -factor, we used the logistic equation proposed by Nearing (1997) expressed as a single continuous function of slope gradients:

$$S = -1.5 + \frac{17}{(1+e^{(2.3-6.1 \sin\theta)})} \quad (4.6)$$

Where:  $S$  is the slope steepness factor and  $\theta$  is the slope angle in degrees. Equation 3.6 closely follows the RUSLE.  $S$ -factor for slopes up to 22% and also represents slopes greater than those from which the RUSLE relationships were derived (Nearing, 1997).

#### 4.2.7. Land-Cover and C-Factor maps of 1976, 2008 and 2040

The C-factor was calculated for each grid cell (x,y) using land cover maps. The 2008 land-cover map was created using August 2008 ASTER Satellite images and July 2007 for cloudy sections. Each image was projected into the UTM coordinate system, WGS84 datum, zone 17S. The Cost model (Chavez,1996) was applied to reflectance conversion with atmospheric correction on all the scenes while incorporating deep object subtraction. The geometric correction was performed in ERDAS 9.2 (ERDAS 9.2, Leica Geosystems Geospatial Imaging, Norcross, GA 30092-2500, USA) software using as reference the rivers and roads previously selected and validated. Topographic

correction with the ATCOR 3 algorithm using a DEM ASTER removed differences in solar illumination influenced by relief, developed for mountainous areas with abrupt topography (Richter, 2007). The Supervised Classification module of ERDAS was used for image classification of the ASTER images by selecting ‘maximum likelihood’, ‘Mahalanobis distance’ and ‘minimum distance’ and the parametric decision rule. To determine classification accuracy, the overall accuracy and kappa coefficient were used for each land-cover, where the class resulting from image classification is compared against the class corresponding to the reference points inside the study area.

The land-cover map of 1976 was based on aerial photographs that have an approximate spatial scale of (1:60,000). Aerial photographs were visually classified (grey scale, texture and context supported by map MAG-PRONAREGORSTOM, 1984). The polygons of aerial photographs were manually digitized in vector format. Land-cover data on the photographs were converted to raster format and adjusted by ‘resampling’ (up-scaling to the grid of the satellite image) so that the data are comparable. From this base map, relative land-cover change over a period of 32 years was calculated.

The deforestation rate from 1976 to 2008 was determined using the method by Puyravaud (2002). Relative land-cover change from 1976 to 2008 was extrapolated to 2040 to obtain hypothetical land-cover changes for the next 32 years assuming that the rate of deforestation, pasture and urban growth will proceed in the same manner as during the period from 1976 to 2008 (De Koning et al., 1999; Vanacker et al., 2007; Bendix & Beck, 2009; Table 4.3). Socio-economic and political factors were not taken into account, because it is immensely difficult to quantify (Verburg et al., 2004).

**Table 4.3.** C-Factor values and relative proportion of the land-cover class for 1976, 2008 and 2040.

Land-cover class	Average annual C-factor	Land area (%)		
		1976	2008	2040
Urban area	0.1	---	0.4	2.2
Montane forest	0.003	64.5	43.2	---
Disturbed montane forest	0.013	28.4	21.3	43.2
Succession	0.150	---	12.6	21.3
Pasture ( <i>Pennisetum</i> sp.)	0.200	6.8	15.8	15.8
Reforestation ( <i>Pinus patula</i> ; <i>Eucalyptus globulus</i> )	0.200	---	4.9	12.6
Agriculture ( <i>Zea mays</i> ; <i>Solanum tuberosum</i> )	0.53 <sup>a</sup>	0.3	1.8	4.9

<sup>a</sup> This value was averaged because subsistence agriculture is predominately maize (*Zea mays*) in combination with beans (*Phaseolus vulgaris*). The rotation could be with potatoes (*Solanum tuberosum*) to complete the annual cycle.

Specific values for each land-cover class were taken from the RUSLE guide tables (Renard et al., 1997; Andrade et al., 2010). The C-factor values ranged from 0.003 (montane forest) to 0.53 (agriculture). The C-factor for agriculture was estimated by averaging the values of the predominant cultivated crops in the study area (maize with beans and potatoes).

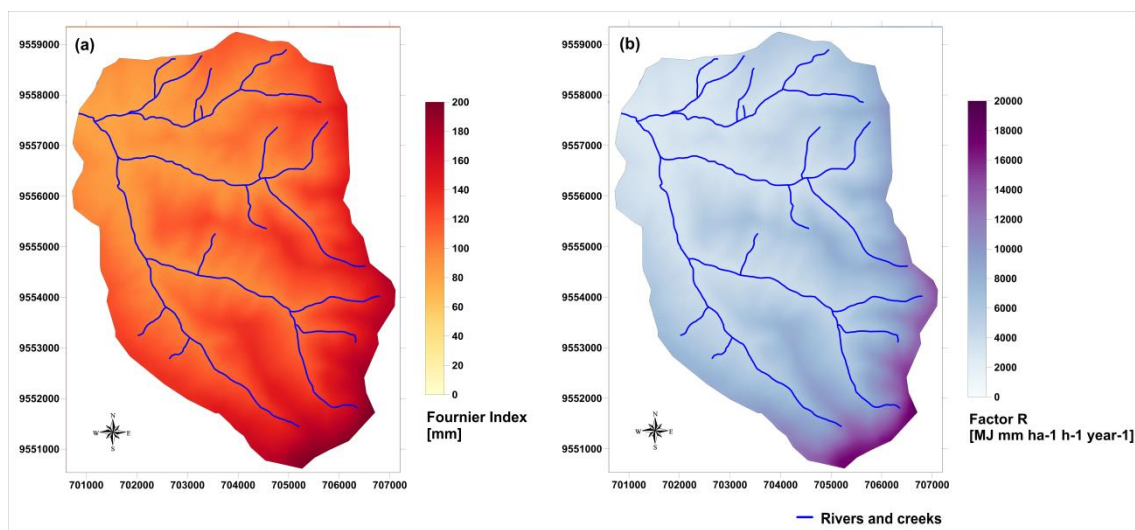
#### 4.2.8. P – Factor

The P-factor reflects the effect of support practices to reduce soil erosion. These practices could not be derived from the land-use maps. Agricultural practices, observed during soil sampling in the north-western part of the watershed, consist of upslope–downslope tillage without any significant contour tillage or terracing. Therefore, the P-factor was set to 1.

### 4.3. Results and Discussion

#### 4.3.1. Erosivity Map Layer – MFI

The spatial distribution of the *MFI* and annual *R*-factor for the study area depends mainly on elevation, because of the observed relation between precipitation and altitude (Figures 4.2 and 4.4(a, b)). Annual *R*-factor values ranged from 2550 to 18842 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, with a mean annual *R*-factor of 7364 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, for a mean annual rainfall of 1442 mm. In comparison, Renard and Freimund (1994) estimated an *R*-factor of 7000 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> based on average annual precipitation of 1400 mm. For the Colombian Andes, Sonder (2004) found a mean *R*-factor value of 8094 MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>.



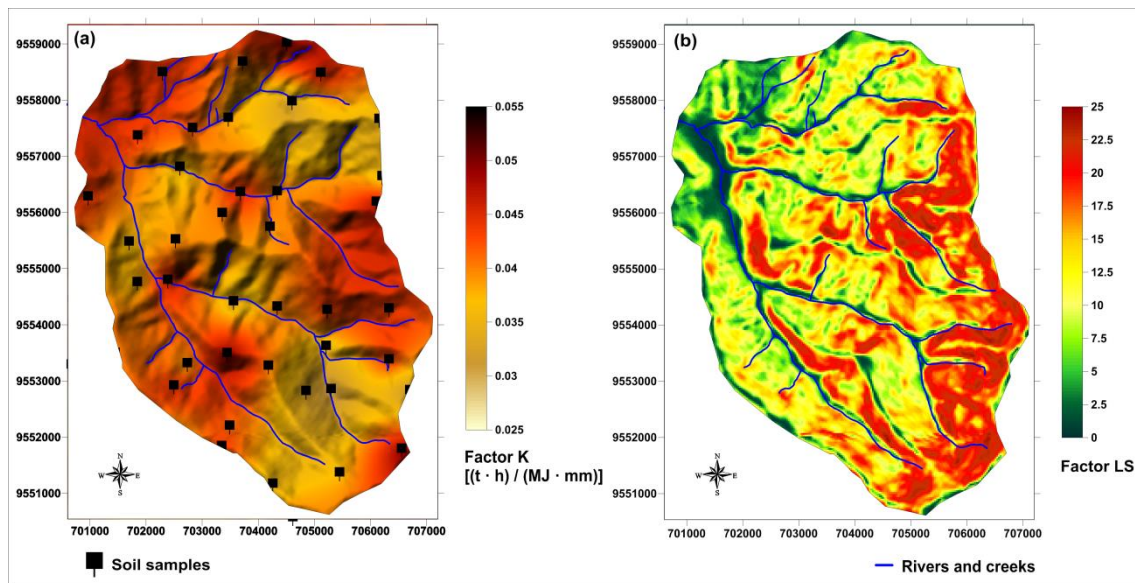
**Figure 4.4.** (a) Spatial distribution of MFI; (b) spatial distribution of annual *R*-factor.

As expected, Figure 4.4(b) shows the greatest rainfall erosivity in the south-eastern part of the watershed, where elevation and annual rainfall are highest. From the southeast to the north-west, the erosivity decreases. The precipitation–elevation relationship is an alternative for developing a high-resolution precipitation map; however, gradients can only be applied to watersheds located on the same mountain

ridge and within a reasonable distance of a meteorological station. Starting at the eastern ridge, precipitation amounts decrease quickly to the west and north-west.

#### 4.3.2. Soil Erodibility and Slope Steepness Maps

$K$ -factors ranged from 0.027 to 0.049  $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$  (Table 4.2 and Figure (4.5a)), based on the predominant soil textures of loam and clay loam. The mean value for the entire watershed was  $0.038 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ .



**Figure 4.5.** (a) Spatial distribution map of  $K$ -factor; (b) spatial distribution map of  $LS$ -factors.

Figure 4.3 shows that the soil samples in the study area have medium to high SOM content (over 2%). Romero et al. (2007) described similar characteristics in Andean soils in northern Peru. The low SOM contents in Andean soils decrease the infiltration capacity, making them more prone to runoff generation (Molina et al., 2007). In the Andes of northern Ecuador, Zehetner & Miller (2006) identified a close relationship between climate and spatial distribution of soil properties (e.g. texture, SOM and permeability). According to this relationship, at the higher elevations and low SOM, it may be suitable to declare priority areas for conservation and reforestation by local governments.

The soils of the Zamora Huayco watershed are moderately erodible in general (Figure 4.5a) with only a slight decrease in erodibility at the bottom of the valley. This may be due to the input of organic matter from cattle in pastures or from conservation of natural vegetation on mountain ridges. Reduced soil permeability through compaction by cattle trampling (Podwojewski et al., 2002; Molina et al., 2007) was not included in our analysis. For a few locations in our watershed where SOM was greater than 4%, the erodibility may be slightly overestimated (Figure 4.3).

The combined *LS* factors inside the study watershed range from 0.08 along the river bottoms and on the mountain ridges, to 24.38 at very steep slopes (Figure 4.5(b)). The steepest slopes are displayed near the creeks and at the upper eastern part of the catchment, reaching slope gradients up to 115% (or 50 degrees).

#### **4.3.3. Land-Cover Map Layer**

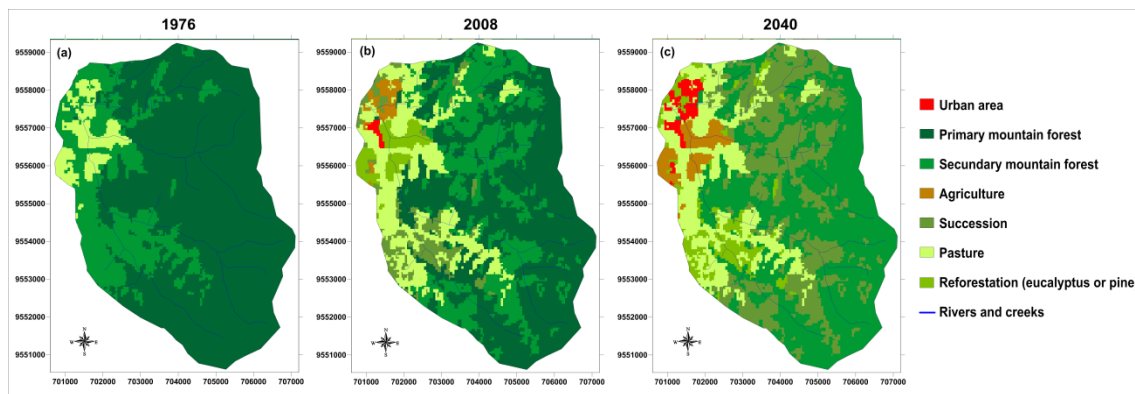
The land-cover classification inside the Zamora Huayco watershed was divided into vegetation formations (Figure 4.6), representing seven different land-cover classes: (i) urban area, (ii) montane forest, (iii) disturbed montane forest, (iv) agriculture, (v) succession, (vi) pasture and (vii) reforestation (*Eucalyptus globulus* or *Pinus patula*). The classification accuracy was considered substantial according to kappa coefficient of 0.64 and overall accuracy of 0.75 (Grenier et al., 2008).

The deforestation rate between 1976 and 2008 was 0.96% annually. Fragmentation near the valley bottom started in 1976 (Figure 4.6.a). This fragmentation is characterized by disturbed montane forest and pasture (*Pennisetum sp.*) covering about 1,340 ha of the watershed as a direct response to land reform programs in the 1960s and 1970s. This reform did not cause a division of agricultural lands into smaller units ('minifundios') as in the central and northern areas of Ecuador (Podwojewski et al., 2002), but was the start of extensive livestock breeding efforts (Bendix & Beck,



2009).

In 2008, changes in land cover increased, where the relative cover of montane forest decreased to 43%, and disturbed montane forest was replaced by pasture. Exotic species of eucalyptus (*E. globulus*) and pine (*P. patula*) were introduced for commercial purposes, mainly in the 1970s and 1980s to protect erosion areas. Livestock began to expand in small areas near the valley bottom (Table 4.3).



**Figure 4.6.** Spatial distributions of land-cover maps of (a) 1976, (b) 2008 and (c) 2040.

For the future scenario (2040), Figure 4.6(c) shows the resulting spatial pattern of land cover. Urban areas could expand up the watershed to areas where agriculture currently dominates, a similar pattern of urban growth being witnessed in the city of Loja in areas with identical characteristics to our study area.

According to the latest population and housing census by INEC (2010), the Loja canton has 71,105 households and a population density of 115 person's km<sup>-2</sup>. The average rate of population growth between 1974 and 2010 was 0.92% per year, similar to the deforestation rate estimated for the study area for the same period; illustrating the urban population pressure of Loja city in the Zamora Huayco watershed. Our study is consistent with Podwojewski et al. (2002), and Zehetner & Miller (2006), showing that land use change in the Ecuadorian Andes will further increase as a result of continued population growth.



In 2040, montane forest could eventually disappear from the mountain valleys next to larger cities because of the current pressure on this ecosystem. Urban land cover was estimated to increase from 0.39 % (14 ha) in 2008 to over 2.22 % in 2040 (Table 4.3), assuming the nature of development remains the same. These areas will expand to zones of low angle slopes, which are currently used for agriculture and livestock breeding. The old pasture sites will be used for agriculture, whereas the disturbed montane forest will replace the undisturbed montane forest.

Figure 4.7a–c shows the *C*-factor for each land-cover class with data taken from Table 4.3 representing the vegetation distribution in land-cover maps for 1976, 2008 and 2040, respectively. The effect of land-cover change on the *C*-factor and the final soil erosion risk is clearly visible in the 2040 future scenario where the change in the natural land-cover produces greater erosion risk especially at sites with steep slopes and high rainfall amounts, as confirmed in the Andes of southern Ecuador by Molina et al. (2007) and Vanacker et al. (2007).

#### ***4.3.4. Average Annual Soil Loss in Past, Present and Possible Future Scenarios.***

Average annual soil loss ranged from 1.5 Mg ha<sup>-1</sup> to 936 Mg ha<sup>-1</sup> for the year 2008 (Figure 4.7b and 4.7e). The minimum values are found inside the montane forest or for shallow slopes, while the maximum values are found on agricultural land and on steep slopes covered by pasture. In comparison, Harden (1988) estimated erosion rates from 0 to 836 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> for soils in the Ecuadorian Andes, using a rainfall simulator experiment on agricultural lands, which are highly dependent on rainfall intensity and plot size.

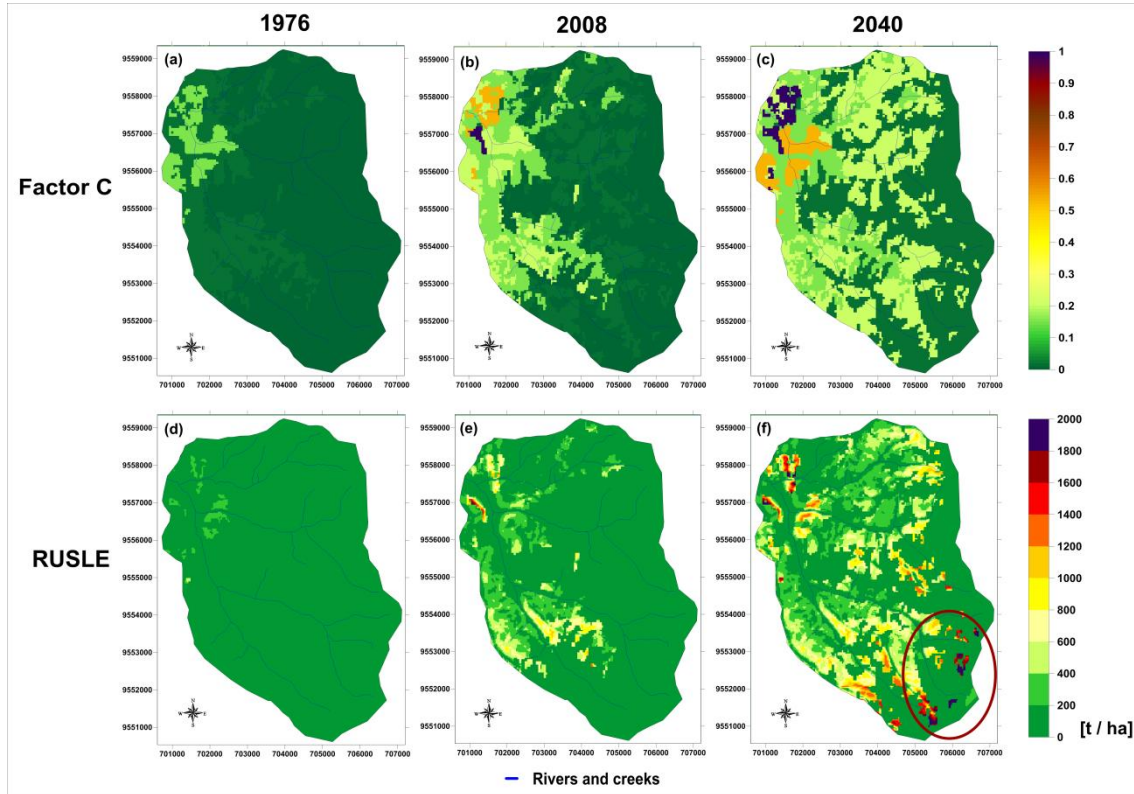
The greatest soil loss is estimated in the north-western part of the watershed (Figure 4.7e) where agriculture and pasture land are found on steep slopes and soils

prone to generate runoff. In this area, the reduced vegetative cover contributes to the formation of crusting and sealing processes, limiting soil infiltration capacity. Increased runoff and soil loss also likely remove nutrients needed for crop production (Molina *et al.*, 2007). Clearly, management practices in the study watershed could significantly decrease soil erosion risk. The upper mountain ridge in the southeast of the catchment has steep slopes and high levels of precipitation; however, these areas do not have the greatest estimated soil loss for 1976 and 2008. The soil in this area is protected by the montane forest that provides a high infiltration capacity and infrequent surface runoff (Molina *et al.*, 2007). Consequently, the estimated soil loss is lower, with values between 1.5 and 40 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. The general assumption that the *R* or *LS*-factors have the greatest influence on soil erosion is only valid for homogeneous vegetation covers. Cerdà (1998; 1999) showed that vegetation cover reduces runoff and erosion due to increased infiltration capacity and aggregate stability. Hence, we assume that vegetation cover (*C*-factor) exerts first-order control for present-day erosion rates at the watershed scale (Vanacker *et al.*, 2007), followed by the *R* and *LS* factors.

The importance of the vegetation cover for soil erosion can be observed by comparing the maps from 1976 and 2040 (Figure 4.6 and 4.7). In 1976, average annual soil loss was estimated from 0.13 to 486 Mg ha<sup>-1</sup>, which is notably lower than in 2008 due to the natural forest cover.

For 2040, average annual soil loss ranges from 3 to 2021 Mg ha<sup>-1</sup>, which is substantially greater than in 1976 and 2008. Inside the Venezuelan Andes, Andrade *et al.* (2010) estimated soil loss from 0 to 2558 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> possibly due to greater *LS*-factors, less dense vegetation cover and lower permeability and SOM. The 2040 *C*-factor distribution implies that most of the montane forest would be deforested and little disturbed montane forest would remain. Urban areas, agriculture and pasture land would

expand considerably, even on steeper slopes. This future scenario leads to a dramatic increase in potential soil erosion (Figure 4.7f). The 2040 scenario is a worst case, because deforestation rates hopefully will decrease in the future compared to the past.



**Figure 4.7.** Spatial distribution map of average annual soil loss for 1976, 2008 and 2040 in relationship with C-factor.

Figure 4.7 shows the importance of identifying priority areas for conservation in the watershed. In the future, population growth and increased urban areas will increase pressure on the natural ecosystem; hence soil conservation practices will become even more important (Vanacker et al., 2007). The local government has made some efforts to reforest with native species in logged areas or pasture land. The maps developed in this research help locate priority areas for reforestation and soil conservation mainly where the *R*, *C* and *LS* factors are very high.

#### **4.3.5. Methodological limitations**

Determination of more representative soil loss estimation for past, current and future scenarios was limited by available meteorological station data with rainfall intensities. In addition, future *R*-factors are uncertain because of future global climate regimes, which may increase or decrease rainfall amounts and intensities.

The estimated values for this area in the Ecuadorian Andes obviously are more reliable for the past and present scenarios than for future scenarios. Small long-term changes in the *K* and *LS* factors may occur because of different SOM management and landslides, which, in turn, are linked to vegetation cover and structure (*C*-factor). Estimation of future landslides and the resulting changes in topographical and soil conditions is a topic of further research.

#### **4.4. Conclusions**

The *C*-factor (land cover) was identified as one of the principal factors for soil erosion risk in the Zamora Huayco watershed. When land-cover management is poor, the typical assumption that *R* and *LS* are the most important factors in soil erosion estimation may not hold true. On the mountain ridge, where climatic and topographic conditions are most extreme, high values of potential soil erosion were estimated for 2040 after change in land-cover composition (montane forest).

The Zamora Huayco watershed manifests high susceptibility to soil erosion due to the pressure on the natural forest cover caused by human activities. The best strategy to reduce land degradation is conservation of natural vegetation. In the near future, conservation practices need to be implemented for agricultura and livestock grazing and dairy production in the study area. Additionally, steep slopes should be protected from intensive land use. Spatial and temporal results show that the *RUSLE* is a good

screening tool to estimate soil erosion potential in this area and to target reforestation and soil conservation by local communities. However, more research is needed at different scales and using more robust models to determine sediment transport more accurately.

#### **4.5. Acknowledgements**

This research was partially supported by SENESCYT (Secretaria Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación) and by the PCI-Iberoamerica (Programa de Cooperación Interuniversitaria—AECID no. A/024199/09). We particularly acknowledge contributions of J. A. Gómez, Instituto de Agricultura Sostenible—CSIC; A. L. Squires at the University of Idaho; and C.A. Ochoa and the staff of the Laboratorio de suelos agrícolas—UTPL.

#### **4.6. References**

- Arnoldus HMJ. 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin* 34: 39-51.
- Andrade O, Kappas M, Erasmi S. 2010. Assessment of Erosion hazard in Torres Municipality of Lara State (Venezuela) Based on GIS. *Interciencia* 35: 348-356.
- Bendix J, Beck E. 2009. Spatial Aspects of Ecosystem Research in a Biodiversity Hot Spot of Southern Ecuador – An Introduction. *Erdkunde* 63: 305-308.
- Bouyoucos GJ. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54: 464-465.
- Cerdà A. 1998. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types.

- Catena 32: 73-86.
- Cerdà A. 1999. Parent material and vegetation affect soil erosion in eastern Spain. *Soil Science Society of American Journal* 63: 362-368.
- Chavez JPS. 1996. Image-based atmospheric corrections revisited and improved. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing* 62: 1025-1036.
- De Koning GHJ, Veldkamp A, Fresco LO. 1999. Exploring changes in Ecuadorian land use for food production and their effects on natural resources. *Journal of Environmental Management* 57: 221-237.
- FAO. 2010. Global Forest Assessment 2010: Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Forestry Paper 163, Rome. [www.fao.org/forestry/fra/en/; accessed: verified March 2012]
- Fries A, Rollenbeck R, Nauss T, Peters T, Bendix J. 2012. Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology* 152: 17-30.
- Grenier M, Labrecque S, Benoit M, Allard M. 2008. Accuracy assessment method for wetland object-based classification. In *GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-4/C1, G.J. Hay, T. Blaschke and D. Marceau (Eds.), pp. 285–289 (Calgary, AL: University of Calgary).
- Harden C. 1988. Mesoscale estimation of soil erosion in the Rio Ambato drainage, Ecuadorian Sierra. *Mountain Research and Development* 8: 331-341.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2010. Censos de Población y Vivienda desde 1974 hasta 2010. Cruz Roja Ecuatoriana, Loja, Ecuador.

- Johansson B, Chen D. 2005. Estimation of areal precipitation for runoff modeling using wind data: a case study in Sweden. *Climate Research* 29: 53-61.
- MAG-PRONAREG-ORSTOM, 1984. Mapa de Suelos: Loja 1:200,000. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Programa Nacional de Regionalización and Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Printed in IGM. Quito.
- McCool DK, Foster GR, Mutchler CK, Meyer LD. 1989. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE* 32: 1571-1576.
- Mitasova H, Hofierka J, Zlocha M, Iverson LR. 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems* 10: 629-641.
- Molina A, Govers G, Vanacker V, Poesen J, Zeelmaekers E, Cisneros F. 2007. Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use. *Catena* 71: 357-370.
- Mosandl R, Günter S, Stimm B, Weber M. 2008. Ecuador suffers the highest deforestation rate in South America. In: Beck E, Bendix J, Kottke I, Makeschin F, Mosandl R. (eds.), *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador*. Ecological Studies 198, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany: 37-40.
- Nearing MA. 1997. A single, continuous function for slope steepness influence on soil loss. *Soil Science Society of America Journal* 61: 917-919.
- New M, Hulme M, Jones P. 2000. Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate* 13: 2217-2238.
- Pérez-Rodríguez R, Marques MJ, Bienes R. 2007. Spatial variability of the soil erodibility parameters and their relation with the soil map at subgroup level. *Science*

- of the Total Environment 378: 166-173.
- Podwojewski P, Poulenard J, Zambrana T, Hofstede R. 2002. Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management* 18: 45-55.
- Puyravaud JF. 2002. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management* 177: 593-596.
- Renard KG, Freimund JR. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE. *Journal of Hydrology* 157: 287-306.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McCool DK, Yoder DC. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook No. 703. US Department of Agriculture: Washington, DC.
- Richter R. 2007. Atmospheric and Topographic Correction for Satellite Imagery: Atcor-2/3 User Guide, Version 6.3, January 2007. Germany: DLR-German Aerospace Center and Remote Sensing Data Center, 134 p.
- Rollenbeck R, Bendix J. 2011. Rainfall distribution in the Andes of southern Ecuador derived from blending weather radar data and meteorological field observations. *Atmospheric Research* 99: 277-289.
- Romero CC, Stroosnijder L, Baigorria GA. 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena* 70: 105-113.
- Schoorl JM, Claessens LFG, Lopez Ulloa M, Koning GHJ de, Veldkamp A. 2006. Geomorphological analysis and scenario modelling in the Noboa - Pajan area, Manabi province, Ecuador. *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband* 145: 105-118.



- Soil Survey Staff. 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Rep. Vol. 42. US Dept. Agric.-Nat. Res. Cons. Serv., Washington, DC.
- Sonder K. 2004. Soil Erosion in Andean Cropping Systems: The Impact of Rainfall Erosivity. PhD Thesis. Institute for Plant Production and Agroecology in the Tropics and Subtropics, University of Hohenheim.
- Vanacker V, von Blanckenburg F, Govers G, Molina A, Poesen J, Deckers J. 2007. Restoring dense vegetation can slow mountain erosion to near natural benchmark levels. *Geology* 35: 303-306.
- Verburg PH, Schot PP, Dijst MJ, Veldkamp A. 2004. Land use change modelling: Current practice and research priorities. *GeoJournal* 61: 309-24.
- Zehetner F, Miller WP. 2006. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena* 65: 201-213.





## CAPÍTULO V:

### **Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk of a semiarid basin of the Andes.**

This chapter was accepted with changes in *CATENA* (2015)

**Submitted:** 23 June, 2015 / **Accepted:** 16 August, 2015



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

### **MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO Y AGUA EN LOS ANDES DEL SUR DE ECUADOR**





## **CAPÍTULO V:**

### **5. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk of a semiarid basin of the Andes.**

#### **Abstract**

Understanding soil erosion processes in the Ecuadorian Andes with a tropical wet-dry climate and a variable topography, is fundamental for research on agriculture sustainable, environmental management, as well as for a stable water supply for the local populations. This work proposes method to estimate soil erosion risk in the semiarid Catamayo basin with limited data. The results show that the rainfall distribution and the erosivity along with the rugged topography, followed by the land cover (*C*-factor), are the most important factors to estimate soil erosion risk. In agricultural areas and where the ground cover is sparse in the dry season, the soil erodibility is the most important factor; while in protected areas with evergreen vegetation, the soil erosion risk is very low, even with steep slopes and high annual rainfall amounts. Soil erosion risk is higher in the centre and southwest than in the northeast of Catamayo basin. The methodology developed allows understanding of the soil erosion processes and the factors that lead to the spatio-temporal variability of soil erosion risk, and as a consequence improves the potential to achieve sustainability of this ecosystem through proposed conservation measures.

**Keywords:** Climate; dryland; *C*-factor; landform; soil erosion risk; Ecuadorian Andes

## 5.1. Introduction

The soil is a non-renewable resource (Zhao et al., 2013) that controls the biological, hydrological and geochemical cycles in the Earth System and provides the human societies with goods, services and resources (Berendse et al., 2015). There is a need to increase the prevalence of good practices to make land use and its management sustainable. In particular it is to understand soil erosion processes and the mechanism involved, and the role of soil properties and topography (Gabarrón-Galeote et al., 2013; Lieskovský and Kenderessy, 2014). Soil is principally degraded by water erosion threatening its sustainability and causing high losses of fertile soil, which is especially pronounced in areas that are subject to inappropriate agricultural management, land abandonment, intense road construction or wild fires (Cerdà et al., 2010; Palacio et al., 2014; Panagos et al., 2014).

Soil erosion by water is also the major environmental problem for agriculture in Ecuador (Ochoa-Cueva et al., 2015), especially in the southern and southwestern parts of the province of Loja, bordering Peru. The zone has unique environmental conditions, including rugged topography, which leads to strong changes in climate within short distances, amplifying soil erosion risk (Pineda et al., 2013). The El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon plays an important role in this area, because the high rainfall intensities during ENSO events cause higher soil erosion (Tote et al., 2011).

Furthermore, land use change in this area enhances soil erosion vulnerability (Castro et al., 2013). The expansion of agriculture has put pressure on natural ecosystems not only in this region, but also in the whole country. In Ecuador, the area cultivated with maize has increased about 20% since the 1990s (FAO, 2010a). Also, investments were expanded to US\$ 20.3 million during the period 2007–2009 (MAGAP, 2011), due to local and global demand of maize to produce ethanol and livestock feed. The primary



natural forest was mainly converted to secondary forest or replaced by irrigated crops and dry agriculture. This change to the natural ground cover continues mainly through slash and burn activities (Bahr et al., 2013; Espinosa et al., 2012; Winckell et al., 1997a).

Ecuador has the lowest percentage of natural forest of all countries in South America (FAO 2010b). In the study area, the ecosystem most threatened by deforestation is the Tropical Dry Forest. Deforestation has economic significance for firewood collection, construction and even for charcoal. Because of the high demand for timber, farmers prefer to exploit their lands for quick profits instead of long-term use of the forest (Castro et al., 2013).

Morgan (2005), shows an additional complication for these environments, which is caused by the need for water conservation and its ecological sensitivity. The change of the natural cover to pasture or crops, produces a rapid decline in organic matter content of the soil leading to a depletion and desertification risk.

In this context, our study area is the Catamayo basin in southern Ecuador, which is representative of the susceptibility of the region to land degradation because of the various climatic, topographic and land cover characteristics that lead to high soil erosion risk. However, understanding soil erosion process in this region is hampered by the scarcity of data on erosivity, erodibility and the traditional form of managing the soil resource (Ochoa et al., 2014; Romero et al., 2007; Tote et al., 2011), which is similar to many parts of the world (Cerdà, 1998; 2000; Chavez, 2006; Ruiz-Sinoga and Romero, 2010).

There are various empirical soil erosion models, such as the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Renard et al., 1997), Soil Loss Estimation Model for Southern Africa (SLEMSA) (Stocking, 1981), and the European Soil Erosion Model (EuroSEM)

(Morgan et al., 1998); which facilitate the calculation of soil erosion risk at different locations. However, to apply these models outside their area of origin and validation, local climatic and soil data is required as an additional input. For this reason, there is increasing interest to develop methodologies adapted to local conditions, identifying areas and quantifying soil erosion risk to propose sustainable management practices (Nigel and Rughooputh, 2010a; Zhao et al., 2013). The use of stochastic models to estimate rainfall erosivity for areas with limited data (i.e. generate synthetic data series from simple statistical characteristics of existing data) can be a useful tool to generate sequences of the necessary input data for empirical models (Morgan, 2005). Geographic Information Systems (GIS) can display the digital input data on cartographic maps and help to calculate, understand and explain the soil erosion risk for the required areas on the Earth's surface.

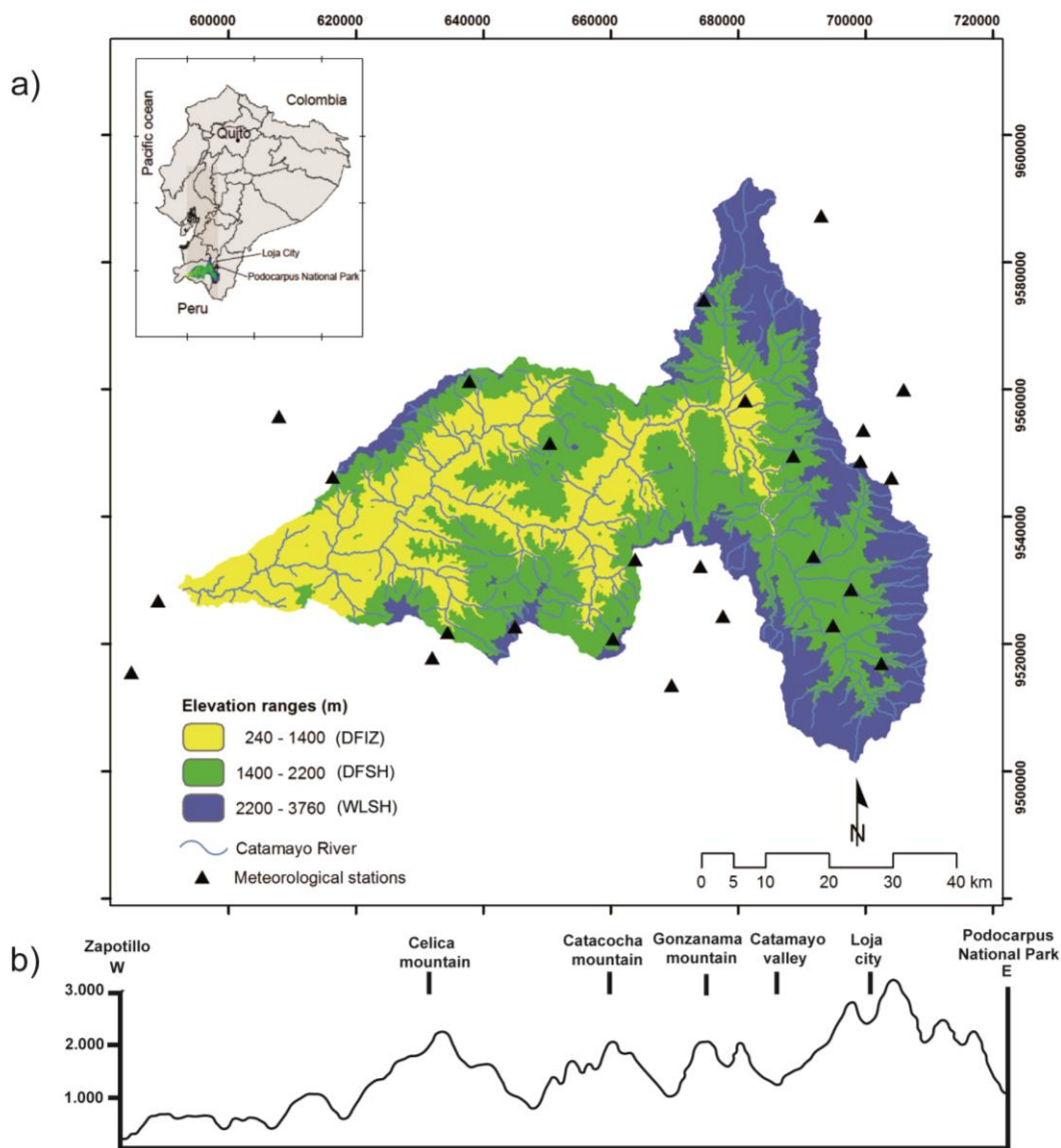
The method developed in this work attempts to provide the necessary seasonal details for estimation of soil erosion risk at regional scales, providing a methodology for policy-makers and managers to validate and approve their taken decisions.

This study, executed in the semiarid Catamayo basin, seeks to advance the understanding of soil erosion risk under strong anthropogenic pressure in the Ecuadorian Andes, examining (i) the influence of altitude and topography on the climatic factors of rainfall and air temperature; (ii) soil erosion risk during the dry and the wet season; and (iii) the most important factors controlling soil erosion vulnerability in this semiarid basin.

## 5.2. Study area

The Catamayo watershed is located between 3°39'S and 4°31'S (latitude), 79°05'W and 80°11'W (longitude) in the south of Ecuador, province of Loja, close to the border with Peru (Fig. 5.1). The Catamayo River has a length of 120 km, whose

watershed covers an area of 4184km<sup>2</sup>. This river is one of main tributaries of the Ecuadorian - Peruvian hydrographic system (17000km<sup>2</sup>), called the Catamayo–Chira Basin, which drains into the Pacific Ocean (Tote et al., 2011). The Catamayo River supplies potable water for the people in southern Ecuador and northern Peru and also for the irrigation systems inside the basin. The average annual water flow is 35m<sup>3</sup>/s, which significantly decreases during the dry season (22m<sup>3</sup>/s; Oñate-Valdivieso and Bosque, 2010).



**Figure 5.1.** Location of the Catamayo basin (a) natural breaks (elevation ranges), (b) altitudinal gradient of the southern highlands of Ecuador.

In comparison to the northern Andes of Ecuador, which are characterized by two distinct mountain ridges (Eastern and Western Cordillera), the southern highlands do not show this strict separation of the cordilleras. The Eastern Cordillera reaches altitudes up to 3900m a.s.l. near the Peruvian border, whereas the Western Cordillera only rises up to 2500m a.s.l. (Winckell et al., 1997b). The lower altitudes of the Western Cordillera facilitate the interaction with the Ecuadorian coast. The Catamayo Basin has a strong altitudinal gradient, reaching from 240m a.s.l. in the southwest to 3760m a.s.l. in the northeast (Fig. 5.1a).

The study area is characterized by an alternation between valleys and ridges within short distances, which leads to different climate conditions due to the fast changing topography (complex terrain; Fig. 5.1b). The air temperature mainly depends on the altitude (Richter et al., 2009), whereas the rainfall depends on wind speed and direction, which is modified by the topographic conditions, forming barriers and pathways for humidity transport (Fries et al., 2014). The rainy season is during austral summer (December to May), when the tropical easterlies are frequently interrupted by low westerlies, carrying moisture from the Pacific Ocean up to the study catchment (Pineda et al., 2013). In the dry season (June to November) the tropical easterlies prevail, bringing dry and sunny weather to the study area, because the higher Eastern Cordillera forms a barrier, blocking the humidity transport from the Amazon Basin.

The tropical dry forest grows in the vicinity of the Ecuadorian coast, due to the annual precipitation distribution (dry period > 6 months), evincing one of the most conspicuous features of this forest type: seasonal loss of the tree leaves (Maass and Burgos, 2011). Due to the influence of the south Pacific Anticyclone during most of the year, the vegetation is characterized by semiarid species (sparse brushy vegetation), especially at the valley bottom and at the western part of the study area, where altitudes are lower

and air temperature higher. Around 60% of the Province of Loja is covered by deciduous and semi-deciduous dry forests (Aguirre and Kvist, 2005). The maize production with conventional tillage is the dominant crop during the wet season (Castro et al., 2013), whereas sugarcane grows in secondary valleys (e.g. Malacatos, Vilcabamba) during the whole year using irrigation systems. Due to the general wind direction from the east (Amazon basin - tropical easterlies) the annual precipitation is highest at the upper eastern mountain ridge, where air temperature is lower and tropical humid forest and the páramo are formed (Richter et al., 2009).

### **5.3. Materials and methods**

Three landforms or zones were established in the basin using the ArcGIS 9.2 software and its classification tool called Natural Breaks. This tool identifies break points by picking the class breaks those best group similar values and maximizes the differences between classes. Our watershed was classified using as input data altitude and slope derived from a digital elevation model (DEM), as well as an air temperature map (Fig. 5.4) with a resolution of 100m x100m.

The first zone corresponds to the lower area called Dry-Farming and Irrigation Zone (DFIZ) from 240 to 1400 m a.s.l., with a mean annual temperature over 21°C. This zone generally shows slight slopes varying from 0 to 16%. The middle area, called Dry-Farming Southern Highlands (DFSH) reaches from 1400 to 2200 m a.s.l. and has a mean annual temperature between 15.5 and 21°C. The topography is characterized by steeper slopes from 16 to 30%. The areas above 2200 m a.s.l. are mainly located in the eastern part of the basin, called Wet-Land Southern Highlands (WLSH), which are characterized by extreme slopes between 30 and 58% and a mean annual air temperature below 15.5°C. Figure 5.1a, shows the three classified zones.

These three zones are consistent with the major morpho-pedological sets of the Southern Highlands of Ecuador proposed by Winckell et al. (1997b); the wet rocks masses in WLSH, the slopes of transition in DFSH and depressed areas with severe drought in DFIZ.

### 5.3.1. Rainfall erosivity

The climatic data for the study was provided by a network of 24 rain gauges operated by the Ecuadorian Weather Service (INAMHI), and 2 automatic meteorological stations from Thiess – Clima (Germany), situated at the eastern edge of the watershed (TIRSTA and PARSTA, see Table 5.1). For this study, data from 1990 to 2013 was used and quality controlled by INAMHI. Compared to other Ecuadorian basins the rain gauge density is higher 1.7 per 174 km<sup>2</sup> (Ochoa et al., 2014) in the Catamayo catchment and only few missing or erroneous data were found.

**Table 5.1.** General conditions of weather stations near the study area (based on 23-years average).

Nº.	Weather station	Lat. S	Long. W	Altitude [m a.s.l.]	Average rainfall [mm y <sup>-1</sup> ]	Average anual Temperature [°C]
1	Alamor	4° 01'	80° 01'	1250	1301	*
2	Cajanuma	4° 04'	79° 12'	2267	1212	*
3	Cariamanga	4° 20'	79° 33'	1950	1149	17,9
4	Catacocha	4° 03'	79° 38'	1808	862	*
5	Catamayo- (airport)	3° 59'	79° 22'	1250	397	24,2
6	Celica	4° 06'	79° 57'	1904	1017	15,6
7	Colaisaca	4° 19'	79° 41'	2410	1029	*
8	Changaimina	4° 13'	79° 31'	1935	1160	*
9	Gonzanamá	4° 13'	79° 25'	2042	1129	16,9
10	La Argelia	4° 02'	79° 12'	2160	998	16,2
11	Lauro Guerrero	3° 58'	79° 45'	1910	986	*
12	El Cisne	3° 51'	79° 25'	2218	1157	*
13	El Lucero	4° 23'	79° 28'	1180	847	*
14	El Tambo	4° 04'	79° 18'	1580	819	*
15	Malacatos	4° 12'	79° 16'	1453	668	20,0
16	PARSTA	4° 06'	79° 09'	3410	2429	6,8

17	Quilanga	4° 18'	79° 23'	1819	1144	*
18	Quinara	4° 18'	79° 14'	1559	854	20,8
19	Sabiango	4° 21'	79° 48'	734	856	*
20	San Lucas	3° 43'	79° 15'	2525	1093	*
21	Saucillo	4° 16'	80° 11'	328	618	*
22	Sozoranga	4° 19'	79° 47'	1427	1134	*
23	TIRSTA	3° 58'	79° 08'	2814	1464	9,9
24	Vilcabamba	4° 15'	79° 13'	1563	944	21,0
25	Yangana	4° 22'	79° 10'	1835	1126	19,1
26	Zapotillo	4° 22'	80° 14'	223	532	25,8

\* Rain gauge only.

However, the climatological records (average monthly precipitation PCP – air temperature TEMP) were analyzed with the “Climatol” R statistical package that contributes to the homogenization of climatic series (Guijarro, 2011). Thereby, outliers and errors in the data set were detected and not included in the study. After this, the gaps in the data series are filled by a homogeneity analysis using the Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) proposed by Alexandersson (1986). The SNHT is a statistical model that uses an orthogonal regression type II, which determines the range of the normalized data of a variable (V) with its mean and standard deviation. Finally, to check the consistence and homogeneity of information data of TEMP and PCP a double mass analysis was used. This analysis determines if there is a need for corrections of data, considering the changes in data collection procedures or other local conditions. Such changes may result from a variety of things including changes in instrumentation, changes in observation procedures, or changes in gauge location or surrounding conditions. The estimation of monthly accumulated volume of each station over a period of 23 years of data was used to apply this analysis. In this analysis the parameters considered were: (i) comparison of data accumulated between neighboring stations, (ii) similar altitude range and (iii) exposure to the same meso/synoptic climatological feature (e.g. El Niño-Southern Oscillation – ENSO). From the resulting 23-year data set, the PCP and TEMP were calculated.

To regionalize the average monthly precipitation, ordinary kriging was applied as Cedeño and Cornejo (2008) recommend for the spatial interpolation of rainfall data over complex terrains. Kriging is a method of interpolation based on statistical models that can predict unknown values from data observed at known locations. The air temperature was interpolated using kriging with detrended raw data, because the temperature depends directly on the altitude (Fries et al., 2012, 2009).

The erosivity (*R*-factor) was calculated using the equation proposed by Renard and Freimund (1994), because the *R*-factor equation of Renard et al. (1997) needs rainfall intensity, which is not available for the study area. Furthermore, the Modified Fournier Index (*MFI*) was integrated into the equation as Renard and Freimund (1994) recommended (see Eq. 1). The *R*-factor is a good local parameter of erosivity widely used in the tropics (Nigel and Rughooputh, 2010b).

$$R_{(x,y)} = 95.77 - 6.081 F + 0.4770 F^2 \quad (4.1)$$

where  $R_{(x,y)}$  is the *R*-factor in (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>) at grid cell (*x,y*) and *F* is the *MFI*.

The modified Fournier's index is expressed according to Arnoldus (1977):

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P} \quad (4.2)$$

where  $p_i$  is average monthly precipitation and *P* average annual precipitation.

To demonstrate the seasonal climate influence on soil erosion risk inside the watersheds the months of March (wettest month = rainy season) and August (driest month = dry season) were selected.  $EI_{30}$  was predicted using the average monthly precipitation as Chavez (2006) proposed. The coefficient of determination ( $R^2$ ) of this regression equation is 0.802 (Eq. 3):

$$EI_{30} = 3.88p - 37.23 \quad (4.3)$$



Where  $p$  is the monthly precipitation.

### **5.3.2. Soil erodibility**

The soils samples were taken along an altitudinal climo-sequence that crosses seven districts of the province of Loja in the Catamayo watershed. The sampling sites were selected under the condition to cover as many areas of different landforms, climate and altitude as possible. The sampling altitudes range from 240m to about 2400m a.s.l., including areas of tropical dry forest, agriculture and pasture. The areas of tropical humid forests could not be sampled efficiently because the majority of this land cover is declared nature reserve (Fig. 5.2). The sampling sites were geo-referenced using Garmin GPS (© 2007-2009 Garmin International, Inc., Kansas 66062, USA; [www.garmin.com](http://www.garmin.com)) (accuracy 3m).

According to the objectives of this study, the first mineral horizon of the soil profile (top-soil) was analyzed, because only this layer is directly affected by rainfall and runoff. However, also the B horizon was sampled for future studies, analyzing the nutrient availability inside the soils. The horizons were described separately by depth, assessment of texture and structure according to the FAO guidelines (2006). The whole sampling process was photographically recorded, taking pictures of the landscape and the soil profile. The permeability of each soil sampling site was estimated qualitatively in the field through hydraulic conductivity using a disc infiltrometer with the method proposed by Zhang (1997).

The soil sampling was part of another project, called “Generation of geo-information for land management nationwide” executed by the CLIRSEN (Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos) and by the National Secretariat of Planning and Development of Ecuador (SENPLADES). The samples were taken and methodologically analyzed by the Universidad Técnica Particular de

Loja (UTPL) and compared to the official information provided by the National Information System (SNI) of the Ecuadorian Government available online (<http://sni.gob.ec/web/inicio/planes-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial>). A set of 321 soil samples were used to estimate the soil erodibility in the Catamayo basin, which are displayed in Fig. 5.7.

In the laboratory, the soil samples were air dried and sieved through a 2mm mesh size. The soil particle size distribution was determined using the hydrometer method (Bouyoucos, 1962). The proportion of very fine sand was obtained by wet sieving. The soil organic matter (OM) was determined by humid oxidation using the Walkley–Black method (Soil Survey Staff, 1996). For more information about the laboratory analyzes, please refer to Ochoa-Cueva et al. (2015).

The soil erodibility ( $K$ -factor) was calculated according to Renard et al. (1997) and converted into SI units of  $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ , as follows:

$$K = 0.277 * 10^{-6} M^{1.14} (12 - OM) + 0.0043 (s - 2) + 0.0033 (p - 3) \quad (4.4)$$

where  $K$  is the erodibility rate,  $M$  is (% silt + % very fine sand)\*(100 – % clay),  $OM$  is organic matter (%),  $s$  is the soil structural class ( $s = 1$ : very fine granular,  $s = 2$ : fine granular,  $s = 3$ , medium or coarse granular,  $s = 4$ : blocky, platy or massive); determined on the first horizon of the soil profile according to the guidelines of FAO (2006), and  $p$  is a permeability class ( $p = 1$ : very rapid,  $p = 2$ : mod. to rapid,  $p = 3$ : moderate,  $p = 4$ : slow to mod.,  $p = 5$ : slow,,  $p = 6$ : very slow).

The  $K$ -factor layer was then calculated based on Eq. (4) for each soil sample point and the results interpolated in a GIS using ordinary kriging method. Pérez-Rodríguez et al. (2007) suggested derivation of soil erodibility from geologic or physiographic data using kriging. However, the geologic maps are not available for the

basin at a similar scale to our generated cartographic maps. In this work were used the soil erodibility, altitude and slope (DEM) to estimate a reliable distribution from the dispersed sample points.

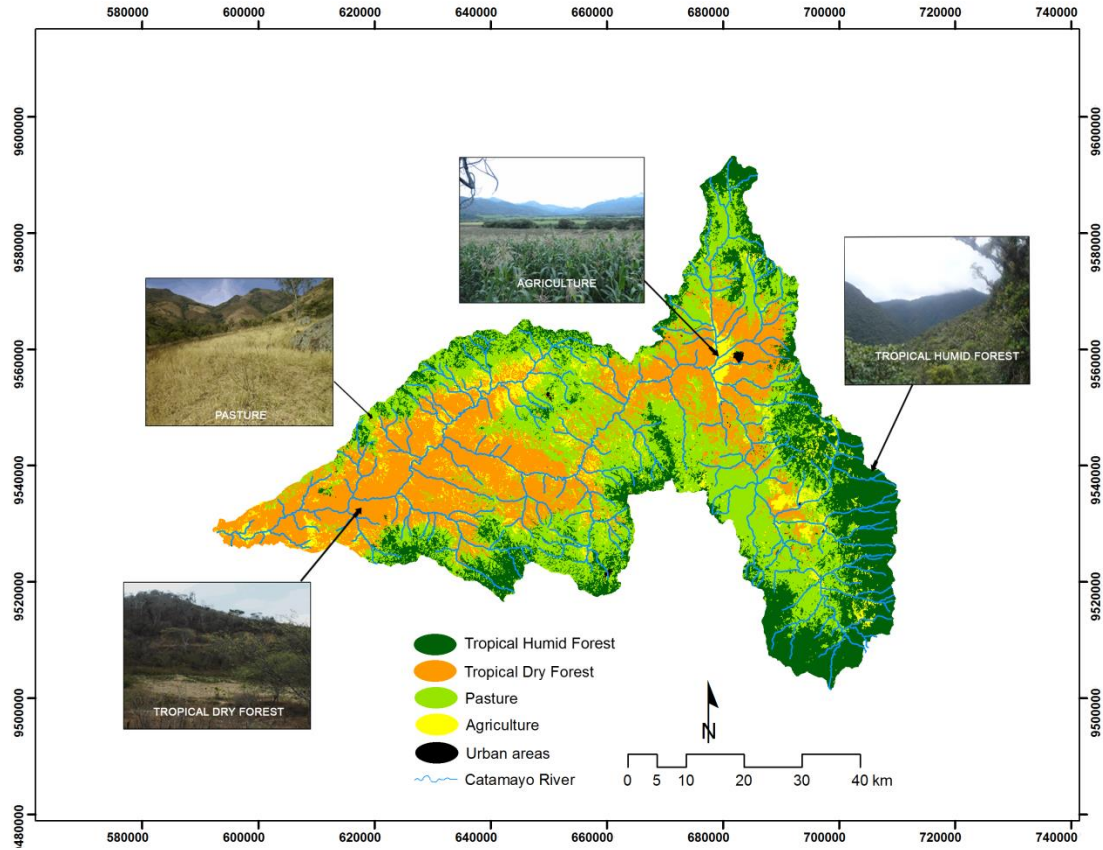
### **5.3.3. Topographic factor**

A 100m DEM of the study area was downloaded from Institut de Recherche pour le Développement in Ecuador. This DEM was used to parameterize the topographic factor (Nigel and Rughooputh, 2010a). This resolution selected depicts most of the agricultural production units (UPAs in Spanish) used in the province of Loja (one hectare up wards), according to the latest National Census for Agriculture and Livestock (<http://sinagap.agricultura.gob.ec/censo-nacional-agropecuario>) as well as to Bahr et al. (2013). According to FAO (2006); Nigel and Rughooputh (2010b) and field experience, the topographic factor of slopes inside the basin was classified into five levels of erosion risk: 0–5% (very low), 5–10% (low), 10–20% (moderate), 20–40% (high) and >40% (very high). In terms of topographic factors the watershed was divided into 3% very low, 6 % low, 16 % moderate, 41 % high and 33 % very high erosion risk areas.

### **5.3.4. Land cover factor**

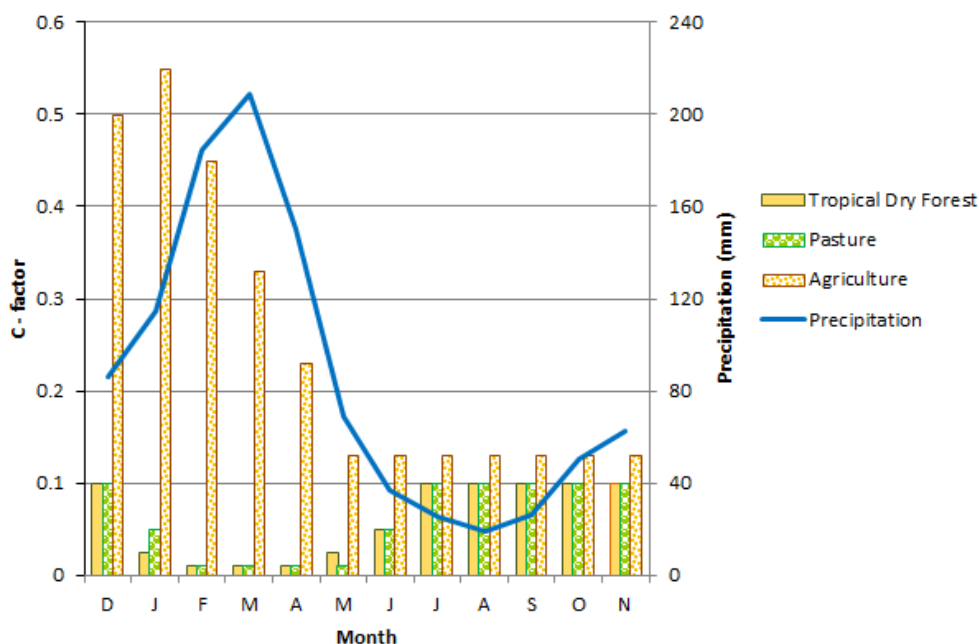
The land cover factor (C-factor) was defined from the official vegetation map and land use map of the province of Loja with a resolution of 1:25000 (Cueva and Chalán, 2010). The maps were developed from ASTER satellite images acquired by the Provincial Government of Loja (<http://glovis.usgs.gov>) and accuracy and quality checked by the Agency of Geographic Information and Remote Sensing of Ecuador - CLIRSEN. The resulting land cover map implies 29 types, including clouds and shadows. However, Oñate-Valdivieso and Bosque (2010) grouped the detailed regional land cover classification map of the Catamayo-Chira basin in only five main classes:

Evergreen-Tropical Humid Forest (THF), Tropical Dry Forest (TDF), Pasture, Agriculture, and other uses (urban areas and rivers), which were also used to calculate the soil erosion sensitivity maps in this study (Fig. 5.2).



**Figure 5.2.** Land cover map of the Catamayo basin.

The ground covers for TDF, pasture (seasonal grass) and agriculture were adapted to their seasonal variation using the specific monthly values as shown in Table 2. These specific values of the *C*-factor were taken from the RUSLE guide (Morgan, 2005), and the monthly variability was estimated by the degree of soil protection and the seasonal leaves and plant growth (0, 25, 50 and >75%). The first abundant rainfall starts in December (Fig. 5.3) initiating the annual plant growth. The influence of ground cover on the soil erosion risk is illustrated for the driest and wettest month as well as for the average annual (Table 5.2).



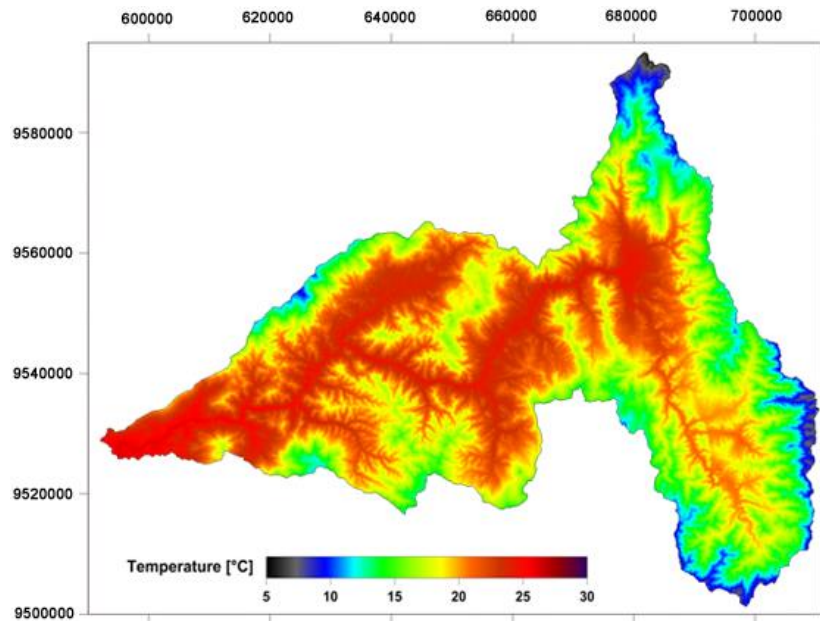
**Figure 5.3.** Monthly trend of soil erosion risk according to seasonal changes of the C-factor.

## 5.4. Results

The outputs of the methodology implemented in the Catamayo watershed (an area of 4184 km<sup>2</sup>) comprise a set of maps with a 100m cell size.

### 5.4.1. Relations found between altitude, topography and climatic conditions

The average annual air temperature over a period of 23 years is shown in Fig. 5.4. The air temperature is directly proportional to the altitude and decreases with height. Fig. 5.5a, described a very good correlation between temperature and altitude was found for the average annual temperature ( $R^2=0.92$ ). Also the air temperature has a good relationship with land cover see Figs. 5.2 and 5.4. In contrast to the air temperature the correlation between altitude and rainfall was ( $R^2=0.58$  – Fig. 5.5b), which is due to the topography that forms barriers and pathways for the humid air.

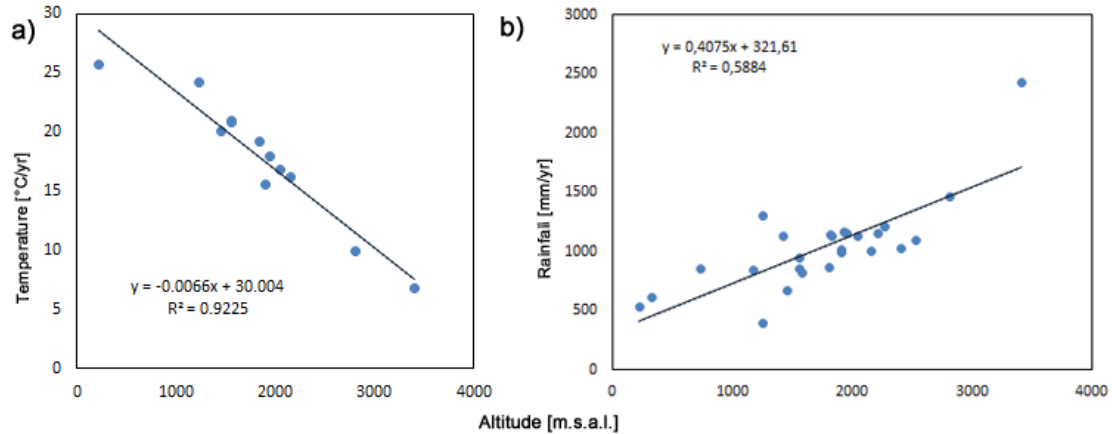


**Figure 5.4.** Annual air temperature in the study area.

The DFIZ contains semiarid areas at the outlet (Zapotillo canton 240 m a.s.l.) and arid areas at the upper eastern part (Catamayo City 1250 m a.s.l.). This discrepancy is caused by the orographic situation of Catamayo City (Fig. 5.1b), which is surrounded by mountain barriers, limiting the humidity transport from the west, north, east and south (Fig. 5.1a), leading to 12-month of aridity. Around the city rainfall generally occurs during the austral summer months when local thunderstorms are formed. However, due to the arid conditions annual rainfall quantities are very variable with highest values around 400mm yr<sup>-1</sup> (Table 5.1).

The lower parts of DFIZ have semiarid conditions (10 dry months) and show slightly higher rainfall quantities (between 400 and 650mm yr<sup>-1</sup>; Table 5.1). This is due to the orientation of the catchment, which is open to the southwest and humidity can enter the valley from this side. In the lower western parts rainfall occurs during the austral summer months too, when the general wind direction is frequently changed to the west, carrying humid air from the Pacific Ocean up to the valley. During ENSO-events rainfall quantities are significantly higher for the whole study catchment, due to

the higher sea surface temperatures of the Pacific, causing enhanced evaporation and therefore higher moisture content in the air.



**Figure 5.5.** Annual correlations between (a) air temperature and altitude, (b) rainfall and altitude.

The spatial distribution of precipitation as well as the monthly  $EI_{30}$  of the extreme months and the  $R$ -factor is shown in Fig. 5.6. The orientation of the mountain ridges favor or hinder the humidity transport into the watershed. During austral summer (March; Fig. 5.6a) the humid air, coming from the Pacific Ocean, is forced to ascend at the western mountain ridge forming a barrier (Celica Mountain) and precipitation is enhanced on the lower windward slope reaching highest values above  $300\text{mm month}^{-1}$ . Highest rainfall amounts inside the study catchment are observed at the Catamayo River outlet and at the southern mountain ridge. This is caused by the orientation of the valley outlet and the structure of the western barrier, which is lower at its southern parts, wherefore a higher content of moisture can pass the barrier, leading to higher rainfall amounts for this part of the valley. During austral winter (August; Fig. 5.6c) a severe drought is observed inside the study catchment, because wind comes from the east and humidity transport is blocked by the highest mountains of the eastern ridge (Podocarpus

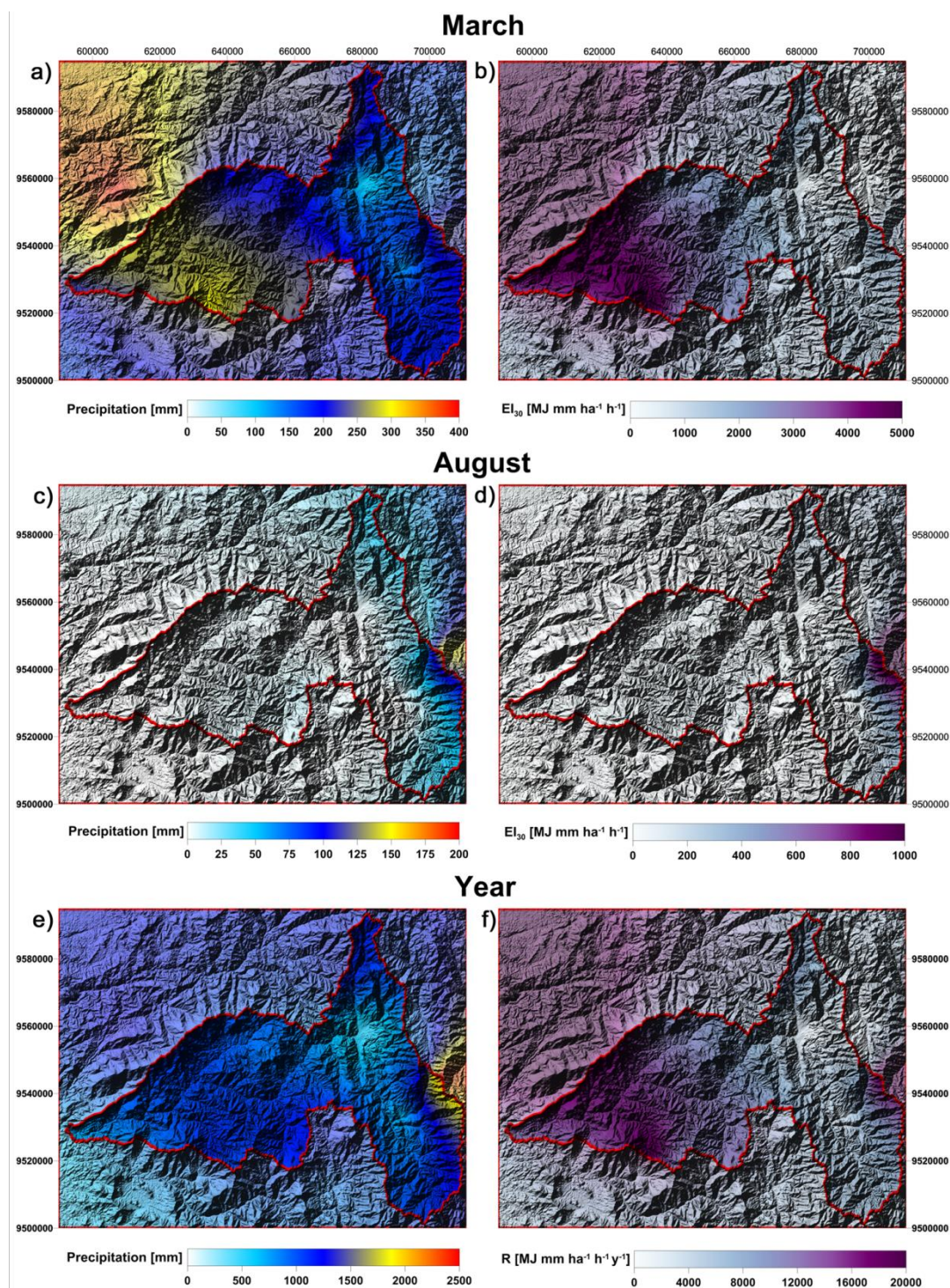
National Park). The eastern barrier hampers humidity transport inside the watershed; only the highest parts at the eastern barrier still receive small monthly rainfall amounts, which quickly decrease after the barrier further to the west. Highest rainfall amounts during the dry season are recorded from the Yangana station with values slightly above 90mm month<sup>-1</sup> (data not shown).

The average yearly rainfall (Fig. 5.6e) closely follows the distribution observed during March (Fig. 5.6a), but with significant higher values. In contrast to March, the annual map shows highest rainfall amounts at the upper eastern ridge inside the catchment (values up to 1100 mm yr<sup>-1</sup>). This is due to the general wind direction from the east, carrying the moisture from the Amazon Basin up to the eastern mountain ridge. The strong barrier effect of this mountain chain hampers the humidity transport inside the watershed; only the highest parts receive frequent precipitation.

#### 5.4.2. Soil erosion risk processes

Fig. 5.6 (right column) shows the influence of the weather conditions on the processes of soil erosion risk. The  $EI_{30}$  values ranged from 256 to 5022MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> for the wettest month (March). The lowest values are shown around the Catamayo City and the highest values are calculated for the western parts. For the driest month (August)  $EI_{30}$  values ranged from 0 to 521MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. In this month values are generally low for the entire basin, and only at the upper eastern ridge do the values increase (eastern barrier). The average annual value of the  $R$ -factor for the whole basin was found to be 10249MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>.

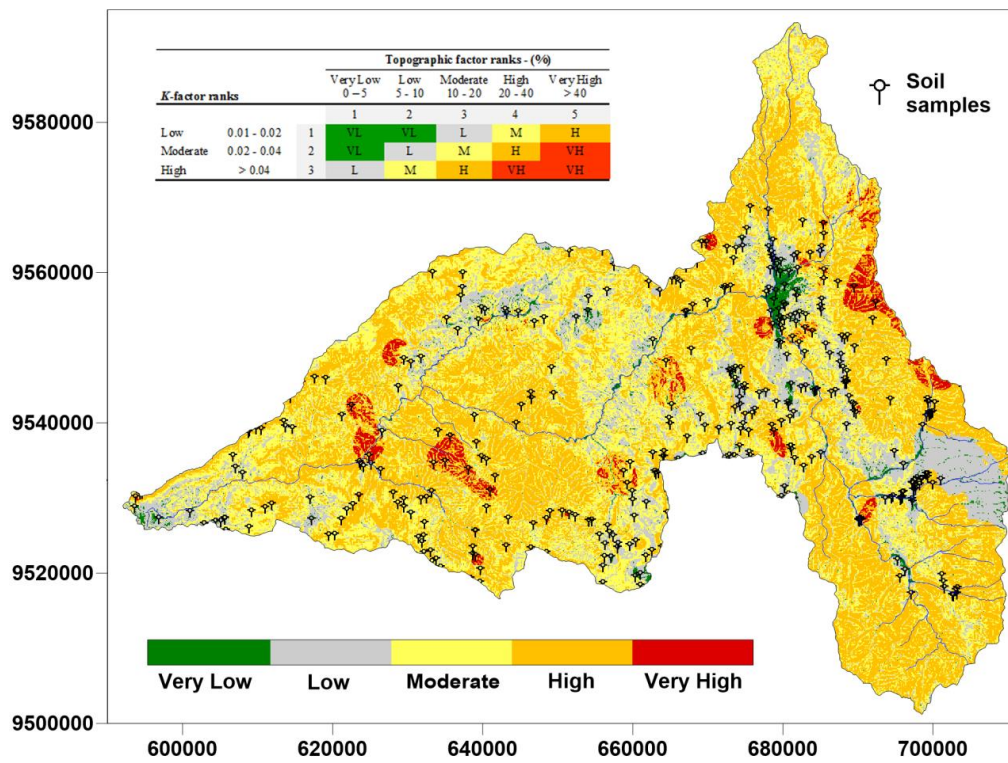




**Figure 5.6.** (Left column) Spatial distribution of rainfall in mm a, c, e. (Right column)  $Ei_{30}$ , for (b) March, (d) August, and erosivity (f) annual map ( $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ y^{-1}$ ).

The soil erosion susceptibility map with the decision rule is shown in Fig. 5.7. About 0.6% of the total catchment area is classified as very low, 11.5% low, 30.8% moderate, 56.1% high and 1% very high. The main part of the basin shows moderate to

high soil erosion susceptibility.



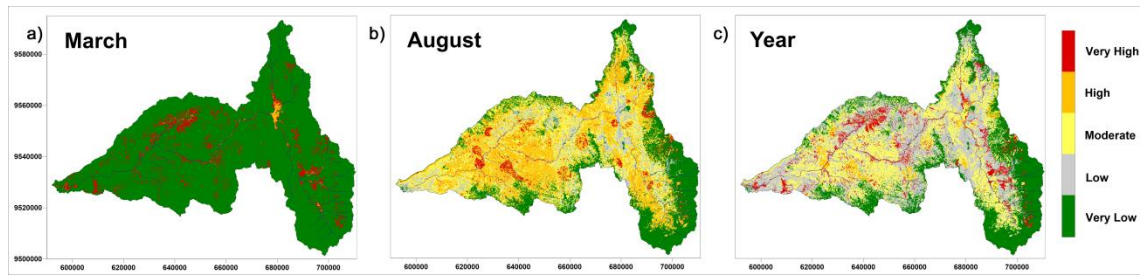
**Figure 5.7.** Soil erosion susceptibility map (*K*-factor + topographic factor); with decision rule.

The land cover map with the main classes (THF, TDF, Pasture and Agriculture); shows a good relation with the landforms and the climate. The changes of the vegetation are mainly caused by the climate conditions and by the anthropic management for the agriculture land. The THF covers about 24.3% of the catchment area and is located in the upper parts (WLSH) of the watershed, where humidity is also higher. This coverage maintains its canopy all year round, providing very good soil protection during any season. The TDF takes about 31.1% of the total surface and is mainly present in the lower parts of the basin (DFIZ). This vegetation type is similar to savannah. The TDF is dominantly used for uncontrolled grazing of cows and goats and also for timber production. About 36.5% of the study area is pasture, which is mostly uncultivated land, used for grazing. The pasture (*Panicum maximum*) grows naturally along the western



Andes mainly where humidity is high. The cultivated pastures, like *Pennisetum clandestinum*, are located in small areas at higher elevations, where water availability is sufficient for irrigation. The ground covers in this specific class vary from herbaceous to brushy vegetation. This fact makes it difficult to harmonize the information of other studies in the region, because there is no common definition for the land use class “Pasture”. Agriculture (dry-farming) is present at all altitudinal ranges, covering about 7.6% of the basin. Maize is the predominant crop for this farming system with conventional tillage, a technique prevalent throughout the study area. In the cities of Zapotillo and Catamayo the agriculture changes abruptly to intensive irrigation systems. The main crops are maize and sugar cane respectively. The urban areas and rivers take about 0.5% of the basin area and were set to 0, which means there is no erosion risk. In summary, pasture and TDF are the predominant land covers, which together account about 70% of the total area of the basin (Figure 5.2).

In Fig. 5.8 the soil erosion sensitivity maps (susceptibility + C-factor maps in relation to the seasonal and annual climatic conditions) are shown. The C-factor values were assigned according to the degree of soil protection. This degree of soil protection in TDF, pastures and agriculture is low, mainly during the dry season (June to November), due to the lack of canopy (Figure 5.8b). However, some species of the TDF as the Guayacán (*Tabebuia chrysantha* or *Tabebuia billbergii*) and the *Ceiba trichistandra* begin the process of defoliation approx. 2 months before the start of the dry season, but there are also species that do not completely defoliate during the same period (*Cynophalla mollis* and *Acacia macracantha*). The assigned values for the agricultural use remain constant during the dry season, due to the ongoing irrigation management for some valleys and areas near to rivers, these zones is best viewed in Figure 5.8a.



**Figure 5.8.** Soil erosion sensitivity maps (Susceptibility map + *C*-factor maps) for; (a) March, (b) August, and (c) average annual.

In the Catamayo Basin, a close relationship between the (*K*-factor and slope), land cover (*C*-factor) and erosivity (*R*-factor) exists; e.g. the ground cover depends on the climatic factors such as rainfall and air temperature (Figs. 5.2 and 5.4); but also it depends of the soil conditions (texture, OM, structure, permeability and topography). Agricultural activities are not possible on steep slopes. The final cartographic product (Fig. 5.9) shows the soil erosion risk maps at seasonal and annual timing, with these relationships between erosivity, erodibility, topography and land cover. According to the climatic seasonality March is the month with the highest risk of soil erosion in scattered areas throughout the basin and the highest values in crops areas (Fig. 5.9a). By August, due to low rainfall is lowest soil erosion risk; the highest values are in pasture areas and near to the Eastern cordillera (see Fig. 5.9b).

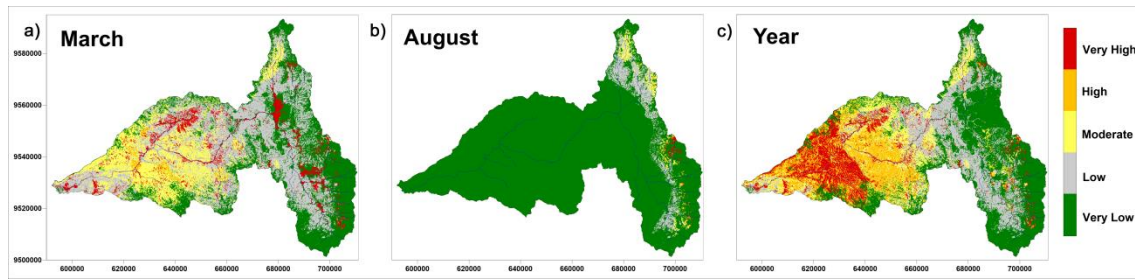
## 5.5. Discussion

This cartographic study described the spatio-temporal variability of soil erosion risk on a regional scale. It clearly shows the critical months, hotspots and land uses which are more susceptible to erosion. A close relationship between climate, altitude and topography could be shown for the Catamayo watershed. The mean monthly air temperature does not vary significantly during the year, and shows a good correlation

with altitude and land cover (Fries et al., 2009) In this context the air temperature could be a factor to consider in studies of soil erosion to evaluate the impact of land management practices in rural areas sensitive to desertification (Kairis et al., 2015).

The relationship between precipitation–altitude cannot be assumed for regional studies in mountain areas of the Andes, due to the influence of the landforms, forming barriers and pathways. However, local studies show that the altitudinal gradient of precipitation can be applied for small watersheds, located within the same mountain ridge and having the same exposure (e.g. Ochoa-Cueva et al., 2015). The windward/leeward orographic effects caused by the topography are difficult to detect and can be analyzed using remote sensing (Ochoa et al., 2014). Pineda et al. (2013) describes that the western Andes cordillera and the shape of its branches have an imposing effect on the rainfall distribution. Therefore, the spatial distribution of rainfall and the depending annual *R*-factor in the study area does not depend on the altitude; due to the location of the specific mountain barriers and pathways for humidity transport (Figs. 5.1b and 5.6).

During the dry season (Jun. Jul. Aug. - Sep. Oct. Nov.) the influence of sea surface temperature anomalies is weak (Jun. Jul. Aug.) or rather insignificant (Sep. Oct. Nov.) Pineda et al. (2013). The humidity comes from the Amazon Basin during this season, because the general wind direction is from the east (Richter et al., 2009). The high eastern mountain ridge in the east hampers the humidity transport into the valley. Consequently, the growth of the vegetation and agricultural activities are limited during this time period (Aguirre and Kvist, 2005; Maass and Burgos, 2011; Castro et al., 2013). The strong contrasts between the dry and rainy seasons, the insufficient ground cover, the sandy formations without consistency and the steep slopes generated the morpho-dynamic conditions in the study area (see Figs. 5.8 and 5.9).



**Figure 5.9.** Soil erosion risk maps (susceptibility map + sensitivity maps + erosivity maps) for; (a) March, (b) August, and (c) average annual.

The annual soil erosion risk map (Fig. 5.9c) shows that 17.9% (749 km<sup>2</sup> of the Catamayo basin) can be classified with very high erosion risk. The areas with high and moderate erosion risk cover 21.3% of the area. The western parts as well as the area of the river outlet have the highest risk of erosion. The mountain ridges do not show such high values, because these parts preserved THF and only small patches are deforested. The main factors that influence the soil erosion risk in the Catamayo basin are the erosivity factor (*R*-factor), as found by Nigel and Rughooputh (2010a), as well as the land cover factor (*C*-factor). Fig. 5.9c, makes it clear that poor land cover increases soil erosion risk; here mainly caused by runoff. Especially during the dry season the management of vegetation cover is important to reduce the volume of sediment in the rivers (García-Orenes et al., 2009; Mandal and Sharda, 2013; Kairis et al., 2015). However, the erosivity factor is low for more or less 50% of the basin (Fig. 5.6f); some hotspots are located in the east and the center, where precipitation is high and vegetation cover sparse.

The high soil erosion risk in the DFIZ zone is confirmed by Winckel et al. (1997b) who found evidence of colluvio-alluvials formations deposited in the river banks. The relationship between climate, topography and land cover can be seen as a key factor to understand the soil erosion in the southern highland of Ecuador.

Other studies (e.g. Cerdà et al., 2009; Ruiz-Sinoga and Romero, 2010; Zhao et al.,

2013), describe the ground cover as the key factor to prevent soil erosion in semiarid mountain watersheds, too. In the Catamayo Basin the agriculture shows a division in production patterns depending on land holding at the three altitudinal zones, proposed for the first time in this work (Fig. 5.1). In the upper basin (WLSH), traditional minifundia or latifundia are common with mixed (citrus, banana and coffee) or rotated cultivation using the fallow system. At DFSH smallholders (family farms) operate near the subsistence level. Generally, when agricultural yields are low and the landholding is big enough, the farmers use slash and burn agriculture, otherwise they abandon the land. For this agricultural practice or way of land use, we should propose more environmental education and land conservation policies. In the lower basin (DFIZ), some commercial farms with some level of management and mechanization are established, hiring landless employees. Monoculture of sugarcane and maize is dominant and the soil fertility is low, wherefore huge amounts of fertilizer are used.

Generally, in the Catamayo Basin the agriculture is a subsistence economy with great local importance (Bahr et al., 2013); only a few products are destined for the regional market, e.g. sugar cane, corn and coffee (Castro et al., 2013). However, in times of severe drought meat and milk from livestock production is more important than any cultivated crop. Against this background, regional analysis of soil management (basin-wide) should pay more attention to the pasture areas rather than on agriculture itself. Moreover, pasture comprises about 36.5% of the total surface of the basin, excluding the TDF (31.1%), which is also used for livestock grazing, and agriculture only occupies 7.6%.

According to farmers and conservational activists the land use in the study area is disorganized and uncontrolled due to the intensive agriculture and overgrazing (Castro et al., 2013; Espinosa et al., 2012; Podwojewski et al., 2002). In this context,

some researchers (e.g. Aguirre and Kvist, 2005; Vázquez et al., 2001) suggest to reduce or to eliminate livestock grazing in dry ecosystems. While other studies (e.g. Savory, 1999) suggest that holistic planned grazing (HPG), which means higher animal density on semiarid ecosystems but during a shorter time period, may result in higher soil-water content through the development of more ground-surface litter (Weber and Gokhale, 2011).

In order to prevent desertification processes in semiarid area of southern Ecuador, it is essential to maintain soil cover in good condition, avoiding deforestation in natural forests and maintaining soil fertility properties at active pasture sites. The natural forest and the protected areas are especially important for water sources (e.g. Podocarpus National Park) and favor significantly the hydrologic and landscape stability of the basin, too. The maintenance of existing pasture soils and their fertility depends of the adoption of new or modified soil management systems by farmers. This can be achieved with management proposals such as a) adequate management of seasonal pastures e.g. HPG. Recent studies developed by Espinosa et al. (2014), describes a surprising increase in the diversity of species in the study area in places subjected to seasonal grazing. b) Management of pastures with legumes that provide nutrients to the soil therefore maintaining good levels of pasture productivity, c) Avoid slash and burn agriculture, replaced by economic and ecologic agricultural systems, in order to avoid serious consequences of erosive events. An interesting proposal in this area is suggested by Castro et al. (2013). Obviously, these management proposals need to be modeled and validated, as well as their appropriateness for applications for the local population in semiarid Andean regions. The soil is a complex system that needs to be studied by multidisciplinary approaches (Brevik et al., 2015; Knoke et al., 2014). In the future, better estimates of soil erosion are possible using new technologies such



as radar networks with automatic stations to analyze erosive events e.g. of ENSO and the subsequent drought that causes this phenomenon. Also, more research is needed at plot or UPA scales with 5–10 year long experiments monitoring and using different models (e.g. mHM, WEPP, G2 erosion models) to determine the soil erosion risk and sediment transport more accurately.

## **5.6. Conclusions**

Soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes shows a high influence of climatic seasonality and topographical conditions. During the rainy season, soil erosion vulnerability is highly influenced by the erosivity factor, followed by the *C*-factor (seasonal coverage) and to a lesser degree the topographic and soil erodibility factors. While in the dry season the soil erodibility and topographic factors become more important as influenced by the *C*-factor for poor coverage.

The relationship between air temperature and altitude is strong in this Andean basin; however, there is no obvious relationship between rainfall and altitude for regional studies due to the topographical conditions. The altitudinal gradient of precipitation can be used only for small watersheds located within the same mountain ridge and having the same exposure.

This study suggests an applicable methodology for semiarid regions with limited data and it makes an important contribution to decision makers to preserve and sustainably manage this watershed, which is critical for water and food supply in southern Ecuador and northern Peru.

**Table 5.2.** Averages monthly and annual of values of the C-factor according to the land cover types.

Land cover types	Description	Average monthly and annual of values of the C- Factor												
		Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Year
<i>Tropical Humid Forest</i>	This forest type should not be considered primary forest because it has already had some intervention. The C-factor value is constant (0.003) because this forest maintains its coverage all year (very low erosion risk).	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
<i>Tropical Dry Forest</i>	Includes deciduous and semi-deciduous forest that growing in tropical areas subject to severe climatic seasonality. Higher values correspond to the months that TDF lacks leaves; and with the first rains leaf regeneration reactive.	0.1	0.025	0.01	0.01	0.01	0.025	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.061
<i>Pasture</i>	In the seasonal pastures, the higher values are associated with overgrazing areas and dry season; while lower values correspond to zones with pasture in good conditions and in rainy season.	0.1	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.062
<i>Agriculture</i>	The higher values correspond to the maize grown in rainy season and conventional tillage. Also, agricultural production is continuous in some areas of the basin (e.g. sugar cane all year), for this reason the values described in dry seasonal period are not lows.	0.55	0.55	0.45	0.33	0.23	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.252

## **5.7. Acknowledgments**

The authors wish to thank the support of the “Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador” (INAMHI) for the availability of climate data from 1990 to 2013. The CLIRSEN and SEMPLADES by the availability of the soil data of the study area. This work was partially supported by the Secretaria Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador (SENESCYT) and by the Universidad Técnica Particular de Loja (PROY-FIN-UCG-0018). We especially thank the multidisciplinary team that collaborated on the soil sampling process and to Fernando Oñate as general coordinator. Also like to thank Cesar Ochoa who advised on the English and Justin Sheffield of the Princeton University for his scientific support and final edition language.

## **5.8. References**

- Aguirre, Z., Kvist, L.P., 2005. Floristic composition and conservation status of the dry forests in Ecuador. *Lyonia*. 8, 41–67.
- Alexandersson, H. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol.* 6, 661–675.
- Bahr, E., Hamer, U., Chamba, D., Makeschin, F., 2013. Different fertilizar types affected nitrogen and carbon cycling in eroded and colluvial soils of Southern Ecuador. *Agric. Sci.* 4, 19–32.
- Berendse, F., van Ruijven, J., Jongejans, E., Keesstra, S.D., 2015. Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance of embankments that are crucial for the safety of human societies in low-lying areas. *Ecosystems*. 18, 881-888.

- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54, 464–465.
- Brevik, E. C., et al., 2015. The interdisciplinary nature of Soil. *SOIL*. 1, 117–129
- Castro, L. M., Calvas, B., Hildebrandt, P., Knoke, T., 2013. Avoiding the loss of shade coffee plantations: How to derive conservation payments for risk-averse land-users. *Agrofor. Syst.* 87, 331–347.
- Cedeño, J., Cornejo, M. P., 2008. Evaluation of three precipitation products on ecuadorian coast, available at: [http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/Workshops/Reanalysis2008/Documents/Posters/P3-25\\_ea.pdf](http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/Workshops/Reanalysis2008/Documents/Posters/P3-25_ea.pdf) (Accessed 12 April 2014)
- Cerdà, A., 1998. Relationship between climate and soil hydrological and erosional characteristics along climatic gradients in Mediterranean limestone areas. *Geomorphology* 25, 123-134.
- Cerdà, A., 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil Tillage Res.* 36, 1–8.
- Cerdà, A., Giménez-Morera, A., Bodí, M.B., 2009. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin. *Earth Surf. Processes Landforms.* 34, 1822–1830.
- Cerdà, A., Lavee, H., Romero-Díaz, A. , Hooke, J., Montanarella, L., 2010. Soil erosion and degradation in mediterranean type ecosystems. *Land Degrad. Dev.* 21, 71–74.
- Chavez, R., 2006. Modeling Soil erosion risk in Los Maribios volcanic chain, Nicaragua. *Tropical Resources Bulletin.* 25, 50–56.
- Cueva, J., Chalán., L., 2010. Cobertura Vegetal y Uso Actual del Suelo de la Provincia

de Loja. Informe Técnico. Departamento de Sistemas de Información Geográfica de Naturaleza & Cultura Internacional. Gráficas Amazonas. Loja-Ecuador.  
<http://www.naturalezaycultura.org/docs/Informe%20Cobertura%20Vegetal.pdf>

Espinosa, C. I., De La Cruz, M., Luzuriaga, A. L., Escudero, A., 2012. Bosques tropicales secos de la región Pacífico Ecuatorial: diversidad, estructura, funcionamiento e implicaciones para la conservación. *Ecosistemas*. 21, 167–179.

Espinosa, C. I., Luzuriaga, A. L., De La Cruz, M., Escudero, A., 2014. Climate and grazing control nurse effects in an Ecuadorian dry shrubby community. *J. Trop. Ecology*. 30, 23–32.

FAO, 2006. Guidelines for soil description. Food and Agriculture Organization of the United Nations (p. 109). Rome.

FAO, 2010a. Statistics division. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/default.aspx>. Accessed 14 June 2013

FAO, 2010b. Growing food for nine billion. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/013/am023e/am023e00.pdf>. Accessed 20 June 2013

Fries, A., et al., 2009. Thermal Structure of a Megadiverse Mountain Ecosystem in Southern Ecuador, and its Regionalization. *Erdkunde*. 63, 321–335.

Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T., Bendix, J., 2012. Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agric. For. Meteorol.* 152, 17–30.

Fries, A., et al., 2014. Catchment precipitation processes in the San Francisco valley in southern Ecuador: combined approach using high-resolution radar images and in situ observations. *Meteorol. Atmos. Phys.* 126, 13–29.

- Gabarrón-Galeote, M. A., Martínez-Murillo, J. F., Quesada, M. A., Ruiz-Sinoga, J. D., 2013. Seasonal changes in the soil hydrological and erosive response depending on aspect, vegetation type and soil water repellency in different Mediterranean micro environments. *Solid Earth*. 4, 497–509.
- García-Orenes, F., et al., 2009. Effects of agricultural management on surface soil properties and soil-water losses in eastern Spain. *Soil Tillage Res.* 106, 117–123.
- Guijarro Pastor, J. A., 2011. User guide to Climatol: An R package for homogenization of climatological series. *R Packages*. 1, 33.
- Kairis, O., Karavitis, C., Salvati, L., Kounalaki, A., Kosmas, K., 2015. Exploring the Impact of Overgrazing on Soil Erosion and Land Degradation in a Dry Mediterranean Agro-Forest Landscape (Crete, Greece). *Arid Land Research and Management*. 29: 360-374.
- Knoke, T., et al., 2014. Afforestation or intense pasturing improve the ecological and economic value of abandoned tropical farmlands. *Nat. Commun.* 5: 5612.
- Lieskovský, J., Kenderessy, P., 2014. Modelling the effect of vegetation cover and different tillage practices on soil erosion in vineyards: A case study in vráble (Slovakia) using WATEM/SEDEM. *Land Degrad. Dev.* 25, 288-296.
- MAGAP, 2011. Costos de producción. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca del Ecuador. [http://www.magap.gob.ec/sinagap/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=97](http://www.magap.gob.ec/sinagap/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=97). Accessed 25 Jan 2013
- Mandal, D., Sharda, V. N., 2013. Appraisal of soil erosion risk in the Eastern Himalayan region of India for soil conservation planning. *Land Degrad. Dev.* 24, 430–437.

- Maass, M., Burgos, A., 2011. Water Dynamics at the Ecosystem Level in Seasonally Dry Tropical Forests. In: Dirzo, R., Mooney, H., Ceballos, G., Young, H. (eds.). Seasonally Dry Tropical Forests: Ecology and Conservation, pp. 141-156. Island Press. Washington, DC 2009, USA.
- Morgan, R.P.C., et al., 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University
- Morgan, R.P.C., 2005. Soil Erosion and Conservation, 3rd ed. Blackwell, Malden.
- Nigel, R., S.D.D.V., Rughooputh., 2010a. Soil erosion risk mapping with new datasets: An improved identification and prioritisation of high erosion risk areas. *Catena* 82, 191–205.
- Nigel, R., Rughooputh, S.D.D.V., 2010b. Mapping of monthly soil erosion risk of mainland Mauritius and its aggregation with delineated basins. *Geomorphology* 114, 101–114.
- Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., Willems, P., 2014. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 3179–3193.
- Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J., Boll, J., 2015. Spatial Estimation of Soil Erosion Risk by Land-cover Change in the Andes of Southern Ecuador. *Land Degrad. Dev.* 26, 565 - 573.
- Oñate-Valdivieso, F., Bosque, J., 2010. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. *J. Hydrol.* 395, 256–263.
- Palacio, R.G., Bisigato, A.J., Bouza, P.J., 2014. Soil erosion in three grazed plant communities in Northeastern Patagonia. *Land Degrad. Dev.* 25, 594-603.

- Pérez-Rodríguez, R., Marques, M. J., Bienes, R., 2007. Spatial variability of the soil erodibility parameters and their relation with the soil map at subgroup level. *Sci. Total Environ.* 378, 166–173.
- Panagos, P., Karydas, C., Ballabio, C., Gitas, I., 2014. Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 model in Crete focusing on agricultural land uses. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 5, 461–487.
- Pineda, L., Ntegeka, V., Willems, P., 2013. Rainfall variability related to sea surface temperature anomalies in a Pacific–Andean basin into Ecuador and Peru. *Adv. Geosci.* 33, 53–62.
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., Hofstede, R., 2002. Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Manag.* 18, 45–55.
- Renard, K., Freimund, J., 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor RUSLE. *J. Hydrol.* 157, 287–306.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. USDA Agriculture Handbook, No. 703. 404pp.
- Richter, M., Diertl, K.-H., Emck, P., Peters, T., Beck, E., 2009. Reasons for an outstanding plant diversity in the tropical Andes of Southern Ecuador. *Landscape Online.* 12, 1–35.
- Romero, C. C., Baigorria, G. A., Stroosnijder, L., 2007. Changes of erosive rainfall for El Niño and La Niña years in the northern Andean highlands of Peru. *Clim. Change.* 85, 343–356.
- Ruiz-Sinoga, J. D., Romero, Diaz A., 2010. Soil degradation factors along a



- Mediterranean pluviometric gradient in Southern Spain. *Geomorphology* 118, 359–368.
- Savory, A., 1999. *Holistic Management: A New Framework for Decision Making*, second ed. Island Press, 616 pp.
- Soil Survey Staff., 1996. *Soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Rep. Vol. 42. US Dept. Agric.-Nat. Res. Cons. Serv., Washington, DC.
- Stocking, M., 1981. A working model for the estimation of soil loss suitable for underdevelopment areas, Development Studies Occasional Paper No. 15, University of East Anglia, UK.
- Tote, C., et al., 2011. Effect of ENSO events on sediment production in a large coastal basin in northern Peru. *Earth Surf. Processes Landforms*. 36, 1776–1788.
- Vázquez, M.A., Larrea, M., Suarez, L., Ojeda, P. (Eds), 2001. *Biodiversidad en los bosques secos del suroccidente de la provincia de Loja: un reporte de las evaluaciones ecologicas y socioeconomicas rapidas*. EcoCiencia, MAE, Herbario Loja y Proyecto Bosque Seco, Quito, Ecuador.
- Weber, K.T., Gokhale, B.S., 2011. Effect of grazing on soil-water content in semiarid rangelands of southeast Idaho. *J. Arid. Environ.* 75, 464–470.
- Winckell, A., Zebrowski, C., Sourdat, M., 1997a. *Los paisajes naturales del Ecuador*. Quito, EC, CEDIG, IPGH, ORSTOM, IGM. v. 2 (Geografía Básica del Ecuador), tomo 4 (Geografía Física), 417 pp.
- Winckell, A., et al., 1997b. *Las condiciones del medio natural*. Quito, EC, CEDIG, IPGH, ORSTOM, IGM. v. 1 (Geografía Básica del Ecuador), tomo 4 (Geografía Física), 159 pp.

Zhang, R., 1997. Determination of Soil Sortivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. *Soil Sci.* 61, 1024–1030.

Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., Gao, P., 2013. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degrad. Dev.* 24, 499–510.

**CAPÍTULO VI:**  
**DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES**



**MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO Y AGUA EN  
LOS ANDES DEL SUR DE ECUADOR**



## CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

### 6.1. Discusión general

La discusión general está descrita en relación al fin de la investigación que se encuentra en el primer párrafo de la sección de objetivos de la presente tesis doctoral.

(i) Caracterización general del recurso suelo con algunos parámetros que nos describan su estado actual.

Los parámetros elegidos para este análisis han sido los que nos ayudan a determinar la erodabilidad del suelo y otros relacionados como la densidad aparente. Específicamente en el área general de estudio se distinguen dos tipos de ecosistemas, húmedo tropical (área local) y seco tropical (área regional).

En la caracterización del suelo a escala local nos encontramos con resultados interesantes. Como lo muestra el capítulo III (en la Figura 3.5), la materia orgánica del suelo, nos expresa una mayor relación con la cobertura vegetal (pastizal), antes que con la altitud (clima) como han descrito otros autores (Cobertera, 1993). También, Stevenson (1982) describe para suelos tropicales valores bajos por la alta actividad microbiana sobre la MOS causada por altas temperaturas. Sin embargo los valores de MOS sobre coberturas naturales son bajos en nuestra zona ( $< 2.6\%$ ), que se encuentran en las cotas más altas de las cuencas, es decir con menor temperatura; concordando con lo encontrado al norte de Ecuador por Zehetner y Miller (2006). Al momento de establecer análisis de correlación lineal entre la MOS con otros parámetros como altitud, pendiente y cobertura vegetal no fueron encontradas relaciones significativas, probablemente por la alta dispersión que presentan porcentajes de MOS.

Mientras que en el análisis de relación entre los porcentajes de cobertura vegetal del suelo (natural o intervenida) con la DA del suelo (ver Figura 3.2) es significativa

( $R^2=0.91$ ). Ellies et al. (2005), manifiesta que el contenido de materia orgánica incrementa el proceso de agregación y la estabilidad de los agregados del suelo. Continuando con el análisis al ver la figura 3.3 el indicador biológico de calidad de agua (IMEERA-B) relacionado con la DA del suelo, nos describe una relación media, esto puede entenderse si recordamos la relación entre la DA, MOS y porosidad del suelo. También que la MOS influye en el crecimiento de plantas y microorganismos probablemente el aporte de materia orgánica al suelo de las cuencas en sitios cercanos a las riberas de los ríos. También la MOS favorece el movimiento y almacenamiento de agua en el suelo por la alta absorción del humus por sus características coloidales (Cerde, 1998; Gabarrón-Galeote et al., 2013). Iñiguez-Armijos et al. (2014), nos presenta como la mejor alternativa la conservación y recuperación de la cobertura vegetal (búfer de 30 m) para proteger las riberas de estos ríos a la vez que se disminuye el riesgo de erosión fluvial.

(ii) En referencia a la estimación del riesgo potencial del suelo a erosionarse por cambio de la cobertura vegetal presente o futura a escala local.

Los valores de erosividad media obtenidos fueron de  $7364 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , con una precipitación media anual de 1442 mm, mientras que Renard y Freimund (1994), estimaron una erosividad media de  $7000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  basados en una precipitación media de 1400 mm; y Sonder (2004) obtuvo valores medios anuales más altos para los Andes colombianos de  $8094 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . En cambio en el factor de la erodabilidad del suelo los valores mínimos y máximos estuvieron por el orden de 0.027 a  $0.049 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ . Romero et al. (2007), describe para los Andes del norte del Perú, una distribución en los porcentajes de materia orgánica del suelo, muy parecida a la que describimos en la figura (4.3). Los bajos contenidos de MOS, principalmente en coberturas naturales, influye sobre las otras propiedades edáficas

como capacidad de retención hídrica y conductividad hidráulica (Jordán, 2006), haciendo que el suelo tenga más vulnerabilidad a erosionarse (Molina et al., 2007). Zehetner y Miller (2006), identificaron una estrecha relación entre el clima y la distribución espacial de algunas propiedades de suelos de los Andes del norte de Ecuador, entre ellas textura y MOS, al contrario de lo que describe Cobertera (1993), en las zonas de mayor altitud (menor temperatura), los porcentajes de MOS son más bajos. Los suelos del área local de estudio tienen una erodabilidad moderada distribuida principalmente hacia la parte media y alta de las cuencas, con un ligero decrecimiento en la parte baja de las cuencas; esto probablemente pueda relacionarse con el mayor porcentaje de MOS que se encuentran en la cobertura de pastizales. Esto daría a entender que los pastizales son una buena alternativa de manejo del suelo, sin embargo se debería realizar otros estudios a mayor profundidad, en los que se analice el impacto del ganado sobre la densidad aparente, la compactación del suelo, entre otros. De igual forma se obtuvo porcentajes mayores al 4% de MOS en contados sitios de muestreo, en los que la erodabilidad del suelo podría estar sobreestimada ligeramente.

La tasa de deforestación anual para las cuencas fue de 0.96%. Sin embargo en estos procesos de deforestación el programa de “reforma agraria” implementado en el Ecuador entre 1960 y 1970, no causo gran influencia para esta zona, a diferencia de lo que fue encontrado por Podwojewski et al. (2002) para el norte de Ecuador. Sin embargo, esta reforma fue el inicio y masificación de la cría extensiva de ganado en la región, como también lo manifiestan Bendix y Beck (2009) y Tapia-Armijos et al. (2015). Si continuásemos con la misma tasa de deforestación que coincide con el incremento poblacional en el mismo periodo de estudios, la presión antrópica sobre estas cuencas superaría la resiliencia de las mismas para recuperarse. Esta hipótesis es consistente a los trabajos previos desarrollados por Zehetner y Miller (2006) o

Podwojewski et al. (2002), en los que se predice que el cambio de uso del suelo en los Andes ecuatorianos aumentará aún más como resultado del crecimiento constante de la población. Los valores mínimo y máximo estimados de riesgo potencial de erosión de la cuenca fueron de  $1.5 \text{ Mg ha}^{-1}$  a  $936 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Los valores mínimos corresponden a las zonas cubiertas de bosque montano y con baja pendiente, mientras que los valores máximos están sobre tierras agrícolas o pastizales con pendientes fuertemente pronunciadas. Harden (1988), encontró rangos mínimos y máximos de  $0$  a  $836 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , utilizando simulador de lluvias sobre suelos agrícolas de los Andes de Ecuador. También fue estimado para el año 2040, si continuara la presión actual y la misma tasa de deforestación, prácticamente la cobertura de bosque natural primario desaparecería y la erosión potencial se incrementaría notablemente con valores que van de  $3$  a  $2021 \text{ Mg ha}^{-1}$  valores altos, pero probablemente posibles Winckell et al. (1997a) describió que los Andes tuvieron una altitud superior en  $100 \text{ m}$  a la actual, y los procesos erosivos han contribuido a la altitud actual; también Andrade et al. (2010) estimó también valores altos de  $2558 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  para los Andes venezolanos. Por lo expuesto, se supone que la cubierta vegetal (*C-Factor*) ejerce el control de primer orden para las tasas de erosión actuales a escala de cuencas, seguido de los factores *R*, *LS* y *K* (en ese orden).

(iii) Explicar la influencia de los factores que influyen en los procesos erosivos, en una climo-secuencia de los Andes del sur del Ecuador. Este propósito ha sido parcialmente explicado en los párrafos anteriores, pero hacen referencia al área local del estudio (7 micro-cuencas), que tienen una cobertura natural de bosque húmedo montano. Ahora analizaremos que sucede con el bosque seco tropical y los demás factores relacionados a los procesos de erosión del suelo a escala regional (cuenca Catamayo). Esta cuenca tiene una estrecha relación entre el clima, altitud y topografía que explicaremos a continuación. La temperatura media anual no presenta variaciones



significativas durante el año, e ilustra una buena correlación con la altitud y la cobertura vegetal, similar a lo que ha descrito Fries et al. (2009), para la región sur de Ecuador. Kairis et al. (2015) describe a la temperatura como un factor clave a considerar en estudios de erosión del suelo en el que se evalúe el impacto de las prácticas de manejo de zonas rurales o con alto riesgo de desertificación. En cambio la relación entre precipitación y la altitud no podría ser usada para estudios regionales en áreas montañosas como los Andes, por la influencia de los accidentes geográficos que forman barreras y pasos de los flujos de humedad. Sin embargo, para estudios a escala local (cuencas pequeñas), que se encuentren bajo el mismo gradiente de precipitación o exposición solar, o en la misma cordillera si es posible como fue descrito anteriormente en el punto (ii) de este mismo capítulo.

Existen otros estudios como el de Ochoa et al. (2014), que menciona que los efectos orográficos de barlovento y sotavento causados por la topografía, son difíciles de detectar y podrían ser analizados utilizando sensores remotos, mientras que Pineda et al. (2013) menciona que la cordillera occidental y la forma de sus ramales impone la distribución de las precipitaciones de los Andes del sur de Ecuador. Estos trabajos confirman lo ilustrado por las figuras 5.1.b y la 5.6., que la distribución espacial de las precipitaciones y la función del factor-R, para el área de estudio no dependen de la altitud por las barreras y pasos antes mencionados.

En la temporada seca (Jun. Jul. Agos. – Sep. Oct. Nov.) la influencia de las anomalías de la temperatura superficial del mar es débil para Jun. Jul. Agos. (Pineda et al., 2013); mientras que para los meses de Sep. Oct. Nov., esta influencia resulta insignificante debido a que la humedad proviene de la cuenca del Amazonas durante esta temporada, en la que la dirección del viento viene del este (Richter et al., 2009). Aunque la altura de la cordillera oriental dificulta el transporte de humedad hacia el

valle de la cuenca. En consecuencia el crecimiento de la vegetación y las actividades agrícolas son limitadas durante esta temporada (Aguirre y Kvist, 2005; Maass y Burgos, 2011; Castro et al, 2013).

Los fuertes contrastes entre las estaciones seca y lluviosa, la cobertura del suelo insuficiente, las formaciones del suelo arenosas sin consistencia y las laderas empinadas han generado las condiciones morfo-dinámicas del esta área de estudio (ver Figs. 5.8 y 5.9).

(iv) Contribuir con una propuesta metodológica para estimar el riesgo de erosión del suelo en zonas con datos limitados. Al igual que gran parte de los modelos actuales la base metodológica de esta propuesta tiene un fuerte apoyo del modelo RUSLE. Al determinar la espacio-temporalidad del riesgo de erosión de suelo para esta cuenca semiárida tenemos que el 17.9% es decir (749 km<sup>2</sup> de la cuenca Catamayo) fue clasificado con muy alto riesgo de erosión. Las áreas con alto y moderado riesgo de erosión cubre el 21.3% del área. Este riesgo muy alto se concentra en la parte baja de la cuenca (límite sur-occidental), mientras que en las partes altas de las montañas no se observan valores altos porque en estas zonas se conserva en buen estado el bosque húmedo tropical y solo pequeños parches han sido deforestadas. Sin embargo, los factores que comparten el primer lugar de influencia en el riesgo de erosión del suelo para ecosistemas semiáridos son la erosividad y el factor de cobertura vegetal; cómo lo describe claramente la figura 5.8 y 5.9, que la escasa cobertura vegetal para la temporada seca incrementa notablemente el riesgo de erosión del suelo y la producción de sedimentos, y es importante tenerlo presente principalmente para el inicio de la temporada lluviosa para hacer un correcto manejo del suelo en pastizales y cultivos, tal como ya lo han mencionado algunos autores (Taguas, 2007; García-Orenes et al., 2009; Mandal y Sharda, 2013; Kairis et al., 2015). Nigel y Rughooputh (2010a), al igual que

en nuestro trabajo también consideran a la erosividad, como el principal factor relacionado con el riesgo de erosión para cuencas semiáridas. Sin embargo, por características topográficas esta intensidad de la precipitación tiene una influencia al 50% aproximadamente de la cuenca, al sur-este y centro como lo describe la figura 5.6f; donde se debería tener mayor cuidado a las practicas comunes de roza y quema de la cobertura vegetal. De acuerdo a la zonificación propuesta por primera ocasión para esta cuenca de estudio, en la Zona de Agricultura de Secano y Riego descrita en el capítulo V con sus siglas en inglés DFIZ, y va desde los 240 hasta los 1400m s.n.m. Winckel et al. (1997b), describe la evidencia los depósitos erosivos coluvio-aluviales para esta zona. Por esta razón se podría decir que se presenta esta estrecha relación entre clima, topografía, cobertura vegetal y son los mejores factores para entender los procesos erosivos a escala regional en esta cuenca semiárida de los Andes del sur de Ecuador.

También otros estudios llevados en regiones semiáridas (p.e. Martínez-Murillo, 2006; Cerdà et al., 2009; Ruiz-Sinoga and Romero, 2010; Zhao et al., 2013), describen a la cobertura vegetal como el factor clave para prevenir la erosión del suelo. La agricultura muestra interesantes diferencias en la cuenca Catamayo, dependiendo de la zona en la que se desarrolle; fueron descritas en este modelo 3 zonas. En la zona más alta de la cuenca, denominada Tierras húmedas de la Sierra sur, descrita en el capítulo V por sus siglas en inglés como WLSH. Los cultivos mixtos tradicionales en esta zona son principalmente frutales (cítricos, banana y café) o con rotación de cultivos, usando el barbecho o agricultura de secano, en extensión de minifundio o latifundio. En la zona de secano de la Sierra sur, DFSH por sus siglas en inglés, descrito en el capítulo V, es la zona donde mayor cantidad de pequeños agricultores se encuentran, quienes practican agricultura de subsistencia principalmente y en menor grado agricultura semi-tecnificada. Generalmente cuando los rendimientos de sus cultivos son bajos, y la

superficie de terreno es grande, dejan su tierra destinada a los cultivos, para el siguiente año ampliar la frontera agrícola con la práctica de roza y quema. Esta práctica agrícola de común uso para toda la cuenca, para incrementar la frontera agrícola o para mantener potreros o limpiar sitios de cultivo, es donde se debe acentuar actividades de educación ambiental y de conservación de la tierra; porque ha traído grandes pérdidas de bosques naturales, por el incontrolado manejo del fuego. En la cuenca baja (DFIZ), también se produce actividades que podrían perjudicar al manejo sustentable del suelo. En gran parte de los valles aluviales se establecen grandes extensiones de cultivos comerciales con cierto nivel de gestión (p.e.: sistema de riego por superficie en canales y fertilización química) y labranza mecanizada de cultivos, para lo cual existe contratación de mano de obra local. El monocultivo de la caña de azúcar y el maíz es dominante en los valles de esta cuenca, en los que la fertilidad del suelo es baja, por lo se utilizan grandes cantidades de productos químicos.

A escala regional la cuenca Catamayo sostiene un sistema agrícola de una economía de subsistencia con gran importancia local, como también lo describe Bahr et al. (2013). Sólo pocos productos están destinados al mercado regional, como por ejemplo la caña de azúcar, maíz y café (Castro et al., 2013). Sin embargo en tiempos de fuerte sequía la producción de carne y leche es más importante que cualquier cultivo. En este contexto se debería prestar mayor atención al manejo de los suelos de pastizales que a los sistemas de cultivos; más aún, que para esta cuenca semiárida los pastos ocupan el 36.5%, excluyendo a los bosques secos tropicales (TDF por sus siglas en inglés) que ocupan el 31.1% y que grandes extensiones de esta cobertura se utiliza también para el pastoreo de ganado; mientras que el uso agrícola ocupa solamente el 7.6% de toda la superficie de esta cuenca.

Según el criterio de algunos agricultores y activistas de conservación en esta área

de estudio el uso del suelo es desorganizado y sin control debido a la agricultura intensiva y principalmente el sobrepastoreo (Castro et al., 2013; Espinosa et al., 2012; Podwojewski et al., 2002). En este contexto, algunos investigadores (por ejemplo, Aguirre y Kvist, 2005; Vázquez et al., 2001) sugieren reducir o eliminar el pastoreo de ganado en estos ecosistemas secos. Mientras que otros estudios como el propuesto por Savory (1999), llamado Pastoreo Holístico Planificado (HPG por sus siglas en inglés), el cual propone una mayor densidad de animales en los ecosistemas semiáridos pero durante un período de tiempo más corto; esto podría contribuir con un mayor contenido de agua del suelo a través del desarrollo de una mayor superficie de materiales dispersos sobre el suelo (Weber y Gokhale, 2011).

Con el fin de contribuir a disminuir los procesos de desertificación para esta zona semiárida del sur de Ecuador, es esencial para mantener la cobertura del suelo en buenas condiciones, evitando la tala o quema de los bosques naturales y el mantener las propiedades de fertilidad del suelo en los sitios de pastoreo activos. El bosque natural y las áreas naturales protegidas son especialmente importantes para proteger las fuentes de agua de la cuenca, por ejemplo el Parque Nacional Podocarpus (PNP); mismo que favorece significativamente la estabilidad hidrológica y del paisaje de la cuenca.

El mantenimiento de los suelos en las zonas cubiertas de pastos actualmente y su fertilidad depende de la adopción de sistemas nuevos o modificados de manejo de suelos por la población que vive en estas zonas rurales. Esto se puede lograr con propuestas de gestión, tales como:

- a) El manejo adecuado de los pastos de temporada, por ejemplo utilizando la (HPG). Estudios recientes desarrollados por Espinosa et al. (2014), describen un sorprendente aumento en la diversidad de especies en el área de estudio en lugares sometidos a pastoreo estacional.

- b) Gestionar el suelo de los pastos con plantación de especies leguminosas que aporten nutrientes al mismo, por lo tanto el mantenimiento de buenos niveles de productividad del suelo.
- c) Evitar la tala y quema, planificando una sustitución de los cultivos tradicionales, probablemente poco provechosos, por sistemas agrícolas económicamente rentables y ecológicamente sustentables, evitando así la pérdida constante de la protección del suelo y por consiguiente su alta sensibilidad a los eventos erosivos. Una propuesta interesante para este apartado podría ser lo sugerido por Castro et al. (2013).

Obviamente, todas las propuestas mencionadas de manejo y conservación de suelo deben ser modeladas y validadas, así como su implementación, socializada y construida con la población local, para toda región que pretenda que perduren sus políticas y recursos naturales para las futuras generaciones.

Se está construyendo esta planificación para el futuro, en el que pensamos que es posible tener una mejor estimación de la erosión del suelo, utilizando las nuevas tecnologías como las redes de radar con estaciones automáticas para analizar eventos erosivos; por ejemplo, “El Niño” y la posterior sequía que provoca este fenómeno climático. Además, es necesario investigación adicional a escala de UPA (Unidades de Producción Agropecuaria) y de parcela, con experimentos largos supervisados y el uso de instrumentalización y modelos de erosión para determinar el riesgo de erosión del suelo y el transporte de sedimentos con mayor precisión. El inicio de estas proyecciones que han sido también parte de nuestra investigación las encontramos ilustradas en el Anexo 6.

## **6.2. Conclusiones generales**

Estudiar las cuencas hidrográficas que abastecen de agua a la ciudad de Loja reviste gran importancia por la estabilidad del ciclo hidrológico, principalmente en la estación de fuertes lluvias (evitando inundaciones en la parte baja de la cuenca); así como para los años con fuerte sequía. Los resultados demostraron que el cambio de la cubierta vegetal y la deforestación, han deteriorado considerablemente la calidad del suelo y agua en estas cuencas.

Este estudio es una herramienta para determinar la importancia de la cubierta vegetal en la gestión del territorio. Además propone una regulación enfocada al manejo de zonas de amortiguamiento de bosques naturales y riberas de los ríos, que podría tener éxito al momento de aplicar un sistema de soporte de decisiones (SSD) dirigido a la gestión del recurso hídrico para cuencas semiurbanas.

El factor-C (cobertura vegetal), fue identificado como el principal factor que influye sobre los procesos de erosión del suelo del ecosistema de bosque húmedo montano analizado en las cuencas hidrográficas del área local.

Cuando el manejo de la cubierta vegetal es pobre, el asumir que los factores erosividad y topográfico son los más importantes, no es del todo cierto. Para el área de estudio, los filos de montaña, donde se presenta la mayor intensidad de precipitación y donde los rangos de pendiente son los más pronunciados, el riesgo de erosión potencial del suelo es bajo por la buena cobertura del suelo con que cuenta. Y solo al momento de suponer un escenario extremo para el año 2040, en el que esta cobertura vegetal natural fuera cambiada, es cuando se observarían grandes pérdidas de suelo para estas cuencas.

El uso de la RUSLE a escala local fue un buen instrumento para estimar la erosión potencial del suelo sobre estas cuencas, principalmente porque pueden orientar

las zonas prioritarias del suelo a ser reforestadas o conservadas por el gobierno local, Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE), y la comunidad en general que voluntariamente desee contribuir.

El riesgo de erosión del suelo para una cuenca semiárida de los Andes del sur de Ecuador, tiene una fuerte influencia de la estacionalidad climática y de las condiciones topográficas de la misma. Durante la temporada lluviosa, la vulnerabilidad del suelo a erosionarse es alta, en la que el factor de erosividad resulta ser el más importante, seguido del factor-C (de cobertura estacional) y en menor grado influyen el factor topográfico y de erodabilidad. Mientras que en la temporada seca, el factor de erodabilidad del suelo y el factor topográfico, pasan a convertirse en los más importantes debido a la escasa o casi nula cobertura vegetal (bosques caducifolios).

La relación entre la temperatura del aire y la altitud es fuerte en esta cuenca andina; sin embargo, no existe una relación fuerte entre la precipitación con la altitud, por lo que para estudios regionales en condiciones topográficas de montaña no es recomendable hacer este tipo de análisis. Este gradiente altitudinal de precipitación puede ser utilizado solamente para cuencas pequeñas ubicadas en una determinada cordillera y bajo la misma estribación o exposición.

Finalmente este estudio sugiere una metodología aplicable para las regiones semiáridas con escasez de datos y hace una importante contribución para los tomadores de decisiones para manejar y conservar estas cuencas, que son fundamentales para el suministro de agua y el de alimentos para estas áreas de estudio de la región sur de Ecuador.



### **6.3. Bibliografía**

- Aguirre, Z., y Kvist, L.P., 2005. Floristic composition and conservation status of the dry forests in Ecuador. *Lyonia*. 8, 41–67.
- Andrade, O., Kappas, M., Erasmi, S., 2010. Assessment of Erosion hazard in Torres Municipality of Lara State (Venezuela) Based on GIS. *Interciencia*. 35, 348-356.
- Bahr, E., Hamer, U., Chamba, D., Makeschin, F., 2013. Different fertilizar types affected nitrogen and carbon cycling in eroded and colluvial soils of Southern Ecuador. *Agric. Sci*. 4, 19–32.
- Bendix, J., y Beck, E., 2009. Spatial Aspects of Ecosystem Research in a Biodiversity Hot Spot of Southern Ecuador – An Introduction. *Erdkunde*. 63, 305-308.
- Castro, L. M., Calvas, B., Hildebrandt, P., Knoke, T., 2013. Avoiding the loss of shade coffee plantations: How to derive conservation payments for risk-averse land-users. *Agrofor. Syst*. 87, 331–347.
- Cerda, A., 1998. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena*. 32, 73–86.
- Cerdà, A., Giménez-Morera, A., Bodí, M.B., 2009. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin. *Earth Surf. Processes Landforms*. 34, 1822–1830.
- Cobertera, E., 1993. *Edafología aplicada. Suelos, producción agraria, planificación territorial e impactos ambientales*", Cátedra, Madrid.
- Ellies, A., Ramírez, C., McDonald, R., 2005. Organic matter and wetting capacity distribution in aggregates of Chilean soils. *Catena*. 59, 69-78.
- Espinosa, C. I., De La Cruz, M., Luzuriaga, A. L., Escudero, A., 2012. Bosques

- tropicales secos de la región Pacífico Ecuatorial: diversidad, estructura, funcionamiento e implicaciones para la conservación. *Ecosistemas*. 21, 167–179.
- Espinosa, C. I., Luzuriaga, A. L., De La Cruz, M., Escudero, A., 2014. Climate and grazing control nurse effects in an Ecuadorian dry shrubby community. *J. Trop. Ecology*. 30, 23–32.
- Fries, A., et al., 2009. Thermal Structure of a Megadiverse Mountain Ecosystem in Southern Ecuador, and its Regionalization. *Erdkunde*. 63, 321–335.
- Gabarrón-Galeote, M. A., Martínez-Murillo, J. F., Quesada, M. A., Ruiz-Sinoga, J. D., 2013. Seasonal changes in the soil hydrological and erosive response depending on aspect, vegetation type and soil water repellency in different Mediterranean micro environments. *Solid Earth*. 4, 497–509.
- García-Orenes, F., et al., 2009. Effects of agricultural management on surface soil properties and soil-water losses in eastern Spain. *Soil Tillage Res.* 106, 117–123.
- Harden C. 1988. Mesoscale estimation of soil erosion in the Rio Ambato drainage, Ecuadorian Sierra. *Mountain Research and Development* 8: 331-341.
- Iñiguez–Armijos, C., Leiva, A., Frede, H.G., Hampel, H., Breuer, L., 2014. Deforestation and Benthic Indicators: How Much Vegetation Cover Is Needed to Sustain Healthy Andean Streams? *PLoS ONE* 9(8): e105869.
- Jordán López, A., 2006. *Manual de edafología*. Universidad de Sevilla. 144pp.
- Kairis, O., Karavitis, C., Salvati, L., Kounalaki, A., Kosmas, K., 2015. Exploring the Impact of Overgrazing on Soil Erosion and Land Degradation in a Dry Mediterranean Agro-Forest Landscape (Crete, Greece). *Arid Land Research and Management*. 29, 360-374.

- Mandal, D., y Sharda, V.N., 2013. Appraisal of soil erosion risk in the Eastern Himalayan region of India for soil conservation planning. *Land Degrad. Dev.* 24, 430–437.
- Martínez-Murillo, J.F., 2006. Variabilidad espacio-temporal del sistema geomorfológico mediterráneo en un ambiente ecotono semiárido/subhúmedo de los Montes de Málaga. Implicaciones hidrológicas y erosivas. Tesis doctoral, Univ. Málaga, España.
- Maass, M., y Burgos, A., 2011. Water Dynamics at the Ecosystem Level in Seasonally Dry Tropical Forests. In: Dirzo, R., Mooney, H., Ceballos, G., Young, H. (eds.). *Seasonally Dry Tropical Forests: Ecology and Conservation*, pp. 141-156. Island Press. Washington, DC 2009, USA.
- Molina, A., Govers, G., Vanacker, V., Poesen, J., Zeelmaekers, E., Cisneros, F., 2007. Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use. *Catena*. 71, 357-370.
- Nigel, R., S.D.D.V., Rughooputh., 2010a. Soil erosion risk mapping with new datasets: An improved identification and prioritisation of high erosion risk areas. *Catena* 82, 191–205.
- Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., Willems, P., 2014. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 3179–3193.
- Pineda, L., Ntegeka, V., Willems, P., 2013. Rainfall variability related to sea surface temperature anomalies in a Pacific–Andean basin into Ecuador and Peru. *Adv. Geosci.* 33, 53–62.
- Podwojewski P, Poulenard J, Zambrana T, Hofstede R. 2002. Overgrazing effects on

- vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management* 18: 45-55.
- Renard, K.G., y Freimund, J.R., 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE. *Journal of Hydrology*. 157, 287–306.
- Richter, M., Diertl, K.-H., Emck, P., Peters, T., Beck, E., 2009. Reasons for an outstanding plant diversity in the tropical Andes of Southern Ecuador. *Landscape Online*. 12, 1–35.
- Romero, C.C., Stroosnijder, L., Baigorria, G.A., 2007. Interrill and rill erodibility in the northern Andean Highlands. *Catena*. 70, 105-113.
- Ruiz-Sinoga, J.D., y Romero Diaz, A., 2010. Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in Southern Spain. *Geomorphology*. 118, 359–368.
- Savory, A., 1999. *Holistic Management: A New Framework for Decision Making*, second ed. Island Press, 616 pp.
- Sonder, K., 2004. *Soil Erosion in Andean Cropping Systems: The Impact of Rainfall Erosivity*. PhD Thesis. Institute for Plant Production and Agroecology in the Tropics and Subtropics, Univ. of Hohenheim.
- Stevenson, F., 1982. *Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions*. John Wiley and Sons. New York. 443 pp.
- Taguas, E., 2007. *Evaluación de la pérdida de suelo en olivar a escala de microcuena bajo distintos manejos de suelo*. Tesis doctoral. Univ. Córdoba. 354pp.
- Tapia-Armijos, M.F., Homeier, J., Espinosa, C.I., Leuschner, C., de la Cruz, M., 2015. *Deforestation and forest fragmentation in South Ecuador since the 1970s – losing a*

hotspot of biodiversity. PLoS ONE. 10(9). e0133701.

Castro, L. M., Calvas, B., Hildebrandt, P., Knoke, T., 2013. Avoiding the loss of shade coffee plantations: How to derive conservation payments for risk-averse land-users.

Agrofor. Syst. 87, 331–347.

Cedeño, J., Cornejo, M. P., 2008. Evaluation of three precipitation products on ecuadorian coast, available at:

[http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/Workshops/Reanalysis2008/Documents/Posters/P3-25\\_ea.pdf](http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/Workshops/Reanalysis2008/Documents/Posters/P3-25_ea.pdf) (Accessed 12 April 2014)

Cerdà, A., 1998. Relationship between climate and soil hydrological and erosional characteristics along climatic gradients in Mediterranean limestone areas.

Geomorphology 25, 123-134.

Cerdà, A., 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. Soil Tillage Res. 36, 1–8.

Cerdà, A., Giménez-Morera, A., Bodí, M.B., 2009. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin. Earth Surf. Processes Landforms. 34, 1822–1830.

Cerdà, A., Lavee, H., Romero-Díaz, A. , Hooke, J., Montanarella, L., 2010. Soil erosion and degradation in mediterranean type ecosystems. Land Degrad. Dev. 21, 71–74.

Chavez, R., 2006. Modeling Soil erosion risk in Los Maribios volcanic chain, Nicaragua. Tropical Resources Bulletin. 25, 50–56.

Cueva, J., Chalán., L., 2010. Cobertura Vegetal y Uso Actual del Suelo de la Provincia de Loja. Informe Técnico. Departamento de Sistemas de Información Geográfica de

Naturaleza & Cultura Internacional. Gráficas Amazonas. Loja–Ecuador.  
<http://www.naturalezaycultura.org/docs/Informe%20Cobertura%20Vegetal.pdf>

- Espinosa, C. I., De La Cruz, M., Luzuriaga, A. L., Escudero, A., 2012. Bosques tropicales secos de la región Pacífico Ecuatorial: diversidad, estructura, funcionamiento e implicaciones para la conservación. *Ecosistemas*. 21, 167–179.
- Espinosa, C. I., Luzuriaga, A. L., De La Cruz, M., Escudero, A., 2014. Climate and grazing control nurse effects in an Ecuadorian dry shrubby community. *J. Trop. Ecology*. 30, 23–32.
- FAO, 2006. Guidelines for soil description. Food and Agriculture Organization of the United Nations (p. 109). Rome.
- FAO, 2010a. Statistics division. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/default.aspx>. Accessed 14 June 2013
- FAO, 2010b. Growing food for nine billion. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/013/am023e/am023e00.pdf>. Accessed 20 June 2013
- Fries, A., et al., 2009. Thermal Structure of a Megadiverse Mountain Ecosystem in Southern Ecuador, and its Regionalization. *Erdkunde*. 63, 321–335.
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T., Bendix, J., 2012. Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agric. For. Meteorol.* 152, 17–30.
- Fries, A., et al., 2014. Catchment precipitation processes in the San Francisco valley in southern Ecuador: combined approach using high-resolution radar images and in situ observations. *Meteorol. Atmos. Phys.* 126, 13–29.
- Gabarrón-Galeote, M. A., Martínez-Murillo, J. F., Quesada, M. A., Ruiz-Sinoga, J. D., 2013. Seasonal changes in the soil hydrological and erosive response depending on aspect, vegetation type and soil water repellency in different Mediterranean micro

- environments. *Solid Earth*. 4, 497–509.
- García-Orenes, F., et al., 2009. Effects of agricultural management on surface soil properties and soil-water losses in eastern Spain. *Soil Tillage Res.* 106, 117–123.
- Guijarro Pastor, J. A., 2011. User guide to Climatol: An R package for homogenization of climatological series. *R Packages*. 1, 33.
- Kairis, O., Karavitis, C., Salvati, L., Kounalaki, A., Kosmas, K., 2015. Exploring the Impact of Overgrazing on Soil Erosion and Land Degradation in a Dry Mediterranean Agro-Forest Landscape (Crete, Greece). *Arid Land Research and Management*. 29: 360-374.
- Knoke, T., et al., 2014. Afforestation or intense pasturing improve the ecological and economic value of abandoned tropical farmlands. *Nat. Commun.* 5: 5612.
- Lieskovský, J., Kenderessy, P., 2014. Modelling the effect of vegetation cover and different tillage practices on soil erosion in vineyards: A case study in vrábľa (Slovakia) using WATEM/SEDEM. *Land Degrad. Dev.* 25, 288-296.
- MAGAP, 2011. Costos de producción. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca del Ecuador. [http://www.magap.gob.ec/sinagap/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=97](http://www.magap.gob.ec/sinagap/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=97). Accessed 25 Jan 2013
- Mandal, D., Sharda, V. N., 2013. Appraisal of soil erosion risk in the Eastern Himalayan region of India for soil conservation planning. *Land Degrad. Dev.* 24, 430–437.
- Maass, M., Burgos, A., 2011. Water Dynamics at the Ecosystem Level in Seasonally Dry Tropical Forests. In: Dirzo, R., Mooney, H., Ceballos, G., Young, H. (eds.). *Seasonally Dry Tropical Forests: Ecology and Conservation*, pp. 141-156. Island

Press. Washington, DC 20009, USA.

Morgan, R.P.C., et al., 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University

Morgan, R.P.C., 2005. Soil Erosion and Conservation, 3rd ed. Blackwell, Malden.

Nigel, R., S.D.D.V., Rughooputh., 2010a. Soil erosion risk mapping with new datasets: An improved identification and prioritisation of high erosion risk areas. *Catena* 82, 191–205.

Nigel, R., Rughooputh, S.D.D.V., 2010b. Mapping of monthly soil erosion risk of mainland Mauritius and its aggregation with delineated basins. *Geomorphology* 114, 101–114.

Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P., Willems, P., 2014. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 3179–3193.

Ochoa-Cueva, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J., Boll, J., 2015. Spatial Estimation of Soil Erosion Risk by Land-cover Change in the Andes of Southern Ecuador. *Land Degrad. Dev.* 26, 565 - 573.

Oñate-Valdivieso, F., Bosque, J., 2010. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. *J. Hydrol.* 395, 256–263.

Palacio, R.G., Bisigato, A.J., Bouza, P.J., 2014. Soil erosion in three grazed plant communities in Northeastern Patagonia. *Land Degrad. Dev.* 25, 594-603.

Pérez-Rodríguez, R., Marques, M. J., Bienes, R., 2007. Spatial variability of the soil erodibility parameters and their relation with the soil map at subgroup level. *Sci.*



Total Environ. 378, 166–173.

Panagos, P., Karydas, C., Ballabio, C., Gitas, I., 2014. Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 model in Crete focusing on agricultural land uses. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 5, 461–487.

Pineda, L., Ntegeka, V., Willems, P., 2013. Rainfall variability related to sea surface temperature anomalies in a Pacific–Andean basin into Ecuador and Peru. *Adv. Geosci.* 33, 53–62.

Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., Hofstede, R., 2002. Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Manag.* 18, 45–55.

Renard, K., Freimund, J., 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor RUSLE. *J. Hydrol.* 157, 287–306.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation. *USDA Agriculture Handbook*, No. 703. 404pp.

Richter, M., Diertl, K.-H., Emck, P., Peters, T., Beck, E., 2009. Reasons for an outstanding plant diversity in the tropical Andes of Southern Ecuador. *Landscape Online.* 12, 1–35.

Romero, C. C., Baigorria, G. A., Stroosnijder, L., 2007. Changes of erosive rainfall for El Niño and La Niña years in the northern Andean highlands of Peru. *Clim. Change.* 85, 343–356.

Ruiz-Sinoga, J. D., Romero, Diaz A., 2010. Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in Southern Spain. *Geomorphology* 118, 359–368.

- Savory, A., 1999. *Holistic Management: A New Framework for Decision Making*, second ed. Island Press, 616 pp.
- Soil Survey Staff., 1996. *Soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Rep. Vol. 42. US Dept. Agric.-Nat. Res. Cons. Serv., Washington, DC.
- Stocking, M., 1981. A working model for the estimation of soil loss suitable for underdevelopment areas, Development Studies Occasional Paper No. 15, University of East Anglia, UK.
- Tote, C., et al., 2011. Effect of ENSO events on sediment production in a large coastal basin in northern Peru. *Earth Surf. Processes Landforms*. 36, 1776–1788.
- Vázquez, M.A., Larrea, M., Suarez, L., Ojeda, P. (Eds), 2001. *Biodiversidad en los bosques secos del suroccidente de la provincia de Loja: un reporte de las evaluaciones ecologicas y socioeconomicas rapidas*. EcoCiencia, MAE, Herbario Loja y Proyecto Bosque Seco, Quito, Ecuador.
- Weber, K.T., y Gokhale, B.S., 2011. Effect of grazing on soil-water content in semiarid rangelands of southeast Idaho. *J. Arid. Environ.* 75, 464–470.
- Winckell, A., Zebrowski, C., Sourdat, M., 1997a. *Los paisajes naturales del Ecuador*. Quito, EC, CEDIG, IPGH, ORSTOM, IGM. v. 2 (Geografía Básica del Ecuador), tomo 4. Geografía Física. 417 pp.
- Winckell, A., et al., 1997b. *Las condiciones del medio natural*. Quito, EC, CEDIG, IPGH, ORSTOM, IGM. v. 1 (Geografía Básica del Ecuador), tomo 4. Geografía Física. 159 pp.
- Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F., Gao, P., 2013. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degrad. Dev.* 24, 499–

510.

Zehetner, F., y Miller W.P., 2006. Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena*. 65, 201-213.



**CAPÍTULO VII:  
ANEXOS**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**MANEJO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO Y AGUA EN  
LOS ANDES DEL SUR DE ECUADOR**



## CAPÍTULO VII: ANEXOS

- 1.- Hoja de campo (a), con su descripción (b) y fotografías del muestreo (c).
- 2.- Análisis estadísticos.
- 3.- Coordinador de fase de campo del muestreo de suelos.
- 4.- Protocolos de laboratorio de MOS y textura.
- 5.- Informe del laboratorio de suelos agrícolas del proyecto PCI\_Iberoamérica – AECID.
- 6.- Proyecciones futuras en relación al manejo y conservación del suelo en el sur de Ecuador.
- 7.- Información climática utilizada.

**7.1. Hoja de campo (a), con su descripción (b) y fotografías del muestreo (c).**

**a) Hoja de campo para el muestreo del suelo de cuencas del área local de estudio (FAO, 2006)**

Persona/s:		<b>Observaciones / Esquema gráfico</b>             Tomar 1 muestra compuesta de 8-9 sub-muestras de sitios homogéneos del suelo.
Código del lugar:	Fecha:	
Coordenadas (UTM):	Posición en el paisaje: CR/UP/MS/LS/TS/BO	
	Uso del suelo/vegetación: BN/PA/SP/Ar/PZ/C	
Altitud:	Condición vegetación: B / R / M	
Pendiente (%):	Tratamiento de la vegetación: SR/CN/Te+CN/sT	
Forma de pendiente: S / C / V / T / X	Distancia al filo y su uso:	
Orientación de pendiente: °	Distancia al cauce y su uso:	
Estado del clima: WC1/WC2/WC3/WC4/WC5	Temperatura media la semana pasada (°C):	
Clima del día: SU/PC/OV/RA/SL	Régimen de humedad del suelo:	
Rocas superficie (%):	Piedras superficie (% + (cm) ):	
Costra superficial: Y / N	Costra(mm):	
Influencia humana: BR/TE/FE/MU/MO/IU/AD/PL/SC/N		
Profundidad de raíces (cm):		
Enraizamiento profundo (visible) (cm):		
Profundidad a roca (cm):		

Horizontes del suelo a muestrear	Prof. (cm)	Vol % rocas	D.A.	Color suelo húmedo	Moteados (%+color)	Estructura	A describir en laboratorio (si aplica)				
							CaCO3	Textura	C.E. (dS/m)	pH	MOS
Oi horizon (hojarasca)											
Oe horizon (descomposición)											
Oa horizon (Humus desc.)											
<b>A horizonte</b>											
<b>B horizonte</b>											
<b>C horizonte</b>											



## b) DESCRIPCIÓN DE INFORMACIÓN DE LA HOJA DE CAMPO (FAO, 2006)

<b>Uso del suelo/vegetación:</b>	Bosque natural	<b>BN</b>	<b>Código del lugar:</b>	Las 3 primeras letras del nombre + N° mapa	
	Plantaciones de Arboles	<b>PA</b>		<b>Pendiente:</b>	Oriental/Occidental
	Silvo-pasturas	<b>SP</b>	<b>Forma de pendiente:</b>		Recta
	Arbustos - Sucesión	<b>Ar</b>		Cóncava	<b>C</b>
	Pastizales	<b>PZ</b>		Convexa	<b>V</b>
	Cultivos	<b>C</b>		Terraza - escalonado	<b>T</b>
				Compleja	<b>X</b>
<b>Condición de Vegetación:</b>	Buena > 75%	<b>B</b>	<b>Influencia humana:</b>	Quemas	<b>BR</b>
	Regular 50 - 75%	<b>R</b>		Terrazas	<b>TE</b>
	Mala < de 50%	<b>M</b>		Aplicación de fertilizantes	<b>FE</b>
		Aplicación de materia orgánica		<b>MO</b>	
				Riego	<b>IU</b>
<b>Tratamiento de vegetación:</b>	Surcos rectos	<b>SR</b>	Arado	<b>PL</b>	
	Curvas a nivel	<b>CN</b>	Compactación de la superficie	<b>SC</b>	
	Terraza y curva a nivel	<b>T+CN</b>	Contaminación	<b>PO</b>	
	Sin tratamiento	<b>s/T</b>	Tala de bosque primaria	<b>TP</b>	
			No influye	<b>N</b>	
<b>Posición en el paisaje:</b>	Corona - Cresta	<b>CR</b>	<b>Estado del clima:</b>	Ausencia de lluvia en el presente mes	<b>WC1</b>
	Alta pendiente	<b>UP</b>		Ausencia de lluvia en la presente semana	<b>WC2</b>
	Media pendiente	<b>MS</b>		Ausencia de lluvia en las 24 horas	<b>WC3</b>
	Baja pendiente	<b>LS</b>		Lluvioso, lluvias en las últimas 24 horas	<b>WC4</b>
	Inicio de la pendiente	<b>TS</b>		Aguaceros en las últimas 24 horas	<b>WC5</b>
	Junto al cauce - plano	<b>BO</b>			
<b>Clima del día:</b>	Soleado	<b>SU</b>			
	Parcialmente nublado	<b>PC</b>			
	Nublado - sombrío	<b>OV</b>			
	Lluvia fuerte	<b>RA</b>			
	Llovizna	<b>SL</b>			
<b>Distancia al filo y su uso:</b>	Dist. aproximada + Uso del Suelo junto al filo (acompañar de foto y esquema gráfico)				
<b>Distancia al cauce y su uso:</b>	Dist. aproximada + Uso del Suelo junto al cauce (acompañar de foto y esquema gráfico)				

c) Descripción fotográfica del proceso de muestreo de suelos a escala local y regional.

• Esquema fotográfico del muestreo a escala local.



• Muestreo de suelos a escala regional.



## 7.2. Análisis estadísticos

### Repetitividad

*Coefficiente de Variación*

#### Muestra de Suelo 1

$$s = \sqrt{\frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n-1}} \rightarrow \%CV = \frac{s}{\bar{y}} * 100$$

**Tabla 1:** Coeficiente de variación de la primera lectura corregida

	#	Y	Ŷ	Y - Ŷ	(Y - Ŷ) <sup>2</sup>	S	CV %	Sig. Estad.
<b>MIN 01</b>	1	43,25	43,758	-0,508	0,258064	0,994884695	2,27360641	NO
	2	43,23		-0,528	0,278784			
	3	43,25		-0,508	0,258064			
	4	45,27		1,512	2,286144			
	5	44,25		0,492	0,242064			
	6	45,31		1,552	2,408704			
	7	44,31		0,552	0,304704			
	8	43,23		-0,528	0,278784			
	9	42,23		-1,528	2,334784			
	10	43,25		-0,508	0,258064			
	Σ=	437,58		Σ=	8,90816			

**Tabla 2:** Coeficiente de variación de la segunda lectura

	#	Y	Ŷ	Y - Ŷ	(Y - Ŷ) <sup>2</sup>	S	CV %	Sig. Estad.
<b>MIN 01</b>	1	20,6	20,595	0,005	0,166464	0,068516016	0,33268277	NO
	2	20,6		0,005	0,327184			
	3	20,65		0,055	0,003025			
	4	20,7		0,105	0,011025			
	5	20,7		0,105	0,011025			
	6	20,5		-0,095	0,009025			
	7	20,55		-0,045	0,002025			
	8	20,55		-0,045	0,002025			
	9	20,55		-0,045	0,002025			
	10	20,55		-0,045	0,002025			
	Σ=	205,95		Σ=	0,04225			

**Muestra de Suelo 2**

**Tabla 3:** Coeficiente de variación de la primera lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
<b>MIN 08</b>	1	30,2	27,407	2,793	7,800849	1,531890988	5,58941507	NO
	2	25,25		-2,157	4,652649			
	3	25,25		-2,157	4,652649			
	4	27,16		-0,247	0,061009			
	5	27,2		-0,207	0,042849			
	6	28,18		0,773	0,597529			
	7	26,22		-1,187	1,408969			
	8	28,23		0,823	0,677329			
	9	28,2		0,793	0,628849			
	10	28,18		0,773	0,597529			
	$\Sigma=$	274,07		$\Sigma=$	21,12021			

**Tabla 4:** Coeficiente de variación de la segunda lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
<b>MIN 08</b>	1	11,2	10,507	0,693	0,480249	0,4650221	4,42583137	NO
	2	10,25		-0,257	0,066049			
	3	10,25		-0,257	0,066049			
	4	11,16		0,653	0,426409			
	5	10,2		-0,307	0,094249			
	6	10,18		-0,327	0,106929			
	7	10,22		-0,287	0,082369			
	8	10,23		-0,277	0,076729			
	9	10,2		-0,307	0,094249			
	10	11,18		0,673	0,452929			
	$\Sigma=$	105,07		$\Sigma=$	1,94621			

## Muestra de Suelo 3

Tabla 5: Coeficiente de variación de la primera lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
ZH 20	1	22,2	25,437	-3,237	10,478169	1,870769598	7,35452136	NO
	2	24,27		-1,167	1,361889			
	3	26,22		0,783	0,613089			
	4	26,27		0,833	0,693889			
	5	27,25		1,813	3,286969			
	6	22,27		-3,167	10,029889			
	7	26,22		0,783	0,613089			
	8	26,23		0,793	0,628849			
	9	27,22		1,783	3,179089			
	10	26,22		0,783	0,613089			
	$\Sigma=$	254,37		$\Sigma=$	31,49801			

Tabla 6: Coeficiente de variación de la segunda lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
ZH 20	1	12,2	12,837	-0,637	0,405769	1,0709295	8,34252164	NO
	2	11,27		-1,567	2,455489			
	3	12,22		-0,617	0,380689			
	4	13,27		0,433	0,187489			
	5	14,25		1,413	1,996569			
	6	12,27		-0,567	0,321489			
	7	12,22		-0,617	0,380689			
	8	12,23		-0,607	0,368449			
	9	14,22		1,383	1,912689			
	10	14,22		1,383	1,912689			
	$\Sigma=$	128,37		$\Sigma=$	10,32201			

**Muestra de Suelo 4**

**Tabla 7:** Coeficiente de variación de la primera lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
<b>SIM 30</b>	1	28,23	29,228	-0,998	0,996004	1,945369431	6,65584176	NO
	2	30,23		1,002	1,004004			
	3	30,23		1,002	1,004004			
	4	29,23		0,002	0,000004			
	5	31,23		2,002	4,008004			
	6	29,22		-0,008	0,000064			
	7	32,23		3,002	9,012004			
	8	26,22		-3,008	9,048064			
	9	29,23		0,002	0,000004			
	10	26,23		-2,998	8,988004			
	$\Sigma=$	292,28		$\Sigma=$	34,06016			

**Tabla 8:** Coeficiente de variación de la segunda lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
<b>SIM 30</b>	1	9,23	9,527	-0,297	0,088209	0,82450052	8,65435627	NO
	2	8,23		-1,297	1,682209			
	3	10,23		0,703	0,494209			
	4	9,23		-0,297	0,088209			
	5	10,23		0,703	0,494209			
	6	9,22		-0,307	0,094249			
	7	11,23		1,703	2,900209			
	8	9,22		-0,307	0,094249			
	9	9,22		-0,307	0,094249			
	10	9,23		-0,297	0,088209			
	$\Sigma=$	95,27		$\Sigma=$	6,11821			



## Muestra de Suelo 5

Tabla 9: Coeficiente de correlación de la primera lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
CAR 23	1	24,2	21,381	2,819	7,946761	1,673535512	7,82720879	NO
	2	21,23		-0,151	0,022801			
	3	21,14		-0,241	0,058081			
	4	23,16		1,779	3,164841			
	5	22,14		0,759	0,576081			
	6	22,16		0,779	0,606841			
	7	21,16		-0,221	0,048841			
	8	20,22		-1,161	1,347921			
	9	18,22		-3,161	9,991921			
	10	20,18		-1,201	1,442401			
	$\Sigma=$	213,81		$\Sigma=$	25,20649			

Tabla 10: Coeficiente de correlación de la segunda lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
CAR 23	1	6,2	5,959	0,241	0,058081	0,42069915	7,05989518	NO
	2	6,23		0,271	0,073441			
	3	6,14		0,181	0,032761			
	4	6,16		0,201	0,040401			
	5	6,14		0,181	0,032761			
	6	5,16		-0,799	0,638401			
	7	6,16		0,201	0,040401			
	8	6		0,041	0,001681			
	9	6,22		0,261	0,068121			
	10	5,18		-0,779	0,606841			
	$\Sigma=$	59,59		$\Sigma=$	1,59289			

Muestra de Suelo 6

Tabla 11: Coeficiente de correlación de la primera lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
SIM 29	1	19,16	21,042	-1,882	3,541924	1,216313191	5,78040676	NO
	2	22,18		1,138	1,295044			
	3	19,18		-1,862	3,467044			
	4	22,18		1,138	1,295044			
	5	21,18		0,138	0,019044			
	6	22,18		1,138	1,295044			
	7	20		-1,042	1,085764			
	8	21		-0,042	0,001764			
	9	21,18		0,138	0,019044			
	10	22,18		1,138	1,295044			
	$\Sigma=$	210,42		$\Sigma=$	13,31476			

Tabla 12: Coeficiente de correlación de la segunda lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
SIM 29	1	5,16	5,16	0	0	0,43060681	8,34509316	NO
	2	5,18		0,02	0,0004			
	3	4,18		-0,98	0,9604			
	4	5,18		0,02	0,0004			
	5	5,18		0,02	0,0004			
	6	5,18		0,02	0,0004			
	7	6		0,84	0,7056			
	8	5,18		0,02	0,0004			
	9	5,18		0,02	0,0004			
	10	5,18		0,02	0,0004			
	$\Sigma=$	51,6		$\Sigma=$	1,6688			



## Muestra de Suelo 7

Tabla 13: Coeficiente de variación de la primera lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
CAR 28	1	20,98	24,477	-3,497	12,229009	1,575253419	6,43564742	NO
	2	24,96		0,483	0,233289			
	3	25,96		1,483	2,199289			
	4	23,98		-0,497	0,247009			
	5	25,00		0,523	0,273529			
	6	24,96		0,483	0,233289			
	7	25,96		1,483	2,199289			
	8	25,98		1,503	2,259009			
	9	22,98		-1,497	2,241009			
	10	24,01		-0,467	0,218089			
	$\Sigma=$	244,77		$\Sigma=$	22,33281			

Tabla 14: Coeficiente de variación de la segunda lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
CAR 28	1	11,98	11,56	0,42	0,1764	0,98137092	8,48936785	NO
	2	11,96		0,4	0,16			
	3	11,96		0,4	0,16			
	4	12,98		1,42	2,0164			
	5	12		0,44	0,1936			
	6	11,96		0,4	0,16			
	7	11,96		0,4	0,16			
	8	9,98		-1,58	2,4964			
	9	9,91		-1,65	2,7225			
	10	10,91		-0,65	0,4225			
	$\Sigma=$	115,6		$\Sigma=$	8,6678			

Muestra de Suelo 8

Tabla 15: Coeficiente de variación de la primera lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
CAR 24	1	16,89	17,324	-0,434	0,188356	1,267440115	7,31609394	NO
	2	18,91		1,586	2,515396			
	3	16,89		-0,434	0,188356			
	4	17,1		-0,224	0,050176			
	5	16,86		-0,464	0,215296			
	6	18,89		1,566	2,452356			
	7	16,89		-0,434	0,188356			
	8	18,83		1,506	2,268036			
	9	14,8		-2,524	6,370576			
	10	17,18		-0,144	0,020736			
	$\Sigma=$	173,24		$\Sigma=$	14,45764			

Tabla 16: Coeficiente de variación de la segunda lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
CAR 24	1	7,89	8,372	-0,482	0,232324	0,72338402	8,64051628	NO
	2	8,91		0,538	0,289444			
	3	8,89		0,518	0,268324			
	4	8,89		0,518	0,268324			
	5	8,86		0,488	0,238144			
	6	7,89		-0,482	0,232324			
	7	8,89		0,518	0,268324			
	8	6,84		-1,532	2,347024			
	9	7,8		-0,572	0,327184			
	10	8,86		0,488	0,238144			
	$\Sigma=$	83,72		$\Sigma=$	4,70956			

## Muestra de Suelo 9

Tabla 17: Coeficiente de correlación de la primera lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
MIN 03	1	20,5	20,485	0,015	0,000225	0,078351062	0,38248017	NO
	2	20,4		-0,085	0,007225			
	3	20,4		-0,085	0,007225			
	4	20,4		-0,085	0,007225			
	5	20,45		-0,035	0,001225			
	6	20,45		-0,035	0,001225			
	7	20,6		0,115	0,013225			
	8	20,5		0,015	0,000225			
	9	20,55		0,065	0,004225			
	10	20,6		0,115	0,013225			
	$\Sigma=$	204,85		$\Sigma=$	0,05525			

Tabla 18: Coeficiente de correlación de la segunda lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
MIN 03	1	11,18	11,874	-0,694	0,481636	0,79671827	6,70977151	NO
	2	13,14		1,266	1,602756			
	3	13,14		1,266	1,602756			
	4	12,14		0,266	0,070756			
	5	12,16		0,286	0,081796			
	6	12,16		0,286	0,081796			
	7	11,22		-0,654	0,427716			
	8	11,18		-0,694	0,481636			
	9	11,2		-0,674	0,454276			
	10	11,22		-0,654	0,427716			
	$\Sigma=$	118,74		$\Sigma=$	5,71284			

**Muestra de Suelo 10**

**Tabla 9:** Coeficiente de variación de la primera lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
<b>MIN 09</b>	1	20,6	20,595	0,005	2,5E-05	0,068516016	0,33268277	NO
	2	20,6		0,005	2,5E-05			
	3	20,65		0,055	0,003025			
	4	20,7		0,105	0,011025			
	5	20,7		0,105	0,011025			
	6	20,5		-0,095	0,009025			
	7	20,55		-0,045	0,002025			
	8	20,55		-0,045	0,002025			
	9	20,55		-0,045	0,002025			
	10	20,55		-0,045	0,002025			
	$\Sigma=$	205,95		$\Sigma=$	0,04225			

**Tabla 10:** Coeficiente de variación de la segunda lectura

	#	Y	$\hat{Y}$	$Y - \hat{Y}$	$(Y - \hat{Y})^2$	S	CV %	Sig. Estad.
<b>MIN 09</b>	1	10,22	9,328	0,892	0,795664	0,56061078	6,00997832	NO
	2	9,22		-0,108	0,011664			
	3	9,22		-0,108	0,011664			
	4	8,25		-1,078	1,162084			
	5	9,25		-0,078	0,006084			
	6	9,18		-0,148	0,021904			
	7	10,22		0,892	0,795664			
	8	9,25		-0,078	0,006084			
	9	9,22		-0,108	0,011664			
	10	9,25		-0,078	0,006084			
	$\Sigma=$	93,28		$\Sigma=$	2,82856			

## Reproducibilidad

- Diferencia estadística a través de la prueba de *t-student*.

### Muestra de Suelo (MS) 1

**Tabla 11. MS-1 (primera lectura)**

No.	A	B	A-B
1	43,25	45,31	-2,06
2	43,23	44,31	-1,08
3	43,25	43,23	0,02
4	45,27	42,23	3,04
5	44,25	43,25	1
		Media=	0,184
		Desv. Estand=	1,967404381
		n=	5

**Tabla 12. MS-1 (segunda lectura)**

No.	A	B	A-B
1	22,25	23,31	-1,06
2	23,23	23,31	-0,08
3	22,25	21,23	1,02
4	23,27	22,23	1,04
5	23,25	22,25	1
		Media=	0,384
		Desv. Estand=	0,93737933
		n=	5

$T_{exp} = |Media| / (\text{desviación estándar} / n^{1/2})$

$T_{exp} = 0,2094943$

$T_{\text{visto en tabla}} = 1,833$

$T_{exp} < T_{\text{tabla}}; 0,2094943 < 1,833$

$T_{exp} = 0,91762212$

$T_{\text{visto en tabla}} = 1,833$

$T_{exp} < T_{\text{tabla}}; 0,91762212 < 1,833$

### Muestra de Suelo (MS) 2

**Tabla 13. MS-2 (primera lectura)**

No.	A	B	A-B
1	30,2	25,25	4,95
2	25,25	27,16	-1,91
3	27,2	28,18	-0,98
4	26,22	28,23	-2,01
5	28,2	28,18	0,02
		Media=	0,014
		Desv. Estand=	2,878824413
		n=	5

**Tabla 14. MS-2 (segunda lectura)**

No.	A	B	A-B
1	11,2	10,18	1,02
2	10,25	10,22	0,03
3	10,25	10,23	0,02
4	11,16	10,2	0,96
5	10,2	11,18	-0,98
		Media=	0,21
		Desv. Estand=	0,82207056
		n=	5

$T_{exp} = |Media| / (\text{desviación estándar} / n^{1/2})$

$T_{exp} = 0,01089334$

$T_{\text{visto en tabla}} = 1,833$

$T_{exp} < T_{\text{tabla}}; 0,01089334 < 1,833$

$T_{exp} = 0,57221366$

$T_{\text{visto en tabla}} = 1,833$

$T_{exp} < T_{\text{tabla}}; 0,57221366 < 1,833$

**Muestra de Suelo (MS) 3**

**Tabla 15. MS-3 (Primera lectura)**

No.	A	B	A-B
1	22,2	24,27	-2,07
2	26,22	26,27	-0,05
3	27,25	22,27	4,98
4	26,22	26,23	-0,01
5	27,22	26,22	1
		Media=	0,77
		Desv. Estand=	2,604006528
		n=	5

**Tabla 16. MS-3 (Segunda lectura)**

No.	A	B	A-B
1	12,2	12,27	-0,07
2	11,27	12,22	-0,95
3	12,22	12,23	-0,01
4	13,27	14,22	-0,95
5	14,25	14,22	0,03
		Media=	-0,39
		Desv. Estand=	0,51244512
		n=	5

$T_{exp} = |Media| / (desviación\ estándar / n^{1/2})$

$T_{exp} = 0,66236393$

$T_{visto\ en\ tabla} = 1,833$

$T_{exp} < T_{tabla}; 0,66236393 < 1,833$

$T_{exp} = -1,70476792$

$T_{visto\ en\ tabla} = 1,833$

$T_{exp} < T_{tabla}; -1,70476792 < 1,833$

**Muestra de Suelo (MS) 4**

**Tabla 17. MS-4 (primera lectura)**

No.	A	B	A-B
1	28,23	29,22	-0,99
2	30,23	32,23	-2
3	30,23	26,22	4,01
4	29,23	29,23	0
5	31,23	26,23	5
		Media=	1,204
		Desv. Estand=	3,1149687
		n=	5

**Tabla 18. MS-4 (segunda lectura)**

No.	A	B	A-B
1	9,23	9,22	0,01
2	8,23	11,23	-3
3	10,23	9,22	1,01
4	9,23	9,22	0,01
5	10,23	9,23	1
		Media=	-0,194
		Desv. Estand=	1,64560931
		n=	5

$T_{exp} = |Media| / (desviación\ estándar / n^{1/2})$

$T_{exp} = 0,86580645$

$T_{visto\ en\ tabla} = 1,833$

$T_{exp} < T_{tabla}; 0,86580645 < 1,833$

$T_{exp} = -0,2640724$

$T_{visto\ en\ tabla} = 1,833$

$T_{exp} < T_{tabla}; -0,2640724 < 1,833$

**Muestra de Suelo (MS) 5****Tabla 19. MS-5 (primera lectura)**

No.	A	B	A-B
1	24,2	21,23	2,97
2	21,14	23,16	-2,02
3	22,14	22,16	-0,02
4	21,16	20,22	0,94
5	18,22	20,18	-1,96
		Media=	-0,018
		Desv. Estand=	2,099123627
		n=	5

$$T_{exp} = |Media| / (\text{desviación estándar} / n^{1/2})$$

$$T_{exp} = -0,01920802$$

$$T_{visto\ en\ tabla} = 1,833$$

$$T_{exp} < T_{tabla}; -0,01920802 < 1,833$$

**Tabla 20. MS-5 (segunda lectura)**

No.	A	B	A-B
1	6,2	6,23	-0,03
2	6,14	6,16	-0,02
3	6,14	5,16	0,98
4	6,16	6	0,16
5	6,22	5,18	1,04
		Media=	0,426
		Desv. Estand=	0,53886919
		n=	5

$$T_{exp} = 1,77081938$$

$$T_{visto\ en\ tabla} = 1,833$$

$$T_{exp} < T_{tabla}; 1,77081938 < 1,833$$

**Muestra de Suelo (MS) 6****Tabla 21. MS-6 (primera lectura)**

No.	A	B	A-B
1	19,16	22,18	-3,02
2	22,18	20	2,18
3	19,18	21	-1,82
4	22,18	21,18	1
5	21,18	22,18	-1
		Media=	-0,532
		Desv. Estand=	2,107728635
		n=	5

$$T_{exp} = |Media| / (\text{desviación estándar} / n^{1/2})$$

$$T_{exp} = -0,56538588$$

$$T_{visto\ en\ tabla} = 1,833$$

$$T_{exp} < T_{tabla}; -0,56538588 < 1,833$$

**Tabla 22. MS-6 (segunda lectura)**

No.	A	B	A-B
1	5,16	5,18	-0,02
2	4,18	5,18	-1
3	5,18	5,18	0
4	6	5,18	0,82
5	5,18	5,18	0
		Media=	-0,04
		Desv. Estand=	0,64513564
		n=	5

$$T_{exp} = -0,13888552$$

$$T_{visto\ en\ tabla} = 1,833$$

$$T_{exp} < T_{tabla}; -0,13888552 < 1,833$$

**Muestra de Suelo (MS) 7**

**Tabla 23. MS-7 (Primera Lectura)**

No.	A	B	A-B
1	20,98	24,96	-3,98
2	24,96	25,96	-1
3	25,96	25,98	-0,02
4	23,98	22,98	1
5	25	24,01	0,99
		Media=	-0,602
		Desv. Estand=	2,062091172
		n=	5

**Tabla 24. MS-7 (Segunda Lectura)**

No.	A	B	A-B
1	11,98	11,96	0,02
2	11,96	12,98	-1,02
3	12	11,96	0,04
4	11,96	9,98	1,98
5	9,91	10,91	-1
		Media=	0,004
		Desv. Estand=	1,22093407
		n=	5

**T exp = |Media| / (desviación estándar/n<sup>1/2</sup>)**

**T exp = -0,65393811**

**T visto en tabla = 1,833**

**T exp < T tabla; -0,65393811 < 1,833**

**T exp = 0,00733864**

**T visto en tabla = 1,833**

**T exp < T tabla; 0,00733864 < 1,833**

**Muestra de Suelo (MS) 8**

**Tabla 25. MS-8 (Primera lectura)**

No.	A	B	A-B
1	16,89	18,89	-2
2	18,91	16,89	2,02
3	16,89	18,83	-1,94
4	17,1	14,8	2,3
5	16,86	17,18	-0,32
		Media=	0,012
		Desv. Estand=	2,075793824
		n=	5

**Tabla 26. MS-8 (Segunda Lectura)**

No.	A	B	A-B
1	7,89	8,91	-1,02
2	8,89	8,89	0
3	8,86	7,89	0,97
4	8,89	6,84	2,05
5	7,8	8,86	-1,06
		Media=	0,188
		Desv. Estand=	1,33516666
		n=	5

**T exp = |Media| / (desviación estándar/n<sup>1/2</sup>)**

**T exp = 0,01294926**

**T visto en tabla = 1,833**

**T exp < T tabla; 0,01294926 < 1,833**

**T exp = 0,31540632**

**T visto en tabla = 1,833**

**T exp < T tabla; 0,31540632 < 1,833**



**Muestra de Suelo (MS) 9****Tabla 27. MS-9 (Primera lectura)**

No.	A	B	A-B
1	20,5	20,4	0,1
2	20,4	20,4	0
3	20,45	20,45	0
4	20,6	20,5	0,1
5	20,55	20,6	-0,05
		Media=	0,03
		Desv. Estand=	0,067082039
		n=	5

$$T_{exp} = |Media| / (\text{desviación estándar}/n^{1/2})$$

$$T_{exp} = 1,00175845$$

$$T_{\text{visto en tabla}} = 1,833$$

$$T_{exp} < T_{\text{tabla}}; 1,00175845 < 1,833$$

**Tabla 28. MS-9 (Segunda lectura)**

No.	A	B	A-B
1	11,18	13,14	-1,96
2	13,14	12,14	1
3	12,16	12,16	0
4	11,22	11,18	0,04
5	11,2	11,22	-0,02
		Media=	-0,188
		Desv. Estand=	1,08014814
		n=	5

$$T_{exp} = -0,38987245$$

$$T_{\text{visto en tabla}} = 1,833$$

$$T_{exp} < T_{\text{tabla}}; -0,38987245 < 1,833$$

**Muestra de Suelo (MS) 10****Tabla 29. MS-10 (Primera lectura)**

No.	A	B	A-B
1	20,6	20,6	0
2	20,65	20,7	-0,05
3	20,7	20,5	0,2
4	20,55	20,55	0
5	20,55	20,55	0
		Media=	0,03
		Desv. Estand=	0,097467943
		n=	5

$$T_{exp} = |Media| / (\text{desviación estándar}/n^{1/2})$$

$$T_{exp} = 0,68945745$$

$$T_{\text{visto en tabla}} = 1,833$$

$$T_{exp} < T_{\text{tabla}}; 0,68945745 < 1,833$$

**Tabla 30. MS-10 (Segunda lectura)**

No.	A	B	A-B
1	10,22	9,18	1,04
2	9,22	10,22	-1
3	9,22	9,25	-0,03
4	8,25	9,22	-0,97
5			0
		Media=	-0,24
		Desv. Estand=	0,96488341
		n=	5

$$T_{exp} = -0,55716576$$

$$T_{\text{visto en tabla}} = 1,833$$

$$T_{exp} < T_{\text{tabla}}; -0,55716576 < 1,833$$

**Tabla 31:** Correlación de Pearson entre la MOS, cobertura vegetal, altitud y pendiente del suelo.

VARIABLES	CORRELACIONES SEGUN PEARSON			
	Altura	Cobertura vegetal	M.O.S	Pendiente
Altura	1			
Cobertura vegetal	,290 (,091)	1		
M.O.S	-,156 (,369)	-,211 (,224)	1	
Pendiente	,019 (,915)	-,009 (,961)	,207 (,233)	1
(*) Correlación con Nivel de Significancia $P < 0.05$				
(**) Correlación con Nivel de Significancia $P < 0.01$				
N: 38; ( ) Valor de Probabilidad				

### 7.3. Coordinador de fase de campo del muestreo de suelos.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

**Of. Nro. 078-SA-UTPL**

Loja, 29 de septiembre de 2011

Ingeniero

Pablo Alejandro Ochoa

**DOCENTE INVESTIGADOR DEL CITTE SERVICIOS AGROPECUARIOS UTPL**

Presente.-

De mi consideración:

Como es de su conocimiento, la Universidad ha sido seleccionada para desarrollar una consultoría de **"Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional"** con el centro de levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN), la participación corresponde al bloque I", específicamente en tema de suelos agrícolas; por lo cual la Dirección del CITTE se permite comunicar a usted que será el **COORDINADOR DE LA FASE DE CAMPO** de dicho componente, por lo que le auguramos el mejor de los éxitos en este trabajo que será para beneficio nuestro CITTE y de la Universidad.

Además de comunicar a Usted que las actividades a realizar estarán basadas lo siguiente: coordinación, supervisión y evaluación de las actividades de fiscalización en Campo las cuales debe estar en coordinación con el Ing. Juan Ignacio Burneo (Responsable del componente)

Atentamente,

  
MSc. Karina Cañón Beltrán

**DIRECTORA (E) SERVICIOS AGROPECUARIOS UTPL**

c.c Archivo



## 7.4. Protocolos de laboratorio de MOS y textura.

### METODO WALKLEY-BLACK /

#### RELASE (Red de Laboratorios de Suelos del Ecuador)

##### 1. PRINCIPIO Y ALCANCE

La materia Orgánica del suelo se calcula indirectamente determinando el carbón orgánico, se oxida por medio del Ion Dicromato que se reduce. Esta reacción se lleva a cabo con la ayuda del calor producido por la adicción de acido sulfúrico concentrado.

Luego por medio de una titulación con sulfato ferroso valorado, cuantificamos la cantidad de Ion dicromato (no reducido) y por diferencia se sabe la cantidad de Ion Dicromato que reaccionó y por tanto el contenido de carbón orgánico de la muestra.

Se sabe que este método no oxida todo el carbón orgánico de la muestra, sino el 77%, esto se compensa multiplicando por el factor 1.3 (1/0.77 o 100/77).

Luego conociendo que la materia orgánica contiene un promedio del 58% de carbono orgánico reactivo, convertimos el carbono orgánico en materia orgánica usando el factor 1.724 (1/0.58 o 100/58).

##### 2. MATERIALES

- Erlenmeyer de 250 ml o vaso de precipitación de 300 ml.
- Pipeta volumétrica de 10 ml
- Probeta de 200 ml
- Bureta de 50 ml
- Balanza analítica
- Soporte universal
- Agitador magnético
- Barras magnéticas de agitación

##### 3. REACTIVOS

1. Dicromato de Potasio:  $K_2Cr_2O_7$
2. Sulfato Ferroso:  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$

3. Ácido Sulfúrico:  $H_2SO_4$
4. Ferroína

### PREPARACIÓN DE REACTIVOS

- **Solución de Dicromato de Potasio 1N:** Pesar 49.04 g Dicromato de Potasio (previamente secado por 2 horas a  $105^{\circ}C$ ) y en un frasco volumétrico de 1 Litro disolver y diluir con agua desionizada y mezclar bien.
- **Acido Sulfúrico concentrado (98%).** Este reactivo se encuentra en la bodega de reactivos.
- **Solución de Sulfato Ferroso Amoniacal 0,5N:**
  1. Suavemente adicionar 20ml de acido sulfúrico dentro de un frasco volumétrico de 1 Litro que contiene 800ml de agua desionizada.
  2. Adicionar 196.1g de sulfato ferroso amoniacal. Disolver, diluir a volumen con agua desionizada, y mezclar bien.
- **Solución de Ferroína 0.025 M.**

Pesar 1.10 de fenantrolina y 6.95 g de sulfato ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ), disolvemos en agua doblemente desionizada o destilada y completar a volumen de 1 litro.

### 4. PROCEDIMIENTO PARA MOS

- a. Pesar 0.25 g de suelo orgánico y en caso de suelo mineral 0.5 g en un frasco Erlenmeyer de 500ml.
- b. Adicionar 5 ml de solución de dicromato de potasio 1N.
- c. Adicionar 10ml de ácido sulfúrico y mezclar vigorosamente con movimiento circular por 1 minuto, teniendo cuidado de que las partículas de suelo no se peguen a las paredes del frasco y queden fuera de contacto con del liquido. Dejar en reposo 30 minutos.
- d. Diluir hasta 100ml con agua desionizada.
- e. Adicionar unas 5 gotas aproximadamente de indicador ferroína.
- f. Titular con la solución de sulfato ferroso amoniacal 0.5N hasta que el color cambie desde verde opaco hasta azul turbio. Y luego adicionar gota a gota la solución titulante hasta que se alcance el punto final cuando el color cambie hasta verde brillante.
- g. Prepare y titule un blanco de la misma manera.
- h. Prepare una muestra por duplicado y una muestra de control de calidad con cada tanda de muestras analizadas.

## DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA DEL SUELO (Método del Hidrómetro)

### 1.- PRINCIPIO Y ALCANCE

El objetivo de este método es determinar la cantidad de arcilla, limo y arena presente en una muestra de suelo y conocer su clasificación textural. La muestra seleccionada debe ser representativa de toda la masa de suelo a estudiar.

El hidrómetro que se utilice debe estar calibrado para determinar la densidad de la suspensión (g/L), la cual es función de la cantidad de partículas que todavía no se han sedimentado. Los resultados de un análisis de laboratorio son más representativos si se expresan en relación al peso del suelo que se ha seco (se utiliza el metodología de suelo seco al aire y tamizado  $T^{\circ} \leq 40^{\circ}\text{C}$ ) puesto que el peso del suelo húmedo o secado al aire es variable, según el contenido de humedad del mismo y del ambiente. En otras palabras, el peso del suelo en base seca es el mejor estándar para basar los cálculos de los diferentes análisis de suelos.

### 2. MATERIALES

- Hidrómetro Bouyoucus calibrado de 0-60g/l
- Probeta graduada de 1000 ml
- Agitador mecánico
- Termómetro electrónico
- Balanza analítica
- Vasos de precipitación de 250 ml
- Pipetas de 5 ml
- Piceta
- Pera
- Varilla de Vidrio
- Cronómetro

### 3. REACTIVOS

- Agentes dispersantes Hidróxido de sodio 1 N y Oxalato de Sodio sobresaturado; Su función es de separar las partículas de limo y arcilla.
- Alcohol amílico, para quitar la espuma que pueda impedir la lectura del hidrómetro.

## PREPARACIÓN DE REACTIVOS

- El peso molecular del hidróxido de sodio es 40gr/mol para preparación del reactivo a una concentración de 1N, se toma en cuenta el peso molecular y la cantidad en ml que se desea preparar así tenemos que si deseamos preparar 1000ml de reactivo, se colocan 40gr de Hidróxido de sodio en 1000 ml de agua destilada, si se requiere preparar 500ml de reactivo se realiza una regla de tres obteniendo como resultado los gramos que se requieren añadir para 500ml de Hidróxido de sodio 1 N.
- Para la preparación el reactivo de oxalato de sodio saturado se añade 30gr de oxalato de sodio en 1000ml de agua destilada, si requiere solamente la mitad de oxalato se, añade 15 gr. en 500ml de agua destilada.

### 4. PROCEDIMIENTO PARA TEXTURA (procedimiento fotográfico al final)

- a. Se tamiza la muestra de suelo a ensayar en el tamiz N°40(2mm)
- b. Se pesa 50g. de suelo ya tamizado y se coloca en un vaso de precipitación con aproximadamente 100ml de agua destilada
- c. Se agita la muestra con una varilla de vidrio y se le añade 5ml de Hidróxido de sodio (NaOH) y 5 ml de oxalato de sodio(COONa)<sub>2</sub> sobresaturado
- d. Se trasvasa el contenido del vaso de precipitación en el vaso de dispersión del agitador mecánico, se usa una piseta con agua destilada para lavar todo residuo del vaso de manera que no se pierda muestra
- e. Se agita la muestra mecánicamente únicamente por 5 minutos
- f. Dispersada la muestra mecánicamente se la transfiere a la probeta completando con agua destilada un volumen de 1000ml. Recuerde no se debe desperdiciar la muestra.
- g. El extremo abierto de la probeta se lo tapa con una funda plástica asegurado de ligas se la asegura de la base, y se procede a mover la probeta invirtiendo su posición y volviéndola a su posición original alternadamente 10 veces,
- h. Se coloca la probeta en un sitio firme se cronometraron 40 segundos y se realizó la primera lectura con el hidrómetro y así mismo la temperatura, se deja las muestras en reposo por dos horas para repetir las lecturas.

## CÁLCULOS

a.) Corregir las lecturas del hidrómetro, tomando en cuenta la media aritmética de las 2 lecturas de la temperatura, por cada grado centígrado mayor o menor a 20°C se suma o se resta 0.36 a la primera y segunda lectura del hidrómetro.

b.) Determinar el material en suspensión con la siguiente expresión

$$\%MS = \frac{\text{Primera lectura corregida}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

c.) Para determinar el porcentaje de arena

$$\%Ao = 100 - MS$$

d.) Porcentaje de Arcilla

$$\%Ac = \frac{\text{Segunda lectura corregida}}{\text{Peso de la muestra}} \times 100$$

e.) Porcentaje de Limo

$$\%Lo = 100 - (\%Ac + Ao) \rightarrow Lo = \%MS - Ac$$

### Hoja de registro de datos preliminares en el laboratorio

Nº Muestra	Hora	Primera lectura (Hidrómetro)	Temperatura	Hora	Segunda lectura (Hidrómetro)

Obtenido el porcentaje de arena, limo y arcilla se procede a determinar la textura del suelo utilizando el triángulo textural

### Ejemplo:

No.	N MUESTRA	PESO DE LA MUESTRA (gr)	LECTURA PRIMERA	LECTURA SEGUNDA	TEMPERATURA	Lecturas Corregidas		% MS	% Ao	% Ac	% Lo	CLASE TEXTURAL
						LECTURA PRIMERA	LECTURA SEGUNDA					
1	SIM-30	50	16	5	21,8	16,65	5,65	33,30	66,70	11,30	22,00	



Procedimiento en archivo fotográfico del método de textura implementado en el LSA-UTPL.



a)



b)



c)



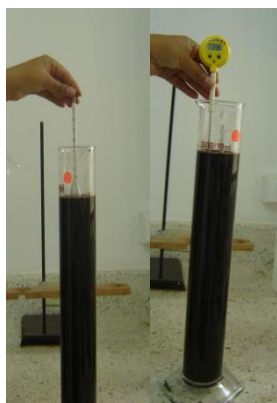
d)



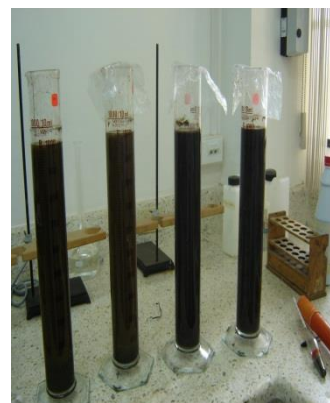
e)



f)



g)



h)

## BIBLIOGRAFÍA

- Escuela de Ingeniería de Antioquia. Laboratorio de Suelos. Análisis del tamaño de las partículas de un Suelo. Basado en Norma ASTM D 1140 – 00. Disponible en: <http://suelos.eia.edu.co/laboratorio/granulometria.htm>
- Fitz Patrick., 1996. Introducción a la Ciencia de los Suelos. Editorial Trillas. México. 288pp.
- Iglesias, C. 1997. Mecánica del suelo. Editorial Síntesis S.A. Madrid España.
- Jara, J., y Matta. R., 2004. Guía práctica de apoyo docente. Determinación de la textura del suelo.
- Juárez, B., y Rodríguez, R., 2000. Mecánica de suelos Tomo 1. Fundamentos de la Mecánica de suelos. Limusa. Noriega Editores. México DF.
- Norma Oficial Mexicana NOM- 021 RECNAT- 2000. Método AS-09. Disponible en:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/laec/maldonado\\_z\\_r/apendiceS.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/laec/maldonado_z_r/apendiceS.pdf)
- Pellegrini, A., 2004. Apuntes de Edafología. Textura y Color del Suelo.

## 7.5. Informe del laboratorio de suelos agrícolas del proyecto PCI\_Iberoamérica – AECID.

### INFORME DE INSTRUMENTOS Y MATERIALES / PROYECTO PCI – IBEROAMERICA A/024199/09 - A/030571/10

**Título del Proyecto:** *CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA: INFLUENCIA DEL MANEJO DEL SUELO A DIFERENTES ESCALAS EN LA REGIÓN ANDINA DEL SUR DE ECUADOR*

#### Antecedentes del Proyecto:

En el 2009 fue desarrollada una propuesta de colaboración e investigación conjunta entre la Universidad de Córdoba – España y el Centro de Investigaciones & Servicios Agropecuarios de la Universidad Técnica Particular de Loja – Ecuador. Esta propuesta obtuvo el financiamiento de la AECID en el Programa para Proyectos Conjuntos de Investigación denominado PCI – Iberoamérica del año 2009, con ampliación al 2010.

En el proyecto se contó con un rubro relacionado con la adquisición de material para fortalecer a los grupos de investigación cooperantes. El Laboratorio de suelos agrícolas, de la UTPL adquirió gracias a este proyecto los materiales e instrumentos que se detallan a continuación:

#### MATERIAL DE VIDRIO

Descripción	Cantidad
Vaso de precipitación de vidrio de 50 ml	5
Vaso de precipitación de vidrio de 100ml	10
Vaso de precipitación de vidrio de 250 ml	6
Vaso de precipitación de vidrio de 600 ml	5
Vaso de precipitación de vidrio de 1000 ml	10
Matraz-Erlenmeyer de 250 ml	18
Pipeta graduada 1 ml	10
Pipeta graduada 2 ml	10
Pipeta graduada 5 ml	5
Pipeta graduada 10 ml	5
Pipeta graduada 25 ml	5
Probeta graduada 50 ml	5
Embudos de vidrio de boca mediana	6
Tubos de ensayo de 25 ml	2

Tubos de ensayo de 50 ml	50
Bureta graduada de 100 ml	1
Crisoles de porcelana	6

#### **INSTRUMENTOS & MATERIALES**

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>
Barra magnética	1
Hidrómetro	1
Dispensador de líquidos BOECO 25 ml	1
Mixer safety HAMILTON BEACH	1
Vasos del Mixer safety HAMILTON BEACH	2
Plato agitador/calentador	1
Conductímetro HACH	1

Estos materiales e instrumentos fueron ingresados al inventario del Laboratorio de Suelos Agrícolas (LSA).

Particular que deajo en consideración al coordinador del laboratorio Ing. Juan Ignacio Burneo, para los fines pertinentes.

Ing. Pablo Ochoa Cueva  
Coordinador UTPL, Proyecto – PCI



a) Mixer safety HAMILTON BEACH



b) Plato agitador/calentador



c) Conductímetro, TSD (HACH)




## 7.6. Proyecciones futuras en relación al manejo y conservación del suelo en el sur de Ecuador.

**Distribución de parcelas de escorrentía EA - UTPL**




B1 M1	B1 M2	B1 M1	B2 M1	B1 M1	B1 M2	B1 M1
			B2 M2			
			B2 M1			
			B2 M1			
			B2 M2			
			B2 M1			

**A.** Parcelas distribuidas por diferencia de labranza y “mulch” (MO).

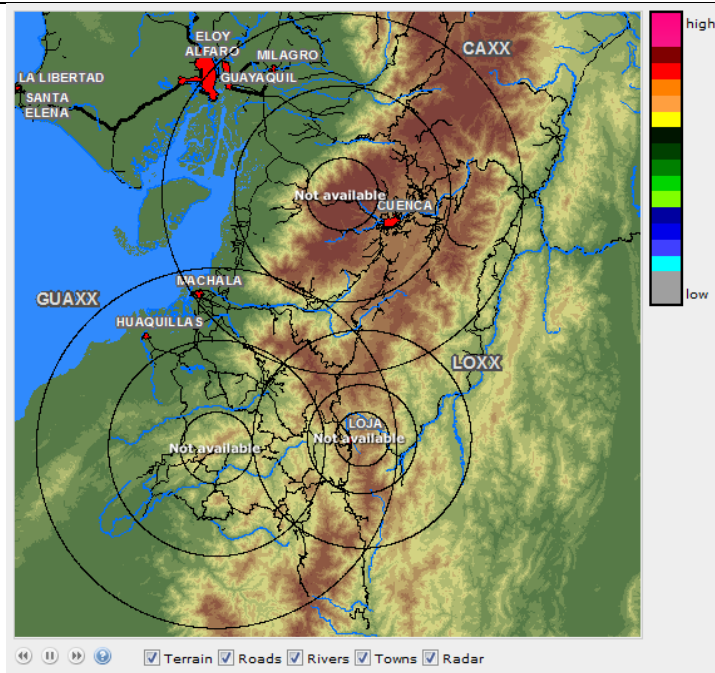
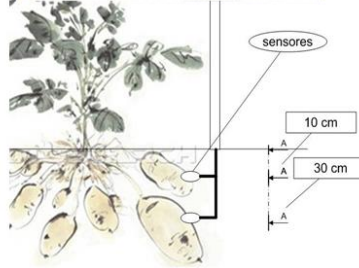
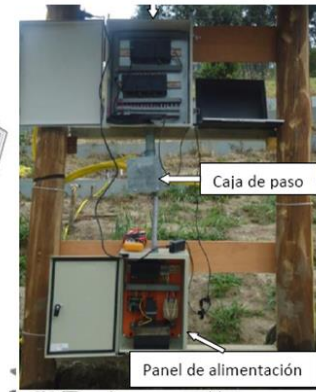
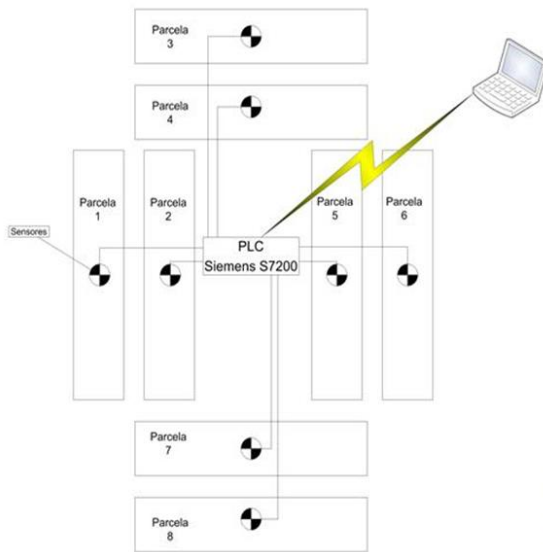
**B.** Parcelas con la distribución descrita, junto a los sensores y recepción de datos.



**Parcelas-Escorrentía**

**Instrumentalización (humedad del suelo)**



<http://www.radarnetsur.gob.ec/?&lang=en>

## 7.7. Información climática utilizada.

### Dendrograma de las estaciones de estudio.

#### SPSS

C A S E		0	5	10	15	20	25	
Label	Num	+-----+-----+-----+-----+-----+						
CHANGAIMIN	17	-+						
CARIAMANGA	18	-+						
GONZANAMA	19	-+						
QUILANGA	13	-+						
YANGANA	14	-+--+						
CELICA	15	-+ I						
LAURO GUER	16	-+ +-----+						
CATACocha	12	-+ I	I					
COLAISACA	23	-+ I	I					
SAN LUCAS	24	-+--+	I					
EL CISNE	21	-+	I					
CAJANUMA	22	-+	+-----+					
LA ARGELIA	20	-+	I		I			
ALAMOR	6	-+--+	I		I			
SOZORANGA	7	-+ I	I		I			
QUINARA IN	9	-+ +--+	I		I			
TAMBO	11	-+ I I	I		+-----+			
VILCABAMBA	10	-+ I +-----+			I		I	
MALACATOS	8	-+--+ I			I		I	
EL LUCERO	4	-+ I			I		I	
CATAMAYO	5	-----+			I		I	
ZAPOTILLO	1	-+--+			I		I	
SAUCILLO (A)	2	-+ +-----+					I	
SABIANGO I	3	-----+					I	
TIRSTA	25	-----+						
PARSTA	26	-----+						



ZAPOTILLO												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	16.7	27.7	20.5	27.7	0	0	0	0	0	0	6.4	8
1991	30.6	113.7	163.5	5.6	0	0	2.1	0	0	0	0	0
1992	36.3	95.9	111.4	172	155.5	0	0	0	0	0	0	0
1993	2.7	282.8	244.3	294.2	67.7	0	0.6	0.3	8.5	23.4	17.7	54.7
1994	110.6	139.1	132.9	98.8	21.7	0	0	0	0	0	0	12.8
1995	4.8	0	3.2	1	0	0	0	0	0	1.3	0	14.6
1996	5.8	39.7	38.6	3.4	0	0	0	0	0	1.4	0	1
1997	7.8	112.4	133.9	242.8	39.2	4.4	0	0.5	24.7	10	21.2	336.2
1998	54.2	86.1	188.3	142.8	73.5	0	0	0	0	4.1	0	1.7
1999	14	412.3	180.2	51.8	22.1	1.5	0	0	0	0	0	2
2000	53.9	147.9	373.2	157.3	23.7	7.1	0	0	2.2	0	0	85.2
2001	250	144.7	195.6	247.7	2	0	0	0	0	4.3	22	4.8
2002	55.2	84.3	117.1	280.9	12.6	0	0	2	0	5.7	23.6	0
2003	79.2	60.9	96.5	0	7.6	11	0	0	2	0	11.4	6.5
2004	141.1	50.1	28.6	25.5	24.3	0	4	0	8.7	19.7	27.6	30.1
2005	20.1	116.6	225	46	23.1	10.7	1	0.2	0.2	14.8	17.3	49.7
2006	74.1	201.9	394	132.7	0	0	0	0	1.6	0	2.6	6.6
2007	44.7	36.2	331.2	64.9	1.6	0	0	0	0	0.4	1.9	0
2008	185.5	463.9	285.1	150.7	5	2.9	1.8	0	0	1.8	10.8	0
2009	205.3	327	321.6	135.3	66.6	0	0	0	0	1.1	4.2	9.1
2010	55.8	298.7	151.7	139.1	22	4	0	0	0	0.2	0	5.3
2011	9.6	97.8	51.1	210.8	12.2	14.7	0	0	0	0	4.8	0
2012	154.8	270.9	68.8	135.9	21.5	3.7	0	0	0	5	8.8	28.7
2013	56.1	72.4	91	9.4	36.8	0	0	0	0	4.1	1.4	4.8
<b>PROM.</b>	<b>69.54</b>	<b>153.46</b>	<b>164.47</b>	<b>115.68</b>	<b>26.61</b>	<b>2.50</b>	<b>0.40</b>	<b>0.13</b>	<b>2.00</b>	<b>4.05</b>	<b>7.57</b>	<b>27.58</b>

YANGANA												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	104.9	211.5	182.8	152.6	61.7	56.5	24.8	5.5	35.2	127.1	75.4	123.1
1991	73	115.6	197.2	90	48.4	54.4	21.2	65.9	11.3	64.3	88.5	153.7
1992	69	161.7	178.9	112.4	30.7	86.3	41.6	13.5	58.8	22.3	88.4	69.2
1993	101.2	179.9	371	87.4	31.6	67.8	81.2	26.4	62.9	84.9	111.8	208
1994	179	100.7	200.8	146.6	99.9	86.1	85.9	99.4	76	59.8	46.5	65.7
1995	41	115.6	136.5	82.9	78.4	5.5	41.7	3.9	16	72.1	112	149.3
1996	144.5	130.5	225.4	138.7	34.1	41.8	72	35.8	35.1	45.2	38	25.9
1997	158.9	63.1	201.1	117.9	72.2	8.2	55	72.4	30.6	86.9	151.7	179.4
1998	58.9	75.6	159.2	152.1	61.8	63.4	36.4	28.1	16.5	203.6	141.4	130.1
1999	188.8	416.8	336.4	101.9	176.6	58.3	62.6	27.1	36.3	15.6	91.4	201.3
2000	181.5	294.1	321.6	86.5	137.3	66.3	19.5	47.9	76.5	8.9	7.3	78.4
2001	148.7	193.6	296.2	122	43.8	34	17	100.4	51.2	156.9	74.5	90.4
2002	57.8	127.6	161.3	177.3	96.5	33.7	55.2	14.5	7.5	72.3	89.6	172
2003	94.8	94.5	176.9	96.7	201.3	59.3	18.8	3.7	10.2	66.7	129.5	102.5
2004	60.5	91.9	147.4	158.5	59.2	87.8	73.1	16.4	24.7	136.2	128.6	191.1

## Capítulo VII

2005	63	126	233.8	120.1	59.8	73.9	15.1	8.1	5.9	286	35.6	163.9
2006	156.7	326.6	151.1	127.4	32.8	47.4	17.9	9.4	6.9	15.6	42.6	160
2007	66.7	155.7	142.9	188.4	46	118	5.9	66.1	58.8	130.8	117.3	100.4
2008	194.9	276	409.2	126.2	89.1	67.5	69.2	37	39.5	106.9	74.4	66.7
2009	251.6	239.3	210.7	133.3	62.7	51.1	37.6	48.3	3.2	56.5	127.3	77.9
2010	80.8	331.4	67.8	123.7	107	78.4	46.2	70.9	16.8	7.7	70.1	82
2011	126.4	302.3	180.7	149.4	24.5	9.7	243.9	11.2	74.4	95.1	157.9	291.3
2012	274.9	465.7	76.7	123.2	28.3	84.4	0	0	0	170.4	179.2	130.3
2013	124.8	52.4	158.5	0	215.8	103.3	100.4	17.6	13.2	116	21.6	143.2
<b>PROM.</b>	<b>125.10</b>	<b>193.67</b>	<b>205.17</b>	<b>121.47</b>	<b>79.15</b>	<b>60.13</b>	<b>51.76</b>	<b>34.56</b>	<b>31.98</b>	<b>91.99</b>	<b>91.69</b>	<b>131.49</b>

VILCABAMBA												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	64.2	197.6	84.5	127	59.1	20.4	9.2	9.6	12.2	112.2	63.9	82.2
1991	53	110.8	190.8	97.4	73.8	28.1	4	2.1	41.4	28.9	125.9	74.1
1992	49.9	112.5	87.2	71.2	51.5	2.6	0.8	5.8	47.4	38.2	129.2	141
1993	174.2	221.5	337.7	127.9	35.8	1.2	45.3	0.3	82.2	103.6	119.6	256.4
1994	147.4	205	204.6	139.2	26.3	5.5	5.9	12.8	9.1	222	73.3	46.8
1995	19	111.5	111.2	162.4	35.2	2.2	11.6	2.8	7.8	85.5	175.4	127
1996	113.9	162	247.9	101.3	26.2	106.6	0	4.1	11.6	52.9	47	50.9
1997	112.2	75.8	63.3	106.4	11.1	6.7	3	0	90.9	99.8	89.6	87.4
1998	47.7	136.9	148.7	169.7	92	11.4	1.6	16.4	4.6	116.6	4.2	43
1999	169.2	287.6	228.6	14.3	68.2	6.1	0	0	6.3	31.2	36.6	67.3
2000	3.5	20.6	247.5	192.6	93.2	32.4	14.4	16.3	47.2	10.5	6.3	63.6
2001	134.6	132.7	234.3	96.5	35.1	28	18.7	24.5	18.8	43.9	63.1	86.9
2002	51.7	117.7	151.4	159.5	43.7	16.9	23.8	7.6	6	57.1	70.5	90.6
2003	58.2	87.2	174.6	92	39.4	30	14.7	5.3	13.2	58.1	48.9	69.5
2004	57.5	93.8	106	130.8	49	33.8	30.3	5.9	29.5	72.2	106.8	104
2005	39.2	182.2	325	94.9	53.9	40.1	13	7.8	6	73	38.4	105.8
2006	127.9	222.6	260.5	156.4	19	37.2	18.6	2.7	5.5	29.4	129.9	149.1
2007	79.8	85.6	185.8	174.2	83.3	34.3	6.4	29.2	18.5	59.1	126.5	77.7
2008	171.7	325.6	308.7	261.5	78.4	34	32.2	28	22.4	111.2	109.1	89.1
2009	225.3	255.3	258.7	135.2	74	18.8	18.2	18.7	9.3	38.6	40	83.7
2010	61.6	176.2	113	123.8	81.7	61.2	36.9	18	25.5	34.9	57.8	75.4
2011	102.8	229.7	103.1	235.8	30.2	30.5	49.4	12.5	50.5	68.8	103.2	120.7
2012	257.7	367.7	116.7	172.6	34.8	24.1	6	5.7	9.1	76	138.8	87.1
2013	98.5	127.6	124.8	28.6	170.8	29.3	33.4	15	13.6	91.6	17.1	69.7
<b>PROM.</b>	<b>100.86</b>	<b>168.57</b>	<b>183.94</b>	<b>132.13</b>	<b>56.90</b>	<b>26.73</b>	<b>16.56</b>	<b>10.46</b>	<b>24.53</b>	<b>71.47</b>	<b>80.05</b>	<b>93.71</b>

CARIAMANGA												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	150.7	276.5	191.3	376.7	66.3	21.4	8.2	0	1	96.6	65.6	113.4
1991	48.4	142.8	523	98.3	41.9	8	1	0	13	17.4	13.7	25.4
1992	23.6	119.1	199.7	273.9	64.9	6.1	0	9.2	68.1	62.2	30.5	71.4
1993	94.6	369.7	473.8	470.7	86.8	2	25.3	0.5	48	136.5	61.6	262.5

1994	331.7	375	382.7	303.4	60.1	3	1.6	1.2	6.7	5.3	64.1	171.8
1995	56.2	246.4	348.2	103.9	89.5	10.6	12.5	0	2	43.7	104.8	175
1996	145.9	224.2	446.7	146	51.6	42.3	0	0.2	19.3	77.1	9.4	18.9
1997	49.5	148.8	181.6	205	55	12.2	5.8	0	29.1	113	219.6	290.1
1998	196.9	207	347.9	479.5	293.7	0	0	34.6	31.7	107.8	107.1	62
1999	97.3	612.6	495.4	132.3	241.4	48.8	10.5	0	49.4	22.7	29	155.2
2000	152.7	239.7	542.2	266.8	120.2	20.9	0.3	0.3	64.4	17	2.3	139.7
2001	267.4	337.7	416.3	135.7	62.5	0	0	0	13.6	13.3	139.6	125.1
2002	55.5	209.8	431.2	328.6	59.7	5.8	8.8	0	6.2	113.6	156.5	133
2003	82.5	154.5	255	164.8	38.8	28	13.3	0	12.6	20.6	114	82.6
2004	132.7	111.2	43.7	199	55.9	1.6	23.4	0	44.7	38.5	87.7	159.3
2005	57.8	315.3	531.1	106.8	64.4	33.2	2.3	0	0	31.7	32.4	122.5
2006	199.3	439.2	439.1	403.1	0	80.3	19.5	1.7	7.6	8.7	144.7	218.6
2007	245.8	100.8	384.2	317.8	136.3	0.6	4.5	0.6	1.7	41.8	120.8	119
2008	237	458.6	400.7	440.3	95.1	14.8	28.5	17	24	121.1	127	30.7
2009	499.7	300.8	482.1	155.6	167.1	15.4	21.6	4.8	0	15.7	48	139.2
2010	187.1	229.8	301.8	280.5	83.8	87.2	44.8	20.4	41.3	31.4	19.7	81.8
2011	171.9	354.3	158.3	565.6	35	13.6	1.2	0	32.8	37.3	138.8	142.7
2012	579.4	515.3	182.3	315.1	55.3	0	0	0	0	37.2	200	116.4
2013	151.6	201.7	218.1	88.2	242.5	21.4	40.2	30.7	1.2	121.8	21.7	93.6
<b>PROM.</b>	<b>175.63</b>	<b>278.78</b>	<b>349.02</b>	<b>264.90</b>	<b>94.49</b>	<b>19.88</b>	<b>11.39</b>	<b>5.05</b>	<b>21.60</b>	<b>55.50</b>	<b>85.78</b>	<b>127.08</b>

CELICA												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	96.9	217.6	137.7	180.7	16	13.2	2	0	0.5	15.9	33.5	38.4
1991	36.6	260.9	371.2	141.8	72.6	12.3	0	0	0	13.8	6.9	59
1992	172.7	242.4	381.2	260.8	144.3	5	0	0.2	24.3	16.5	8.3	58.9
1993	112.9	543	471.7	324.5	75.8	0	5.3	1.1	12.5	49.8	24.5	52.1
1994	166.1	213.6	226.8	176.4	23.6	9.1	1	0	14.9	3.5	11.8	106.5
1995	166	172.5	186.9	72.9	44	5.6	5.9	0.5	3.5	17.4	17.6	13.1
1996	266	140.9	47.9	15.1	0.6	3	0	0	0	0	12.4	36
1997	125.5	170.2	126.7	67	50.2	6.9	0	4	80.8	74.8	125.6	165
1998	80.6	276.4	382.2	208.5	55	0	1	0	0	0	13.6	46.6
1999	129.5	477.1	278.4	57.2	118.3	0.3	0	0	6.2	4.5	17.2	98.2
2000	138.7	450.1	274.7	88.2	4.8	12.7	0.1	0	1.7	0	0	5.7
2001	83.1	183.9	403.7	181.2	28.7	0	0	0	0.1	14.5	32.1	44.7
2002	18.4	358	204.6	258.6	14.7	0.2	0.3	0	0	32.2	13.6	77
2003	125	202.7	312.5	104.9	19.3	19.2	4.5	0	0	1.3	18.1	117.3
2004	195.5	236.4	213.6	152.2	54.1	4	6.6	0	11.8	36	11.7	65.7
2005	63.1	281.5	324	157.4	8.2	29.7	0	0	2.2	9.1	21.9	57.2
2006	177.9	327.7	376.2	197.9	4.6	0	0	0	0	2.5	41.5	109.6
2007	164.6	154.8	394.6	118	16.9	0	1.1	1.8	5.6	9.4	12.9	14.3
2008	330.3	542.6	468.3	287.1	54	13.2	21	0.7	0	54.3	36.6	28.5
2009	254.5	349.4	401.4	134.2	50.6	0	1.1	5.1	0	3	26.6	57.5
2010	192.3	280.7	215.2	167.5	46	0	16.2	0	0	10.1	8	57.9

## Capítulo VII

2011	130.9	204.6	93.5	311.7	6.2	8.2	8.9	3.6	6.4	54.2	74.6	140.3
2012	415.6	487.8	123.5	192.9	37.8	6.5	0	0	2.2	20.8	101.5	56.5
2013	103.7	144	160.7	44.7	139.7	7.7	7.9	7.5	2.6	52.4	9.2	45.1
<b>PROM.</b>	<b>156.10</b>	<b>288.28</b>	<b>274.05</b>	<b>162.56</b>	<b>45.25</b>	<b>6.53</b>	<b>3.45</b>	<b>1.02</b>	<b>7.30</b>	<b>20.67</b>	<b>28.32</b>	<b>64.63</b>

GONZANAMA												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	107.1	252.6	119.9	275.9	38.4	2.8	52.3	3	0	81.5	85.9	73.9
1991	68.8	231.8	414.2	101.7	100.9	8.7	22	1.9	21.5	20	37.1	74.8
1992	76.4	176.4	149.8	206.7	90.2	4.2	0	5.2	59.8	45.6	82.5	83.5
1993	104.3	263.5	452.4	208.4	49.5	0	6.4	0	69.2	49.8	69.2	161.6
1994	347.3	208.8	303.8	207.5	4.3	0	0	7.3	5.2	24	74.2	7.6
1995	20.4	191.9	77.8	97.3	70.8	0	1.2	0	0	57.7	69	156.5
1996	62.2	0	334.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	49.7	112	76	97.7	24.1	3.2	0	0	75.2	55.6	313.4	106.7
1998	72.6	112.6	255.3	167	82.7	3	0	25.3	62	134	91.8	74
1999	173.9	260.6	415.3	68.5	179.3	56	3.7	3	58	49.6	33.4	212.5
2000	162.6	335.6	425.6	180.8	82	17.1	0	0	71.7	6.6	0	96.6
2001	246.6	178.1	377.1	151.7	52.4	3.4	0	11.6	21.9	7.8	140.7	164
2002	121.6	221.9	200.4	343	46.6	35	10.5	0	27.2	84.7	151.4	52.1
2003	88.4	27.7	274.9	132.4	56.4	39.3	31.3	1.9	51.1	42.2	68.7	23.7
2004	90	217.7	163.4	219.6	98.6	0	49.6	0	64.4	92.5	152.1	39.8
2005	39.8	188.2	691.8	255.5	178.2	9.3	0	0	0	52.7	70.9	233.7
2006	216.1	242.8	597	242.7	116.1	53.1	39.4	0	4.2	11.6	458.8	229.9
2007	133.8	147.4	162.5	588.9	383.1	1.2	6.8	0	10.5	128.4	302.4	177.3
2008	346.3	580.4	695.4	828.4	58.3	50.2	9.7	25	36.3	207.5	260.9	185.2
2009	354.3	416.9	589.1	432.6	121.5	35.8	23.4	0	3.1	33.7	24.6	88.5
2010	136.2	335.6	234.1	161.2	273.4	123.5	138.9	25.2	29.9	51.1	112.3	185.6
2011	305	623.5	239	372.7	18	102.3	4.3	10.4	67.4	235.1	264.6	267.9
2012	712	696.3	202.1	285	12.3	0	0	0	4.5	72	243.5	84.1
2013	109.2	206.9	97.8	40.2	196.1	10.3	33.9	0	1.1	204.1	13.3	168.9
<b>PROM.</b>	<b>172.69</b>	<b>259.55</b>	<b>314.54</b>	<b>236.06</b>	<b>97.22</b>	<b>23.27</b>	<b>18.06</b>	<b>4.99</b>	<b>31.01</b>	<b>72.83</b>	<b>130.03</b>	<b>122.85</b>

MALACATOS												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	105.2	129.4	22.4	279.8	13.2	7.6	21.3	4.1	7.2	43.5	101.9	37.2
1991	103.2	30.7	233.8	72.6	94.3	0.6	12.1	0	51.9	27.4	26.4	15.8
1992	44.4	22.7	147.2	28.8	17.6	3.3	0	0.1	40.8	0	52.5	80.1
1993	64.5	187.7	187	68.2	28.5	6.4	0	0	20.1	134.6	18.9	98.5
1994	102.2	74.6	78.3	43	30.7	0	0	18.6	4.8	41.8	42.8	63.7
1995	10.4	81.2	118.5	8.4	2.6	0	0	3.5	0	8.6	62.5	38.8
1996	38.7	84.1	15.1	41.8	16.2	0	0	0	17.7	68.4	0	0
1997	68.1	4.1	40	98.6	23.6	7.1	0	0	18.8	72.1	119.6	41.6
1998	49.7	136.4	108.6	79.2	10.6	0	0	0	0	141.1	33.9	37.4
1999	82.4	206	190.9	54.7	88.7	37.8	15.6	9.8	26.5	12.6	26.3	134.5

2000	111.9	141.7	196.7	309.8	65.4	23	10.3	11.6	33.7	7.5	4.4	45.4
2001	68.8	47.6	93.9	57.3	25	20	5.8	0	0	72.2	19.8	129.4
2002	44.4	59.1	34	154.6	4.5	0	0	5.4	4.3	40.4	28.2	127.3
2003	17.6	100	108.2	84.7	2.1	0	8.1	0	0.1	164.8	19.8	27.3
2004	21.8	29.1	20.4	143.9	31.9	5.1	14.6	4.2	29.4	115.6	151.2	107.4
2005	21.7	91.4	228.5	41.7	51.4	15.3	0	0	0	103.3	29.2	55.9
2006	53.3	132.8	222.8	76.9	1.2	38.8	21.1	0	1.6	44.2	136.5	136.6
2007	30.9	53.8	155.2	149.3	46.4	11.6	5.7	14.4	6.2	78.6	142.7	62.2
2008	45.6	195.7	173	83.4	54.1	22.3	0.1	14.7	20.6	162.9	64.5	171.2
2009	173.8	164.9	164	87.6	58	3.8	5.7	6.3	5.3	36.2	8.3	70
2010	3.6	116.5	71.3	80	93.3	37.9	25	15.9	12.6	46.5	92.2	75.6
2011	99.8	260.3	109.6	150.8	33	19.4	10.1	19.7	52	103.3	101.3	116.3
2012	234.7	223.7	85.1	154.8	8.5	0.3	0.2	0	18.2	145.2	98.1	84.8
2013	43.7	116.3	106.8	4.1	83.7	0.1	11.2	5	11.3	170.3	32.1	93
<b>PROM.</b>	<b>68.35</b>	<b>112.08</b>	<b>121.30</b>	<b>98.08</b>	<b>36.85</b>	<b>10.85</b>	<b>6.95</b>	<b>5.55</b>	<b>15.96</b>	<b>76.71</b>	<b>58.88</b>	<b>77.08</b>

QUINARA												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	78.5	157	113.5	188.2	41.2	20.8	18.7	5.6	7.1	52	60.2	64.1
1991	61.9	110.5	161.2	77.1	72.8	23.2	9.8	12.1	12.7	50.1	69.5	49.8
1992	67.5	78.7	96.4	90.5	38.3	6.2	0	5.3	35	26.2	56.2	59.9
1993	94.8	153.3	307.3	83.8	50.9	0.3	2	0	127	135.9	72.5	293.2
1994	165.4	153.8	223	123.8	6.8	1.6	3	7.4	7.1	50.8	50.8	0
1995	30.8	100.2	121.7	107.4	32.6	2.8	4	0	4.8	74.7	85.7	100.7
1996	159	70.2	193.6	114.1	37.6	59.8	0.8	1.3	2.7	44.8	31.4	21.9
1997	104.8	102.5	83.1	93.5	9.1	25.7	0	0	71.1	69.2	125.7	127
1998	75.4	80.9	144.4	147.3	110.1	2.4	0	17.2	15.7	81.5	44.2	61
1999	100.1	312.2	181.2	30.4	113.3	25.6	9.3	6.8	50.2	17.6	114.2	154.5
2000	131.5	238.5	289.5	87.1	92.1	30.1	2.8	7.6	39.9	3.7	10.8	76.3
2001	113.9	99.3	145.5	81.6	41	10.3	3.2	0.3	11	71.8	18.4	96.7
2002	19.8	98.8	145.6	126.5	42.8	8.5	17.9	12.6	0	100.2	78	87.7
2003	47.1	94.2	220.7	92.8	15.9	3.4	1.5	0	28	101.9	80.8	73.2
2004	66.1	91.8	76.3	105	34.2	4.4	11.6	0	23.7	61.5	162.4	163.3
2005	61.2	174.9	351.3	89.3	50.5	37.1	11.9	7.1	2.2	64.3	83.4	211.3
2006	140.4	217.6	272.5	223.1	7.6	68.2	22.6	0	2	75	114.5	167.8
2007	64.3	94	137.9	114.4	36.2	2.5	11.2	11	8.5	81.7	164.8	98.3
2008	99.8	269.9	268.1	215.9	71.7	23	3.1	6	7.4	78.6	92.6	113.3
2009	136.6	258.2	284.1	120.3	40.1	7.6	0	3.1	0	24.9	68.3	101.4
2010	18.5	161.9	107.7	91.2	50.8	97.7	13.1	9.1	32.4	45.3	107.7	127.2
2011	119	249.5	84.9	207.2	30.2	14.1	16.5	4	37.4	103.6	182	104.1
2012	274.5	281.4	128.7	158	13.8	5.1	0	0	3	94.9	261.4	167.6
2013	66.2	134.6	135	18.8	140	12	8.8	0	2.5	101	16	57.4
<b>PROM.</b>	<b>95.71</b>	<b>157.66</b>	<b>178.05</b>	<b>116.14</b>	<b>49.15</b>	<b>20.52</b>	<b>7.16</b>	<b>4.85</b>	<b>22.14</b>	<b>67.13</b>	<b>89.65</b>	<b>107.40</b>

## SOZORANGA

Capítulo VII

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	54.8	91.3	110.9	154.9	36.9	18.2	2.4	0	0	15	11.9	19.1
1991	20.6	195	309.9	127.2	80.3	33.6	5.1	2.2	14	14.1	4.2	28.3
1992	105.8	197.6	464	261.9	137.9	8.4	0.2	0	22.4	6.6	15.3	38.7
1993	59.1	304.9	349.7	372.2	62.5	11.4	9.3	1	11.4	18.7	58.2	102.5
1994	286.5	342.9	309.4	233.6	59.4	3	2	0.6	8.9	3	10.2	96.3
1995	172	204.5	210.6	132.1	73.2	1.8	14.3	0	3.2	1.1	8.4	61.8
1996	98.6	206.9	341.1	53	23.1	2.6	1.9	3.2	2.3	0	0	0
1997	90	180.7	253	197.6	23.3	12.2	0.2	0	4.9	32.3	143.1	270.3
1998	306.7	183.9	598.9	497.3	223.5	11.7	3.4	4.1	32.9	19.1	21.8	48.4
1999	118.7	672.9	477.9	169.9	204.5	73.9	17.6	1.7	17	4.3	0.6	77.5
2000	106.9	318.3	470.2	436.8	151.5	14.2	5	10.3	35.2	5.4	1.6	69.6
2001	300.6	328.1	612.9	230.5	35.1	17.5	20.4	0	9.7	18.6	23	73.9
2002	56.1	302	460.1	455.2	46.6	4.2	2.2	0.5	0.5	55.3	22.5	93.3
2003	145.7	202.7	362.4	91.1	16.2	13.6	6.1	0	0.2	3.7	17.3	69.6
2004	59.9	303.5	204.6	158.1	56.3	9.1	14	0	5.3	29.1	12.1	34.4
2005	32.9	253.9	397.9	90.3	10.5	23.4	2.1	0.3	0	2.2	43.3	121.3
2006	345.1	514.7	367.6	236.8	27.2	28.1	9	2.5	8.3	1.5	28.2	80.9
2007	196.7	241.9	405.4	128.2	68.3	2	0	0.9	5.1	8.9	17.2	24.3
2008	280.5	760.2	707	430.4	119.9	31.9	8.2	13.5	16.4	54.6	29.4	2.2
2009	358.6	526	408.9	118.5	161.5	5.4	5.7	12.4	0.4	11.9	12.4	115.2
2010	120.8	339.6	247.1	117.9	85	20.3	9.1	1.3	11.5	15.6	5.7	25.4
2011	40.7	196.6	86	385.9	18.1	29.8	18.2	1.3	1.2	10.5	19.7	31.8
2012	209.1	751.2	155	244.9	72.4	2.6	0	0	4.5	13.3	42.4	5.8
2013	88.7	144.8	235.2	75.3	193.1	28.1	5.4	22.8	12.7	16.5	18.5	36.5
<b>PROM.</b>	<b>152.30</b>	<b>323.50</b>	<b>356.07</b>	<b>224.98</b>	<b>82.76</b>	<b>16.96</b>	<b>6.74</b>	<b>3.28</b>	<b>9.50</b>	<b>15.05</b>	<b>23.63</b>	<b>63.63</b>

SAN_LUCAS												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	81.8	255.1	176.2	293.2	63.1	34.3	25.5	9.7	45.1	123.3	95.5	146.9
1991	114.5	95.5	227.5	134.2	250.1	35	274.9	122.2	27	99.5	151.2	43.1
1992	95.5	89.3	247.1	84	88.1	216.4	326	54.6	27.7	267.1	229.8	258
1993	93.7	167.2	256.4	142.5	58.3	63.1	40.4	29.8	21.5	139.4	81.4	228.7
1994	113.4	102.2	117	69.6	212	156.6	103.3	71.3	114.4	32.5	84.8	81.3
1995	33.4	75.3	77.3	220.4	81.6	133.7	25.6	17.8	19	29	71.7	127.4
1996	189.5	209.6	149.5	104.4	144	96.4	144.1	73	113.9	0	0	0
1997	39.3	86.4	166.8	134.6	132.6	10.7	144.3	103	54.9	78.4	173.9	239.6
1998	94.5	113.7	291	140.6	171	134.8	242.7	68.7	32.2	145	39.4	111.2
1999	136.6	207.4	212.4	308.2	188.4	178.8	81.5	86.6	116	22.8	36.4	143.1
2000	99.1	124.6	284.1	178.8	197.2	114	114.5	75.7	132.6	52.8	12.3	106.7
2001	103.9	156.9	97	92.7	94.1	210.6	115.9	166.4	86.3	55.2	111	135.6
2002	84.2	98.1	101.9	183.6	211.8	103.3	84.8	63.1	9.8	103.5	173.9	79.4
2003	92.8	118.2	139.8	198.6	56.6	91.3	66.2	68.2	33.5	98.6	46.9	240.1
2004	39.1	57.2	227	172.6	120.4	267.7	153.4	47.9	114.2	163.1	142	204.4
2005	76	262.4	422.6	243.6	217.2	239.8	149.7	91.9	55.5	85.6	25.1	121.2

2006	83.1	172	99.5	237.5	27.3	52.2	13.8	4	8	87.3	80.5	182.3
2007	65.6	55.9	103.7	114.7	96.7	147.4	27.2	72.9	68.2	55.2	190.3	121.3
2008	81.4	222.3	204.2	167	108.2	75.6	203.3	85.1	59.3	158	160.9	104.5
2009	182.9	125.7	136.4	160.2	52.7	59.3	76.9	72.8	39.5	107.4	77.2	77.5
2010	94.3	187.2	95.6	140.7	121.8	166.4	99.6	36.5	94.2	110.7	80.6	141.9
2011	76.2	154.5	67.5	200.4	81.6	109.3	216.6	32.1	144.9	35.3	130.8	159.1
2012	216.2	137.9	150.6	101.7	116.6	109	79.5	48.6	40.7	77.4	89.1	87
2013	120.9	93.3	79.2	21	400.5	159.5	86.8	54.4	52.6	87.6	24.2	55.4
<b>PROM.</b>	<b>100.33</b>	<b>140.33</b>	<b>172.10</b>	<b>160.20</b>	<b>137.16</b>	<b>123.55</b>	<b>120.69</b>	<b>64.85</b>	<b>62.96</b>	<b>92.28</b>	<b>96.20</b>	<b>133.15</b>

SAUCILLO												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	25.8	24.6	63.4	2.5	0	0	0	0	0	0.7	5.6	9.1
1991	33	165.5	221.7	52.1	11	10	2.3	0.4	4.4	1.6	6.7	3.2
1992	68.2	126.3	120.2	149.9	116.8	0.3	0	0	0	0	38.4	8.1
1993	13.5	450.6	429.5	388.6	33	7.2	4.8	0	0	11	0	11.3
1994	67.8	210.6	102.8	111.8	9	2.3	0.4	0.6	5	2.9	9.6	45.9
1995	129	82.9	32.1	0	0	0	0	0	0	0	0	11.7
1996	12.8	86.4	60.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	35.4	86.8	119.5	226.4	21.5	8.8	1.1	0.9	2.8	26.4	46.2	152
1998	58	93.2	202.5	153.1	49.3	14	0	0	7.3	7.8	0	16.6
1999	21.4	438.4	440.5	146.3	25.1	0	0	0	1	1.6	0	28.1
2000	76.8	159.2	433	215.3	51.7	0	0	0	0	0	0	27
2001	162	269.6	210.5	0	0	0	0	0	0	0	8.5	12.4
2002	7.9	102.5	125.6	166.2	1.1	0	0	0	0	5.9	1.4	36.4
2003	35.7	112.3	17.4	70.4	0.2	7.3	0	0	0	0	5.5	13.3
2004	97.7	75.4	69.6	7.3	10.6	0	6.7	1.5	1.5	0	1.7	0
2005	7.1	89.8	356.6	25.9	0	5.8	0	0	0	0	0	13.2
2006	65.5	383.4	421.7	68.5	0	0	0.8	0	0.2	0	1.6	4
2007	36.8	32.2	229.7	41	0	0	0	0	0	0	1.8	0
2008	120	322	449.2	127.6	10.3	3.6	2	2.7	0	0	0	18.7
2009	183.9	358.7	436.7	121.3	74.8	0	0	0.4	0	7.7	0	0
2010	46	133.1	372.1	116.9	19.8	0	0	0	0	14.8	21.6	33.8
2011	49.1	77.9	54.3	187.1	9.5	14.3	5	0	0	29	3.4	0
2012	88.4	291.3	73.3	183.8	31.4	3.2	0	0	0	0	2.9	7.8
2013	57.2	69.6	113.1	21.9	0	0	0	0	0	5	3.5	10.9
<b>PROM.</b>	<b>62.46</b>	<b>176.76</b>	<b>214.80</b>	<b>107.66</b>	<b>19.80</b>	<b>3.20</b>	<b>0.96</b>	<b>0.27</b>	<b>0.93</b>	<b>4.77</b>	<b>6.60</b>	<b>19.31</b>

SABIANGO												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	27.2	93.9	165.3	79.1	33.2	6.5	0	0	0	8	0	27.3
1991	73.5	185.9	412	125.5	25.1	27.9	3.2	0	1	11	14.1	28.2
1992	125.3	290.8	208.9	447.3	146.3	12.1	1.6	0	11.2	4.8	2	26.6
1993	66.5	504.8	393.7	433.2	72.5	10.2	26	1	1	5.5	32.8	84.1
1994	190.4	354.2	267.1	176.3	43.9	7.4	0	3	4.8	0.5	2.9	67.2

## Capítulo VII

1995	157.8	121.5	157.8	105.2	98.6	0	21	0	0	0	18.8	41.6
1996	55.3	224.7	311.5	46.7	3.1	1.5	4.4	3.8	0	7.5	0	0
1997	58	265.1	299.1	222.8	39.5	54.8	7.8	2	65.8	30.3	142.3	337.6
1998	107.7	163.4	356.6	442.8	268.7	4.7	0	0	3.5	14.5	15.5	27
1999	81	714	622.9	153.5	60.5	63.7	13.9	3.5	10.8	6	0	20.7
2000	39.3	313	518.4	238.2	56.2	21.1	5.1	0	1.5	0	0	51.6
2001	238	287.6	515.8	201.4	27.5	0	26	0	0	0	11.4	48.2
2002	18.9	264.2	225.6	373.7	29.7	1	2.5	0	0	26.4	12.1	90.7
2003	121.2	226	153.9	78.9	19.5	12.8	5	0	0	0	6.1	33.6
2004	116.4	231.3	77.1	107.7	45.3	0	0	0	0	17.1	10.1	23.5
2005	41.3	142.9	390.1	60.9	10.8	18.2	0	0	0	0	38.3	107.6
2006	22	458.9	457.1	61.8	8.2	7.9	3.1	4.1	3.3	0.5	11.4	40.7
2007	213.8	81.9	338.7	116.7	25.1	2.5	0	0	0	0	9.2	17.7
2008	167.7	682.7	639.7	380	56.5	12.6	16.3	9	5.8	22.1	18.5	12.1
2009	354.8	476.5	443.6	108.8	118.6	9.8	0	3.5	1	0	14	86.8
2010	109.3	405.1	337.5	180	75.1	22.5	9.6	1	4.4	27.9	46	67.2
2011	44.6	183	106.2	349.4	5	31.4	14.6	4.1	28.6	59.7	85	80.6
2012	246.5	710.3	138.3	300.7	54.9	13.3	0	0	0	11.6	30.4	7.2
2013	92.5	115.9	364.9	32.3	128.2	12.2	0	0	1	17.4	0	20.2
<b>PROM.</b>	<b>115.38</b>	<b>312.40</b>	<b>329.24</b>	<b>200.95</b>	<b>60.50</b>	<b>14.75</b>	<b>6.67</b>	<b>1.46</b>	<b>5.99</b>	<b>11.28</b>	<b>21.70</b>	<b>56.17</b>

LUCERO												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	92.3	192	282	213	20	14	44	0	0	43.2	83	79
1991	102	43	166	70	127	16	0	0	6	62	23	53.9
1992	64.6	127	159	183	98	0	0	0	42	46	79	37
1993	204	323	411	365	21	6	0	0	44	157	52	161
1994	152	196	222	169	0	0	0	0	0	21	18	81
1995	83	148	286	156	65.8	4.1	27	0	0	35	229	116
1996	206	240	213	115	55	47	0	0	0	0	0	0
1997	92.5	125.3	113.9	132.1	28.5	0	0	0	48.4	61.2	2.8	128.1
1998	49.8	145.2	384.3	232.9	119.9	0	11.4	20.5	0	88.4	37.2	44.3
1999	136.6	209.8	320.7	78.3	159.4	41.3	39.1	0	24.3	0	0	200.4
2000	58.2	390.2	394.4	299.2	56.4	0	14.9	0	0	8.5	6.1	11.4
2001	311.9	139.5	250.7	101.1	0	0	0	0	0	0	54.5	24.5
2002	84.8	126.7	363.3	42.7	0	0	17.1	0	0	66.9	65.5	138.2
2003	54.1	0	115.3	48.4	0	18.5	0	0	0	0	25.6	21.4
2004	69.7	113.9	115.3	10	105.3	0	0	0	0	0	213.5	69.7
2005	39.9	374.4	511	112.9	50	32.5	4.5	2.3	0	70	46.6	130.1
2006	158.6	318.9	362.3	199.2	23	42.8	21.4	3.2	6.5	9	240.4	357.1
2007	130.2	125.5	406.8	219.9	147	0	0	0	0	23.6	190.5	84.7
2008	544.5	535.3	551.3	446.1	228.6	53.8	23.8	10.7	26.2	157	328.5	85.5
2009	302.8	602.2	321.6	224.8	216.5	17.8	0	0	0	62.1	68.6	109
2010	93.4	244.8	81.7	321.4	31.7	46.7	87.3	1.4	7.4	35.6	63.1	85.9
2011	121.1	163.1	68.6	321.6	30	32.3	4	0	50.5	3.1	49.7	64.3



2012	327.5	531.1	428.3	334.6	40.6	0	0	0	0	3.4	323.7	148
2013	285.8	266.9	141.2	40.2	401.4	0	11	14.6	0	94.1	6.5	96.1
<b>PROM.</b>	<b>156.89</b>	<b>236.74</b>	<b>277.90</b>	<b>184.85</b>	<b>84.38</b>	<b>15.53</b>	<b>12.73</b>	<b>2.20</b>	<b>10.64</b>	<b>43.63</b>	<b>91.95</b>	<b>96.94</b>

ALAMOR												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	65.5	157.4	140.1	160.7	27	42.4	0	0.6	0	3.7	6	20
1991	67	382.1	439.3	105.2	84.4	13.9	0	0	0	13.2	3.5	90.5
1992	197.7	223.7	256.3	380.4	147.7	16.5	2.5	0	2.2	6.5	3.8	26
1993	163.4	682.5	639.1	736.4	200.3	7.4	21.2	1.8	18.5	24.8	34.6	100.2
1994	274.2	360.1	358.9	199.7	174.7	2.4	0	0	18.1	4.8	1.3	121.3
1995	136.6	252.8	190.2	90.9	124.6	0	12.6	1.7	0	5.7	14.4	59.7
1996	159.6	117.3	242.6	48.3	2.1	0	0	0	0	0	0	0
1997	66.5	185.8	395.2	276.5	38.2	34.8	7.3	8.4	72.2	113.3	239.7	301.3
1998	27.4	196.1	628.2	299	218.4	22.8	9.9	3.1	22.3	4.2	27.4	41.9
1999	130.8	394	468.6	144.3	143.4	40.7	8.8	0	1.2	3.4	24.8	52.5
2000	33.5	129.6	600.8	312.5	170.7	17.7	0	0	0	0	0	49.6
2001	246.1	301.1	510.4	162.9	43.3	0	0	0	0	4.6	22.2	23.9
2002	5.6	414.9	249.9	279.6	8.7	3.8	0	0	0	41.7	14.1	51.8
2003	99.7	302.3	183.4	176.3	5.9	5.8	0	0	0	0	1.6	101.6
2004	181.5	124.9	184.8	66.4	54.8	2.7	13.1	0.7	21.1	51.8	65.4	71.7
2005	44.8	266.3	497	111.8	170.7	35	11.2	6	0.6	35.5	39.7	109.4
2006	151.5	439.1	419.9	210.5	28	21.2	0	0	0	1.5	94	170.3
2007	117.8	73.3	548.2	173.6	31.5	0	0	0	0	0	0	56
2008	239.5	454.6	779.7	378.8	102.8	23.2	10.6	7.1	0	11.2	3	69.3
2009	316.6	345	349.6	155	52.8	21.3	0	0	0	3.7	0	110.7
2010	201.2	255.3	483.7	190	30.6	0	0.8	0	0	35.8	42.9	70.8
2011	117.3	179.1	32.9	312.7	11.2	35.7	24.1	6	35.7	56.8	79.1	88.6
2012	392	805.6	149.5	383.1	62	22.6	0	0	0	0	30.3	42.4
2013	96.7	143	183.6	89.6	125.9	0	0	0	3.5	17.4	0	48.8
<b>PROM.</b>	<b>147.19</b>	<b>299.41</b>	<b>372.16</b>	<b>226.84</b>	<b>85.82</b>	<b>15.41</b>	<b>5.09</b>	<b>1.48</b>	<b>8.14</b>	<b>18.32</b>	<b>31.16</b>	<b>78.26</b>

CATACOCCHA												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	75.8	184	98	176.7	20.1	10	10.3	2.5	0.5	12.3	18.5	80.4
1991	54.4	222.6	376.6	141.1	65.7	17.6	0.5	4.1	11.6	5.1	2.3	63.6
1992	121.3	174.2	213.5	128.6	155.5	1.5	1.5	1.5	17.7	22.7	4.5	36.3
1993	85.5	325.9	456.6	190.3	26	6.5	0	0	6	48.1	49.6	196
1994	275.6	237.4	271	208.6	23.1	0.5	2.5	2.5	14.4	1.2	32.3	49
1995	63.1	143.1	247.2	64	54.5	0	18.5	0	1	3.5	50.3	94.7
1996	81	181.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1997	106.6	114.4	223.6	109.5	6.5	14.3	0	0	20.4	64.3	108.4	278.4
1998	110.1	229.2	195.8	249.3	80.3	13.5	0	8.5	5.1	34.9	15.1	58.8
1999	127.5	503.2	402.2	153.1	103.3	22.7	0	1.8	9.2	13.3	6.3	141.6
2000	142.6	372.4	440.2	235.8	96.8	23.9	0	1.5	16.7	0	1.5	68.2

Capítulo VII

2001	188.9	184.9	331.5	79.7	25.8	23.7	1.8	0	5.8	17.9	66.3	61.5
2002	16.5	270.6	232.6	274.9	35	0	2	0	0	47.5	25.1	54.2
2003	45.9	154.9	202.8	74.7	12	47.1	0	0	1	2.1	7.8	81.2
2004	81.1	123.1	112.8	119.5	0	0	4.3	0	24.8	31.9	5.4	77.1
2005	23.4	292.6	264.6	4.2	10.8	15.5	5.2	0	1.3	12.1	14.2	4
2006	26.6	315.2	263.1	175.4	0.4	3.4	10.4	0	0	10.2	88.7	51.5
2007	57.1	101.6	324.7	234.6	40.1	3.4	2.6	0	0.6	19.6	13.8	35.6
2008	278.8	381.6	318	307.9	50.6	10	2	21.5	10.9	31.8	58.1	20.1
2009	290.6	294.9	392.3	102.8	84.7	0	0	3.8	0	1.2	11.2	38.7
2010	82.3	194.6	174.2	126	72.2	32.7	0	0	15.8	34.7	19.8	29.4
2011	94	191	87.6	352.2	3.4	22.8	14.7	0	33	35.8	35.8	50.5
2012	265.5	458	15.2	285	16.8	0	0	0	0	13.7	130.7	36.8
2013	93	118.1	94.3	24.6	68.6	5.2	0	11.6	5	35.8	0	16.8
<b>PROM.</b>	<b>116.13</b>	<b>240.39</b>	<b>239.10</b>	<b>159.10</b>	<b>43.84</b>	<b>11.43</b>	<b>3.18</b>	<b>2.47</b>	<b>8.37</b>	<b>20.82</b>	<b>31.90</b>	<b>67.68</b>

COLAISACA												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1990	98.3	316.1	239	397.2	153	14.5	0	0	0	43.3	55	45
1991	46.7	188	204.1	82.4	165.2	56	5	0	31.6	24.7	26.5	43.5
1992	105.9	151.5	79.1	332.2	111.2	21	0	12	18.5	46	44.5	50.5
1993	166.5	491.4	497.5	455.5	47.2	9.2	1.8	0.9	13.4	47.1	27.4	122.6
1994	269.3	158	309.8	207.7	39.7	16.7	0.3	0	19.4	7.4	15.8	34.1
1995	95.2	101.2	203.9	78	24.8	1	15.6	0.2	0.5	0.4	27.7	65.7
1996	49.9	151.7	387.9	51	18.9	3.1	0.9	1.6	4.1	13.1	0	0
1997	17.1	83	268.2	206.6	57.5	11.6	0	0	17.6	71.7	217.6	307.7
1998	101.2	131.3	576.8	285.6	344.7	0	0.3	13.7	16.4	87.2	52.8	15.3
1999	107.9	316.2	434.2	35.8	214.7	216.7	8.2	0.6	33.5	8.3	27.5	126.3
2000	119.5	197.1	476	438.8	199.4	16	1	6.8	102.3	8.3	4.3	100
2001	99.1	202.5	413.5	125.2	39.1	6.4	6.3	0	11.9	13.7	42.2	41.3
2002	27.1	98	175.5	128.1	4.1	4.1	55.8	5.5	12.5	37.9	55.8	105.3
2003	117.5	117.4	270.8	172.8	43.6	64.8	18.5	3.3	9.9	12.6	25.9	101.4
2004	92.3	66.8	233.5	181.1	62	9.3	19.8	3.7	20.3	54.6	18.4	63.7
2005	44	259.2	561.4	118.1	45.5	6.1	1.9	0	0.6	47.9	30.9	135.4
2006	241.7	288.8	500.7	235.7	12.3	30.7	14.4	0	11.6	7.6	129.9	160.5
2007	174.5	96.3	283	157.3	49.9	9.2	0	0.1	14	25.6	41.4	43.2
2008	241.8	772.6	456.2	566.6	97.8	38.1	0.2	29.4	32.5	95.4	58.5	12.8
2009	315.7	556.4	409.5	143	46.2	21.7	13	27.6	0	48	16.6	145.4
2010	54.1	126.3	221.1	157.4	91	0	10.7	4.1	8.7	20.9	21	18.8
2011	34.4	260.5	87.2	319.5	20.2	12.4	3.8	0	46	1.5	51.5	26.9
2012	141.6	538.8	85.1	159.8	52.5	23	0	0	3.1	32.3	140.8	43.9
2013	121	155.4	179.4	97.7	335.5	15.2	20.7	16.6	3.7	24.2	17.6	19.1
<b>PROM.</b>	<b>120.10</b>	<b>242.69</b>	<b>314.73</b>	<b>213.88</b>	<b>94.83</b>	<b>25.28</b>	<b>8.26</b>	<b>5.25</b>	<b>18.00</b>	<b>32.49</b>	<b>47.90</b>	<b>76.18</b>

ARGELIA												
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.

1990	131.7	161.3	142.8	131.1	77.1	83	43.8	33.2	27.1	85.4	107.8	115
1991	113.1	153.5	197	59.6	70.1	64	39.2	61.9	30.9	61	22.6	66.5
1992	83.5	125.3	94.1	97	57.6	47.7	50.4	15.7	39.4	47.1	103.6	64.5
1993	85.4	105.4	317.2	93.4	23.4	50.3	62.7	29.2	45.6	91.5	48	198.1
1994	213.8	77.6	285.5	123.3	54.1	53.8	81.5	69.3	37	29.6	42.8	104.6
1995	59.8	88	93.4	52.8	64.7	10.1	33.6	19.9	22.3	36.8	129	121.3
1996	98.3	126.9	153.2	97.8	30.7	46.5	38.6	34.4	37.1	57.9	13	27
1997	68.1	109.2	101.2	69.9	46.2	20.7	50.2	35.2	42	59.9	73.6	123.9
1998	40.4	101.9	136.2	88.5	51.2	75.2	49.5	35.7	31.4	116.7	85.8	39.2
1999	124.3	299.1	132.2	83.7	120.2	58.9	59.8	50.2	81.7	27.8	48.1	116.7
2000	152.1	178.5	192.1	105	81.8	86.8	37.1	50.3	67.7	31.6	25.4	57.6
2001	82.8	116.6	68.3	69.8	63.7	86.9	81.2	52.1	42	33.5	128	98.3
2002	102	99.2	53.5	126.7	68.2	39.2	62.8	5.9	18.2	67.7	71.4	70.6
2003	80.3	113.3	188	68.8	92.4	53.9	34.1	6.9	25	73.3	56.5	106.8
2004	48.1	119	177.6	198.7	46.5	85.4	47.5	12.1	25.2	125.8	95.3	96.3
2005	46.4	134.5	173.6	157.6	33	79	15.3	13.4	18.1	86.2	62.5	98.3
2006	138.1	88.8	188.3	82.7	33.6	78.5	33.7	13.2	22.5	37.2	93.1	90.6
2007	50.1	66.3	93.5	99.1	80.7	120	11.3	152.4	55	55.7	153.3	77.6
2008	62.3	251	237.9	137.8	74.6	51.3	89.5	89.7	20.6	136.4	102.9	126.3
2009	133	90.2	134.4	93.1	43.3	29.8	55.7	61.9	55.6	69.7	26	118.4
2010	59.4	109.6	46.3	75.8	70.7	77.5	31.1	46.2	60.6	34.4	60	81.1
2011	52.2	205.2	130	151.5	82.8	53.4	96.4	53	88.5	78.4	123	162.1
2012	144.8	200.1	56	97.2	78.1	80.2	13.6	28.4	29.6	114.9	107.7	114.5
2013	141.7	169.7	48.8	18.9	136.8	60.2	93.5	36.3	63.4	143.8	50.2	69.2
<b>PROM.</b>	<b>96.32</b>	<b>137.09</b>	<b>143.38</b>	<b>99.16</b>	<b>65.90</b>	<b>62.18</b>	<b>50.50</b>	<b>41.94</b>	<b>41.10</b>	<b>70.93</b>	<b>76.23</b>	<b>97.69</b>

