

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONOMICAS**

TESIS

**ESTIMACIÓN DE LOS RIESGOS Y NIVELES DE EROSIÓN
HÍDRICA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO NEGRO,
CHIMALTENANGO.**

**PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN
CARLOS DE GUATEMALA**

POR

JUAN CARLOS ARGUETA MEDINA

En el acto de investidura como

INGENIERO AGRONOMO

EN

SISTEMAS DE PRODUCCION AGRICOLA

EN EL GRADO ACADEMICO DE

LICENCIADO

Guatemala, febrero de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMIA

RECTOR
LIC. CARLOS ESTUARDO GÁLVEZ BARRIOS

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA

DECANO	MSc. Francisco Javier Vásquez Vásquez
SECRETARIO	MSc. Edwin Enrique Cano Morales
VOCAL I	Ing. Agr. Waldemar Nufio Reyes
VOCAL II	Ing. Agr. Walter Arnoldo Reyes Sanabria
VOCAL III	MSc. Danilo Ernesto Dardon Avila
VOCAL IV	Per. For. Axel Esau Cuma
VOCAL V	Per.Contador Carlos Alberto Monterroso

Guatemala,
Febrero de 2,010

Honorable Junta Directiva
Honorable tribunal examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetados señores:

De conformidad con las normas establecidas en la ley orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración el trabajo de tesis titulado:

**“ESTIMACIÓN DE LOS RIESGOS Y NIVELES DE EROSIÓN
HÍDRICA EN LA MICROCUCENCA DEL RÍO NEGRO,
CHIMALTENANGO”.**

Trabajo que presento como requisito previo a optar el título de Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, en el grado académico de Licenciado.

A la espera de una resolución favorable me despido de ustedes.

Atentamente,

Juan Carlos Argueta Medina

ACTO QUE DEDICO

A:

- DIOS:** Por todo su amor y regalarme la oportunidad de la vida hasta el día de hoy.
- MI ABUELO** **Encarnación de Jesús Medina (Chonito).** Por haber sido el máximo ejemplo de superación, responsabilidad y seguir siendo mi guía para la vida.
- MI ABUELA** **Juana María de Medina (Juanita).** Por todos los años de amor y dedicación a mi persona.
- MI MADRE** **Odilia Medina.** Por ser el pilar fundamental en mi vida y por todo el amor y sacrificio realizado durante tantos años para que hoy pueda cumplir esta meta.
- MI PADRE** **Amilcar Argueta** Por su apoyo incondicional y los esfuerzos realizados en mi formación académica.
- MI ESPOSA** **Yesenia Beza de Argueta.** Que con su amor y comprensión ha hecho posible llegar a este momento tan especial
- MI HIJA** **Alejandra Yesenia Argueta Beza.** Por ser mi mayor fuente de inspiración y que sirva de ejemplo para su superación profesional.
- MIS TIOS** **Carlos Medina, Amarilis de Medina y Dilma Gálvez.** Por todo el amor, ejemplos y enseñanzas.
- MIS HERMANAS** **Claudia y Rocío.** Por todo su amor y como ejemplo para su superación.
- MIS SUEGROS** **Fabio Beza e Irma Leytan.** Por todo su amor y apoyo.
- TODA MI FAMILIA** **Con aprecio y respeto,** especialmente a René Barillas y Sandra Leytan por su apoyo durante la realización de esta tesis.

TESIS QUE DEDICO

A:

MI PAIS

Guatemala, Por ser cuna de tan ilustres profesionales que han demostrado las capacidades de su gente.

MI COLEGIO

Liceo Guatemala. Por haber formado en mí, tantos valores cristianos éticos y basados en el liderazgo en la educación superior.

LA UNIVERSIDAD

de San Carlos de Guatemala. Por su liderazgo en la formación de profesionales al servicio del país.

FACULTAD

de Agronomía Por la excelencia académica en la formación de profesionales que contribuyen al desarrollo rural de Guatemala.

MI AMIGOS

de la Facultad de Agronomía Jorge Chapas, Juan Pablo Vásquez, Armando Urrutia, Jonathan y David Nolasco, Germán González, Víctor Cabrera, Jorge Mario Monzón, José Valentín, Mario Rodríguez, Otto Velásquez, Juan Pablo Marín, Camilo Medina, Ana Morales, Nery Fajardo, Jorge Ramírez, y muchos más.

Personales Rodrigo Urizar, Leo Buezo, José Moscoso, Adolfo y Leónidas Vásquez, Alma Moscoso, Alejandro Menéndez Berganza, Luis Manuel y Juan Luis de León, Walter Girón, Jean-Roch Lebeau.. Por regalarme su amistad y haber compartido tantos momentos.

AGRADECIMIENTOS

SINCEROS AGRADECIMIENTOS A:

Ing. Agr. Msc Hugo A. Tobías V. e Ing. Agr. Msc. Guillermo Santos.
Por su asesoría en la realización de este trabajo de tesis.

Dr. en Ciencias Ambientales. Fernando Peña Cortés del laboratorio de
planificación territorial de la Universidad Católica de Temuco, Chile.
Por su invaluable apoyo a la realización de esta tesis.

Cartógrafo. Roberto Sagastume Lavagnino. Por compartir sus
conocimientos para la elaboración de la cartografía temática.

Ing. Agr. Msc. Carlos López. Por todo su apoyo durante la evolución
de la investigación.

Ing. Agr. Víctor González e Ing. Agr. Víctor Villalta. Por su
colaboración en el análisis de resultados.

Ing. Agr. Phd. Camilo Ernesto Medina por el apoyo técnico en el
análisis y revisión del documento.

Ing. Agr. Msc Baltasar Moscoso. Mi agradecimiento sincero por su
incondicional apoyo y sobre todo por su amistad brindada.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE CUADROS.....	VII
RESUMEN	IX
SUMMARY	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3. JUSTIFICACIÓN.....	4
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1. Marco conceptual	5
4.1.1. Conceptos de erosión	5
4.1.2. Mecánica de la erosión del suelo	6
4.1.3. Efectos de la erosión en los niveles de nutrientes del suelo	7
4.1.4. Procesos de la erosión hídrica	7
4.1.5. Factores que inciden sobre la erosión.....	8
4.1.6. Antecedentes de la estimación de pérdidas de suelo por erosión hídrica.....	11
4.1.7. Metodología de estimación de la erosión hídrica propuesta por Almorox. (1994).	13
4.1.8. Metodología LEAM para determinar la erosión del suelo	14
(Land Erodibility Assessment Methodology, LEAM).....	14
4.1.9. Ecuación universal de pérdida de suelo USLE “Universal Soil Loss Equation”	15
4.1.10. Definición y funciones de los sistemas de información geográfica	16
4.1.11. Aplicación de los SIG en la determinación de la erosión hídrica	17
4.1.12. Concepto de riesgo.....	18
4.2. Marco Referencial	19
4.2.1. Localización	19
4.2.2. Clima y zonas de vida	19
4.2.3. Clasificación taxonómica	22

4.2.4. Clases de suelos.....	24
4.2.5. Geología y geomorfología.....	24
4.2.6. Hidrología e hidrografía.....	25
4.2.7. Uso de la tierra	25
4.2.8. Características socioeconómicas.....	25
5 OBJETIVOS.....	27
5.1. General.....	27
5.2. Específicos.....	27
6. METODOLOGÍA	28
6.1 Fase preliminar.....	28
6.1.1. Delimitación de la cuenca	29
6.1.2. Clasificación fisiográfica del terreno	29
6.2. Metodología de estimación de la erosión hídrica propuesta por Almorox	31
6.2.1. Índice de erosionabilidad del suelo (IES).....	31
6.2.2. Índice de la erosividad climática -IEC-	33
6.2.3. Estimación de la de erosión potencial (Riesgo a Erosión) -EP-	35
6.2.4. Índice de cobertura vegetal (ICV)	35
6.2.5. Estimación del riesgo a erosión (RE).....	36
6.3. Metodología de evaluación de la erosión del suelo (LEAM) “Land erodibility assessment methodology”	38
6.3.1. Factor de longitud y gradiente de la pendiente	38
6.3.2. Riesgo de erosividad de las lluvias	39
6.3.3. Erodabilidad del suelo	39
6.3.4. Determinación de clases y subclases de erosión	40
6.4. Ecuación universal de pérdida de suelo USLE (Universal soil loss equation)	42
6.4.1. Erosividad de las lluvias (Factor R)	42
6.4.2. Erodabilidad del suelo (Factor K)	42
6.4.3. Erodabilidad topográfico (Factor LS).....	42
6.4.4. Factor de manejo de cobertura vegetal (Factor C).....	42
6.4.5. Factor de prácticas de conservación de suelos (Factor P)	43
7. RESULTADOS.....	44

7.1. Estimación de la erosión hídrica propuesta por Almorox.....	44
7.1.1. Índice de erosionabilidad del suelo (IES).....	44
7.1.2. Índice de erosividad climática	47
7.1.3. Estimación de la erosión potencial -EP-	48
7.1.4. Índice de cobertura vegetal	48
7.1.5. Estimación del riesgo a erosión -RE-	49
7.2. Cálculo del riesgo a erosión en la microcuenca del río Negro por la metodología LEAM	54
7.2.1. Factor topográfico o de pendiente.....	54
7.2.2. Riesgo de erosividad de las lluvias	54
7.2.3. Erodabilidad del suelo (factor K)	55
7.2.4. Valor de erosión de la microcuenca del río Negro, por la metodología LEAM.....	56
7.3. Estimación de la pérdida de suelo por medio de la ecuación universal de pérdidas de suelo -USLE-.....	59
7.3.1. Erosividad de la lluvia (Factor R)	59
7.3.2. Erodabilidad del suelo (Factor K)	59
7.3.3. Erodabilidad topográfica (Factor LS)	60
7.3.4. Factor de manejo de la cobertura vegetal (Factor C)	60
7.3.5. Factor de prácticas de conservación de suelos (Factor P)	61
7.3.6. Estimación del riesgo de erosión por medio de la ecuación universal de pérdidas de suelo -USLE-	61
8.1. Análisis de similitud entre las tres metodologías aplicadas.....	65
8.1.1. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-USLE	68
8.1.2. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-LEAM.....	70
8.1.3. Análisis de similitud entre las metodologías USLE-LEAM.....	72
8.2. Análisis de la cobertura vegetal para determinar el riesgo a erosión	74
8.2.1. Análisis de similitud entre las tres metodologías aplicadas, sin utilizar el factor de la cobertura vegetal	75
8.2.2. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox y USLE sin utilizar el factor de la cobertura vegetal	77
8.2.3. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-LEAM, sin cobertura vegetal	79
8.2.4. Análisis de similitud entre las metodologías de USLE-LEAM sin cobertura vegetal	81

9. CONCLUSIONES	83
10. RECOMENDACIONES	84
11. BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujo de “Causas y Efectos” implicados en la erosión del suelo	6
Figura 2. Modelos de datos de un SIG.....	17
Figura 3. Climadiagrama de la estación Chicazanga.....	19
Figura 4. Mapa de Ubicación de la microcuenca del río Negro en los niveles nacional, departamental y municipal	20
Figura 5. Mapa de la microcuenca del río Negro	21
Figura 6. Mapa unidades fisiográficas microcuenca del río Negro, Chimaltenango, 2007.....	30
Figura 7. Cálculo del índice de erosionabilidad del suelo	31
Figura 8. Cálculo del índice de erosividad climática.....	34
Figura 9. Modelo cartográfico para evaluar los riesgos de erosión mediante la metodología propuesta por Almorox (1991), en la microcuenca del río Negro, 2007.	37
Figura 10. Modelo cartográfico para evaluarlos niveles de erosión, mediante la metodología LEAM, en la microcuenca del río Negro, 2007.....	41
Figura 11. Modelo cartográfico para evaluar los niveles de erosión, mediante la metodología USLE, en la microcuenca del río Negro, 2007.	43
Figura 12. Procedimiento y productos parciales en la determinación de la erosionabilidad del suelo.	50
Figura 13. Procedimiento y productos parciales en la determinación de la Erosión Potencial.....	51
Figura 14. Procedimiento y productos parciales en la determinación del Riesgo a Erosión.....	52
Figura 15. Mapa de Riesgo a Erosión, metodología propuesta por Almorox.....	53
Figura 16. Procedimiento y productos parciales en la determinación de riesgo a erosión, por la metodología LEAM.....	57
Figura 17. Mapa de riesgo a erosión en la microcuenca del río Negro por la metodología LEAM.....	58
Figura 18. Procedimiento y productos parciales riesgo a erosión, por la metodología USLE.	63
Figura 19. Mapa de Riesgo a erosión en la microcuenca del río Negro, por la metodología USLE.	64
Figura 20. Análisis de similitud de las tres metodologías aplicadas, microcuenca río Negro, 2007.....	66
Figura 21. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías Almorox-USLE	69

Figura 22. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías Almorox-LEAM.....	71
Figura 23. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías USLE-LEAM	73
Figura 24. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías sin cobertura vegetal.....	76
Figura 25. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías Almorox-USLE sin cobertura vegetal.....	78
Figura 26. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías Almorox-LEAM sin cobertura vegetal	80
Figura 27. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías USLE-LEAM sin cobertura vegetal.....	82

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Unidades fisiográficas, microcuenca río Negro, 2007	29
Cuadro 2. Índice de erosionabilidad según textura del suelo	32
Cuadro 3. Índice de erosionabilidad según profundidad del suelo.....	32
Cuadro 4. Índice de erosionabilidad según capacidad de uso de la tierra.....	33
Cuadro 5. Agrupación de pendientes según USDA	33
Cuadro 6. Rango de categorías del índice de Fournier.....	34
Cuadro 7. Índice de erosividad climática (IEC)	35
Cuadro 8. erosión potencial (Riesgo a Erosión).....	35
Cuadro 9. Índice de cobertura vegetal.....	36
Cuadro 10 Riesgo a erosión	36
Cuadro 11. Subclase de pendiente de terreno, según metodología LEAM.....	38
Cuadro 12. Subclase de erosividad de las lluvias, según metodología LEAM....	39
Cuadro 13. Subclase de erodabilidad del suelo, según metodología LEAM	40
Cuadro 14. Clases o Subclases de erodabilidad según metodología LEAM.....	40
Cuadro 15. Resultados índice de erosionabilidad según textura del suelo, microcuenca río Negro, 2007.....	44
Cuadro 16. Resultados índice de erosionabilidad, según profundidad del suelo, microcuenca río Negro, 2007.	45
Cuadro 17. Resultados índice de capacidad de uso de la tierra (Metodología USDA) ,microcuenca río Negro, 2007.	46
Cuadro 18. Resultados índice de erosión por pendientes, microcuenca río Negro, 2007.....	46
Cuadro 19. Resultados índice de erosionabilidad del Suelo –IES-, microcuenca río Negro, 2007.....	47
Cuadro 20. Resultados índice de erosividad climática -IEC-, microcuenca río Negro, 2007.....	48
Cuadro 21. Resultados estimación de la erosión potencial, microcuenca río Negro, 2007.....	48
Cuadro 22. Resultados índice de cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.....	48
Cuadro 23. Resultados riesgo a erosión, microcuenca río Negro, 2007.....	49
Cuadro 24. Resultados factor topográfico o de pendiente, microcuenca río Negro, 2007.....	54
Cuadro 25. Resultados riesgo de erosividad de la lluvia, microcuenca río Negro, 2007.....	55
Cuadro 26. Resultados riesgo de erodabilidad del suelo, microcuenca río Negro, 2007.....	56
Cuadro 27. Clases y rangos de erosión, microcuenca río Negro, 2007.....	56
Cuadro 28. Resultados Erosividad de la lluvia (Factor R), microcuenca río Negro, 2007.....	59

Cuadro 29. Resultados erodabilidad del suelo (Factor K), microcuenca río Negro, 2007.....	60
Cuadro 30. Resultados Factor de manejo de la cobertura vegetal (Factor C), microcuenca río Negro, 2007.....	61
Cuadro 31. Resultados Riesgo a Erosión USLE, microcuenca río Negro, 2007.....	62
Cuadro 32. Análisis de similitud entre las tres metodologías aplicadas, microcuenca río Negro, 2007.....	65
Cuadro 33. Factores utilizados en la aplicación de cada metodología para estimar el riesgo a erosión	67
Cuadro 34. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-USLE.....	68
Cuadro 35. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-LEAM, microcuenca río Negro, 2007.....	70
Cuadro 36. Análisis de similitud entre las metodologías USLE-LEAM, microcuenca río Negro, 2007.....	72
Cuadro 37. Análisis de similitud entre las tres metodologías aplicadas sin cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.....	75
Cuadro 38. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-USLE, sin cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.....	77
Cuadro 39. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-LEAM sin cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.....	79
Cuadro 40. Análisis de similitud entre las metodologías USLE-LEAM, sin cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.....	81

RESUMEN

El suelo es uno de los principales bienes naturales que tiene la república de Guatemala, ya que en él se sustenta la actividad económica de la mayoría de población. El recurso suelo es de naturaleza dinámica, ya que se pierde y se genera constantemente. No obstante, distintos factores biofísicos y humanos hacen que la tasa de pérdida de suelo, sea mucho mayor a la tasa de generación del mismo.

La posición geográfica de Guatemala en una zona de alta actividad tectónica hace que el territorio guatemalteco posea una topografía quebrada, con fuertes pendientes que reducen la capacidad de la tierra. A pesar de que la mayor extensión de suelos del país tiene capacidades de uso no aptas para agricultura, esta actividad es la principal fuente de vida de la población. Lo anterior se debe a las condiciones sociales, históricas y culturales de Guatemala. Este sobre uso de la tierra reduce la sostenibilidad de las actividades humanas.

Al proceso mediante el cual se da el desprendimiento, transporte y deposición de partículas de suelo se le llama erosión (cuando la erosión es provocada por el agua se denomina erosión hídrica). El proceso de erosión hídrica depende de una serie de factores como: (i) fuerzas erosivas de impacto de la lluvia en el suelo, (ii) resistencia de las partículas de suelo al desprendimiento, (iii) relieve del terreno que favorece el transporte/deposición de partículas de suelo, (iv) cobertura de la tierra que funciona como capa protectora, y (v) actividades humanas que favorecen o dificultan el proceso de erosión.

La medición de la pérdida de suelo por vías directas es muy difícil, cara y poco práctica. No obstante se pueden medir de manera indirecta los factores que afectan directamente a los procesos de erosión. Existen distintas metodologías que se han utilizado para medir los factores que afectan la erosión y la interacción de los mismos para provocar la pérdida de suelo.

El presente trabajo se realizó en la cuenca del Río Negro, que es parte de la cuenca del río Achiguate. Existen 18600 habitantes distribuidos en los municipios de Parramos y San Andres Itzapa del departamento de Chimaltenango.

El principal objetivo de esta investigación fue el de estimar los riesgos y/o niveles de erosión hídrica en la cuenca del Río Negro. Para el alcance del objetivo trazado se compararon tres metodologías de estimación indirecta del riesgo a erosión: (i) Metodología de estimación de la erosión hídrica propuesta por Almorox (ii) Metodología de evaluación de la erosión del suelo –LEAM- y (iii) Ecuación Universal de Pérdida de Suelo –USLE-.

El proceso metodológico incluyó la evaluación de los factores que afectan a la erosión: fuerzas erosivas de la lluvia, la susceptibilidad de los suelos a erosionarse, el relieve y la protección que ejerce la cobertura vegetal sobre el suelo. Cada uno de los factores fue evaluado en un ambiente de sistemas de información geográfica que permitió conocer la distribución espacial de cada uno y de los riesgos a erosión.

Para cada factor evaluado se utilizaron distintas fuentes de información utilizada que incluyeron datos de estaciones meteorológicas en el área de influencia de la microcuenca del río Negro (erosividad de la lluvia), muestreos y análisis de suelos (susceptibilidad a la erosión del suelo), modelo de elevación digital (factores de pendiente) y fotografías aéreas de alta resolución (uso y cobertura actual de la tierra).

La evaluación de erosión por medio de la metodología de Almorox presentó que la mayoría de la cuenca tiene un riesgo a erosión calculada medio (47.30%) mientras que únicamente un porcentaje de 6.93% del área tiene un riesgo a erosión calculado bajo.

Con relación a la metodología LEAM, el resultado indica que la mayor extensión de la cuenca está con riesgo a erosión muy alto (43.54%), seguido de riesgo bajo en 25.56%, alto 17.24% y medio 13.66% del territorio de la cuenca.

El cálculo de pérdida de suelo utilizando la metodología de USLE produjo los siguientes resultados: el 55.44% de la microcuenca tiene tasas de erosión menores a 16 t/ha-año que representa riesgo a erosión bajo,

En el análisis de similitud entre las metodologías se observó que solo un 9.36% del total de la microcuenca tiene coincidencias entre las tres metodologías, evidenciando una baja similitud entre ellas. El factor que más limita la similitud entre los riesgos de erosión es la cobertura vegetal. Al realizar el análisis de similitud sin considerar dicho factor las metodologías de Almorox y LEAM tienen una similitud de 70%, no obstante, la metodología de USLE mantuvo las diferencias.

Ante la disponibilidad de información que existe en la República de Guatemala y tendencias de inversión en investigación, se considera que esta Tesis será un buen aporte en el estudio de erosión en otras cuencas del país. Permitiendo la optimización de recursos. La forma en que se realiza la aplicación de los SIG en los estudios de pérdida de suelo puede incorporar fuentes de error en los resultados. Por lo que se recomienda continuar con este tipo de investigaciones para aumentar la precisión de las estimaciones de pérdida de suelo.

SUMMARY

Estimation of the water erosion risks and levels in the river basin of Rio Negro, Chimaltenango

The soil is one of the main natural goods of the Republic of Guatemala. The economy of most of the Guatemalan population is sustained in its soils. This resource has a dynamic nature because it is constantly being generated and lost. However, due to various biophysical and human factors; the soil loss rate is much higher than the soil generation one.

The country of Guatemala, is located in a high tectonic activity position which provide it with a predominant broken topography. This fact makes the Guatemalan land to have mostly low production capacity. Although, most of the country's land is not suitable for agriculture purposes, agriculture is the main population livelihood. The reason of that lies in a cluster of social, historical and cultural conditions. This land over-use reduces the human development sustainability.

The process where soil particles are detached, transported and deposited is called erosion. When the erosion process is produced by water forces is denominated water erosion. The water erosion process is driven by the following factors: (i) erosive forces by raindrop impact over the soil, (ii) the soil particles resistance to detachment, (iii) the land relief which favors the transportation/deposition of the soil particles, (iv) the land cover working as a protective layer, and (v) human activities carried out to prevent the soil erosion.

The direct measurements of the soil loss are difficult, expensive and inefficient. Nevertheless, the driving factors can be indirectly gauged. There are several methodologies which have been applied to estimate the erosion factors and their interaction in producing the soil loss.

This research work was framed in the Rio Negro basin, which is part of the Rio Achiguate basin. Within the basin there is a living population of 18600 inhabitants distributed in the municipalities of Parramos and San Andres Itzapa, both in the department of Chimaltenango.

The main objective of the present study was: to estimate the water erosion risks/levels of the Rio Negro basin. In order to achieve that objective, three erosion risk estimation methodologies were compared: (i) The erosion risk methodology proposed by Almorox, (ii) the Land Erodibility Assessment Methodology (LEAM), and (iii) the Universal Soil Loss Equation.

The methodological scheme included the evaluation of the factors affecting the erosion process: raindrops erosive force, soil erosion susceptibility, land relief, and the land cover protective layer over the soil. Each erosion factor was analyzed in a Geographic Information System environment. This allowed us to know the spatial distribution of every factor and the erosion risks.

Different information sources were used for the estimation of each erosion factor. The raindrops erosive force was obtained from information of the meteorological stations in the region of the Rio Negro basin. The soil erosion susceptibility was estimated by a soils survey and analysis. The land relief (slope characteristics) was detected from the Guatemalan digital elevation model. Finally, the land use and cover was evaluated using a set of high resolution aerial photographs.

The erosion process evaluation using the Almorox methodology presented that most of the Rio Negro basin has medium calculated erosion risk (47.30% of the basin). Whereas only 6.93% of the basin area has a low calculated erosion risk.

Concerning the application of the LEAM methodology, the results indicated that the largest extension of the basin has a very high erosion risk (43.54%). The second place was low erosion risk with 25.56% of the basin area and 13.66% of the basin territory had medium erosion risk.

Regarding the soil losses estimation of the Rio Negro basin using the USLE methodology, the following result was obtained: 55.44% of the basin area has erosion rates lesser than 16 t/ha-year which represents low erosion risks.

A similitude analysis among the methodologies was run. Only 9.36% of the basin area presented coincidences of the three methodologies. The main factor limiting the similitude of the erosion risks was the land cover factor. When the land cover factor was not included in the analysis, Almorox and LEAM methodologies were similar in 70%. However, the USLE methodology maintained the differences.

Considering the information availability in the Guatemalan Republic and the research investment tendencies, this Thesis work will contribute with the erosion processes knowledge in other sides of the country. This would allow optimization in the research resources investments. The way in which the GIS are applied in this kind of studies could incorporate error sources in the results. Thus, it is recommended continuing this kind of researches, in order to improve the precision of the soil losses estimations.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel latinoamericano, la pérdida de los suelos debido a la erosión hídrica es uno de los problemas ambientales que más afectan las actividades productivas de los agricultores, tomando en cuenta que el suelo es un recurso renovable que merece ser conservado adecuadamente, para mantener sus niveles de fertilidad y profundidad.

La erosión es definida como el fenómeno compuesto por tres procesos: a) el desprendimiento de las partículas del suelo; b) su transporte por el agente erosivo y c) la sedimentación. Las pérdidas económicas a causa de la erosión del suelo, pueden alcanzar niveles significativos, por lo que es necesario tomar medidas oportunas, que contribuyan a mejorar los procesos asociados o disminuyan sus consecuencias negativas.

Arana, citado por Sánchez (1993), estima que el 35% de la superficie de la república de Guatemala está erosionada y que, además, el 65% de ésta es altamente susceptible a la erosión.

En Guatemala, las principales cuencas hidrográficas que drenan hacia el océano pacífico son más susceptibles de ser erosionadas y las que tienen las más altas tasas de pérdida de suelos; esto, debido, principalmente, a la presencia de suelos volcánicos, los cuales son altamente erosivos, mayor intensidad de lluvias y fuertes pendientes, además de altas concentraciones de población. Sánchez (1979). Con este estudio se determinaron las áreas de mayor riesgo a erosión, utilizando la metodología propuesta por Almorox (1994); en ella, el autor propone la determinación de tres índices: a) índice de erosionabilidad del suelo; b) índice de erosividad de la lluvia, y c) el índice de cobertura vegetal. Con estos tres elementos se estimó el riesgo a erosión calculada REC; posteriormente, se realizó un análisis comparativo con la Metodología de Evaluación de la Erosión del Suelo (LEAM), por sus siglas en inglés, “Land Erodibility Assessment Methodology, LEAM”, y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE “Universal Soil Loss Equation”, ambas validadas en la Microcuenca del río Itzapa.

Para poder realizar este análisis, el estudio se llevó a cabo en un laboratorio de Sistemas de Información Geográfica -SIG-. Esta herramienta permitió la manipulación de datos y generación de escenarios, la implementación de complejas funciones espaciales junto a una conveniente unión con datos de sensores remotos; es decir, que, gracias a ellos, una misma base de datos numéricos y cartográficos puede ser articulada y manipulada de forma diferente y fácil, en función del objetivo del estudio.

El estudio se llevó a cabo en la cuenca alta del río Achiguate, específicamente en la microcuenca del río Negro, perteneciente a la subcuenca del río Guacalate y ubicada entre los municipios de San Andrés Itzapa y Parramos del departamento de Chimaltenango.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estado actual de deterioro y degradación de los recursos naturales en las cuencas hidrográficas en Centroamérica, como consecuencia de prácticas inapropiadas del uso de la tierra, expresadas en: tala de los bosques, expansión de la actividad ganadera, agricultura de ladera, migratoria, además de los múltiples problemas socioeconómicos; es considerado como crítico para la mayoría de las cuencas hidrográficas de todos los países.

Arana, citado por Sánchez (1979), calcula que alrededor del 65% de la superficie de Guatemala es altamente susceptible a la erosión, y del 25 al 35% está seriamente erosionada o degradada; en algunas regiones se ha estimado pérdidas de 267 t ha^{-1} año, como se reporta en la cuenca Xayá-Pixcayá.

Según estudios realizados por el PCEG (2000), en la Subcuenca del río Pensativo-Alto Guacalate, de la cual forma parte la microcuenca del río Negro, el problema central de manejo de la subcuenca responde a la “inadecuada conversión del uso de la tierra y débil gestión de riesgo”; esta situación obedece a la ausencia de planificación en el uso y manejo de los recursos naturales renovables definida por la inadecuada aplicación de las políticas del Estado, vinculadas a la protección de los mismos, ausencia de oportunidades para el desarrollo y gestión de riesgo que se manifiesta en el deterioro de la calidad de vida de la población; asimismo, indican que aproximadamente el 80 % de la microcuenca del río negro tiene una tasa de erosión que oscila entre las 10 y 150 t/ha/año, un 5% es $>$ a 150 t/ha/año y un 15% no posee erosión.

El impacto de la erosión sobre los recursos hídricos se manifiesta en el incremento de la carga de sedimentos sobre los cursos de agua, los cuales ofrecen condiciones desfavorables para su aprovechamiento. De igual manera, la erosión provoca alteraciones físico-químicas y bacteriológicas que afectan a la fauna y flora. La erosión no es solamente una "enfermedad" del suelo, sino también del paisaje porque influye en la vegetación, clima, etc. A raíz de esta situación, surge la importancia de aplicar metodologías para estimar los riesgos de erosión en las microcuencas, a fin de evitar pérdidas de suelo y establecer medidas para la protección del recurso.

3. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala se han realizado diferentes estudios para estimar las pérdidas de suelo por efecto de la erosión hídrica; dentro de las metodologías más utilizadas se encuentran: la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo -USLE-, La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada -RUSLE-, Metodología de Evaluación de la Erosión del Suelo -LEAM-, las cuales hacen uso de la información, principalmente, edáfica y climática

En el país, la disponibilidad de información climática y edáfica es limitada, existen alrededor de 30 estaciones meteorológicas que registran datos climáticos, a nivel nacional, y se cuenta con muy pocos estudios edafológicos recientes con información precisa. Lo anterior sugiere que el empleo de metodologías o modelos que estimen las pérdidas de suelo y los riesgos a erosión, basadas en datos climáticos y edafológicos complejos a nivel de diferentes espacios geográficos microcuencas, es limitado y costoso, se hace necesario contar con información detallada, que actualmente no está disponible. Por tal razón, es imprescindible la utilización de metodologías que hagan uso de información limitada para la estimación de áreas con riesgos a erosión hídrica, y que pueda ser un insumo para la planificación del uso de la tierra en unidades naturales.

Este estudio propone la utilización de una metodología sugerida por Almorox, la cual ha sido validada, a nivel de microcuencas, en España y Chile, principalmente. Esta metodología es una alternativa rápida, sencilla y más económica para estimar los riesgos a erosión a nivel de microcuencas, utilizando en forma de índices los siguientes factores: textura del suelo, profundidad del suelo, pendiente del terreno, capacidad de uso de la tierra, precipitación promedio mensual e índice de cobertura vegetal. La metodología se comparará con las metodologías LEAM y USLE, con el propósito de determinar si existe similitud en los resultados obtenidos. Se seleccionaron estas metodologías, en virtud de que ya han sido validadas dentro de la cuenca del río Guacalate, ubicada en el departamento de Chimaltenango, así como en áreas cercanas al sitio de interés.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. Marco conceptual

A continuación se definen varios conceptos sobre erosión hídrica.

4.1.1. Conceptos de erosión

- El desprendimiento, transporte y deposición de las partículas individuales del suelo es el proceso conocido como *erosión*. ASCE (1976).
- La FAO (1994) define este proceso como la desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos; además, señala que los agentes erosivos son dinámicos; en el caso de la erosión hídrica, son la lluvia y el escurrimiento superficial o las inundaciones.
- La erosión hídrica es un fenómeno compuesto de dos procesos consistentes en el desprendimiento de las partículas del suelo y su transporte por el agente erosivo. Cuando no existe suficiente energía para este transporte, se presenta un tercer proceso: la sedimentación. Figueroa (1979).
- Como su nombre lo indica, se trata de la erosión causada por el agua, en especial, por la lluvia. Y es que, las gotas de lluvia, al caer, impactan directamente sobre los terrones de suelos o agregados, y los rompen en agregados más finos, hasta separar el limo, la arcilla, la arena y la materia orgánica que los unía.
- González (1994) presenta un criterio más amplio de la erosión de suelos, que consiste en compararlo con otros procesos de desgaste del paisaje, porque la erosión del suelo deberá reconocerse como el problema dominante, solamente cuando y donde sea el proceso más rápido y fuerte. En la Figura 1 se presentan las principales causas y efectos implicados en la erosión del suelo.
- La erosión en las tierras altas de Guatemala es grave, y se calcula que alrededor del 65% de la superficie del país es altamente susceptible a la erosión, mientras que ya entre un 25 y 35% está seriamente erosionada o degradada. El proceso de erosión es natural e inevitable, y se acelera cuando es alterado por la actividad humana. Agrega González (1994) que la erosión es un serio problema ambiental en todo el mundo, ya que

reduce la productividad de los suelos y la pérdida de nutrientes, terminando en la degradación de la estructura del suelo.

- Sánchez (1993) indica que las altas tasas de pérdida de suelos en el pacífico centroamericano y se debe, a la presencia de suelos volcánicos altamente erosivos, mayor intensidad de las lluvias, fuertes pendientes, quemas estacionales, así como suelos desnudos al inicio del período lluvioso y mayor concentración de población.

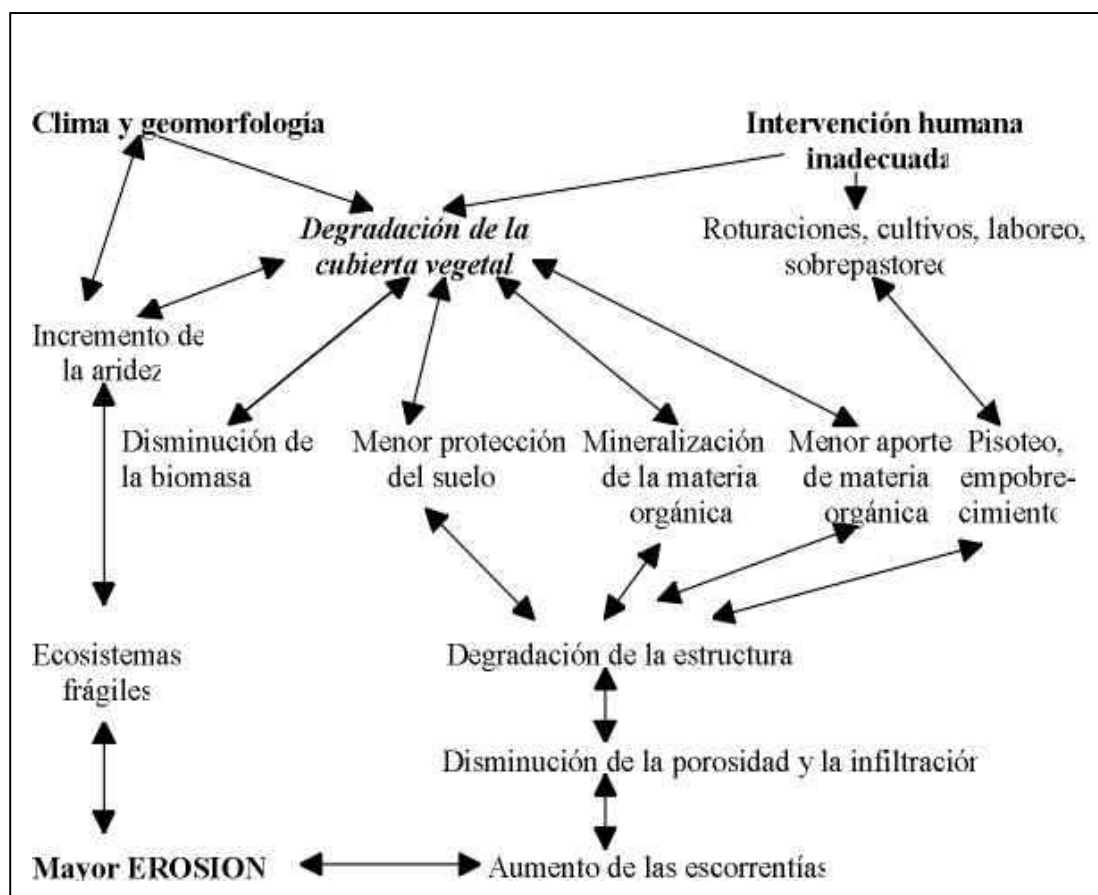


Figura 1. Flujo de “Causas y Efectos” implicados en la erosión del suelo

Fuente: Grupo Ecologista Mediterráneo

4.1.2. Mecánica de la erosión del suelo

Ellisón, citado por FAO (1994), menciona que la lluvia tiene efecto a través del impacto de las gotas de ésta sobre la superficie del suelo, y por el propio humedecimiento del suelo, que provocan desagregación de las partículas primarias; ocasiona, también, transporte de partículas por aspersion y provee de energía al agua de la escorrentía superficial. Como consecuencia de la

desagregación se produce un sello superficial que disminuye sustancialmente la capacidad de infiltración del suelo. En el momento en que la precipitación pasa a ser mayor que la tasa de infiltración de agua en el suelo, se provoca la retención y detención superficial del agua y, posteriormente, el escurrimiento superficial del agua que no infiltra. Se considera a la escorrentía superficial como el principal agente de transporte.

4.1.3 Efectos de la erosión en los niveles de nutrientes del suelo

La erosión es un proceso que actúa de manera selectiva, arrastrando las partículas más finas y más reactivas del suelo (arcilla y materia orgánica) y dejando las partículas más gruesas, pesadas y menos reactivas, de esta manera la erosión provoca una disminución de la concentración de nutrientes en el suelo degradado remanente. FAO (1994).

Según Baker y Laflen en 1983, citados por FAO (1994), la pérdida de nutrientes puede ocurrir de tres maneras:

1. Por percolación en el perfil del suelo;
2. En solución en el agua de escorrentía; y
3. Absorbidos a los sedimentos arrastrados por el agua de escorrentía.

4.1.4. Procesos de la erosión hídrica

El agua es un erosivo muy enérgico. Cuando el suelo ha quedado desprotegido de la vegetación y sometido a las lluvias, los torrentes arrastran las partículas del suelo hacia arroyos y ríos. El suelo, desprovisto de la capa superficial, pierde la materia orgánica (humus) y entra en un proceso de deterioro que puede originar hasta un desierto.

El riesgo de erosión por acción del agua es máximo en periodos de lluvias intensas en que el suelo se encuentra saturado de agua, con escasa cubierta vegetal y aumenta el movimiento del agua por la superficie del suelo. El efecto de la escorrentía resultante elimina considerables cantidades de suelo y origina regueros de erosión que actúan como ruta principal del agua, lo que incrementa el problema.

Henry (1986) apunta que la erosión por el agua puede dividirse en cuatro tipos:

- a. De impacto
- b. Laminar
- c. De surco
- d. De cárcava

4.1.4.1. Desprendimiento

El agente más determinante para el desprendimiento en el caso de la erosión hídrica, lo constituyen las gotas de lluvia, las cuales, al golpear sobre una superficie desnuda, provoca que las partículas de suelo sean proyectadas al aire por distancias variables. La lluvia también compacta la superficie del suelo y baja la tasa de infiltración del mismo; como consecuencia, se presenta el escurrimiento, el cual conforme incrementa su velocidad de flujo y se encauza en que, produce, a su vez, desprendimiento y transporte de partículas. Figueroa (1991).

Sin embargo aunque la erosión por dispersión puede ser un proceso importante, especialmente en los suelos arenosos finos, las partículas del suelo no son transportadas lejos. Kirkby (1994). La acción dispersante de la lluvia se convierte en un proceso más efectivo; a medida que la pendiente es más pronunciada y conforme aumenta la velocidad del viento.

4.1.4.2. Transporte

Es el fenómeno provocado por el escurrimiento superficial del agua de lluvia que no logra infiltrarse en el suelo. Los factores que influyen o determinan esta etapa son: el escurrimiento superficial, la pendiente del terreno y la textura. Suárez (1979).

4.1.4.3. Sedimentación

Este proceso se presenta cuando la energía o la capacidad de arrastre del agua ya no es suficiente para continuar el transporte de las partículas de suelo dándose así el hundimiento. Sánchez (1979).

4.1.5. Factores que inciden sobre la erosión

Figueroa (1979) expone que los factores que controlan el sistema de erosión (del suelo) son: la erosionabilidad del suelo, la erosividad del agente erodante, el tipo de cobertura vegetal y los diversos factores socioeconómicos.

4.1.5.1. Erodabilidad

La erodabilidad es la resistencia del suelo al desprendimiento y transporte por parte de los agentes erosivos. Esta resistencia depende de factores intrínsecos del

suelo, aunque se ve afectada por la posición topográfica, la pendiente y la cantidad de disturbio de la estructura del suelo que produce el hombre. Motta (1999).

Se considera que la erodabilidad varía en función de la textura del suelo, la estabilidad de los agregados, la resistencia al corte, la capacidad de infiltración y el contenido de materia orgánica y cementantes químicos del suelo. La textura del suelo afecta a la erodabilidad del mismo, según su resistencia al transporte por peso y/o rugosidad. La resistencia al corte del suelo es una medida de su cohesión y resistencia a las fuerzas cortantes que ejercen la gravedad, los líquidos en movimiento y las cargas mecánicas. La capacidad de infiltración del suelo está relacionada con el tamaño, estabilidad y forma de los poros en el perfil. Figueroa (1991).

4.1.5.2. Erosividad

La erosividad está definida como la capacidad potencial que tiene la lluvia para causar erosión. La forma más adecuada de expresar la erosividad de la lluvia ha sido un índice basado en la energía cinética de la misma; de tal forma, la erosividad de una lluvia sería en función de su intensidad y duración, y de la masa, diámetro y velocidad de las gotas de ésta. Laws (1943).

Las gotas de lluvia compactan la superficie del suelo y las salpicaduras y el flujo del agua desprenden partículas del mismo, estos procesos pueden sellar las superficies, con lo que disminuye la tasa de infiltración del agua en el suelo. Si cae más lluvia de la que puede infiltrarse en el referido suelo, se producen escorrentías. Kirkby y Morgan (1994).

4.1.5.3. Efecto de la cobertura vegetal

El papel más relevante de la vegetación es la interceptación de las gotas de lluvia, evitando que la energía cinética de las mismas se disipe en el suelo. La eficacia de la cobertura de plantas para reducir la erosión depende de la altura y continuidad de la cubierta vegetal aérea, de la densidad de la cobertura en el suelo y de la densidad de las raíces. Almorox (1994).

Además de interceptar la lluvia, la cobertura de plantas disipa la energía del agua de escurrimiento y del viento, produce rugosidad para el flujo y, por lo mismo, reduce su velocidad.

La cobertura de plantas juega un papel determinante en la reducción de la erosión, siempre y cuando cubra una porción grande de la superficie del suelo.

Los bosques son los más efectivos en el control de la erosión, aunque también un pastizal muy denso puede tener la misma efectividad. Para que haya una protección adecuada debe haber, por lo menos, un 70% de cobertura superficial, pero se puede tener una protección razonable con un 40% de cobertura. Shaxon (1981).

La tierra desnuda y arable es la más susceptible a la erosión hídrica y se puede perder grandes cantidades de suelo con una tormenta o durante una estación lluviosa. Kirkby y Morgan (1994).

4.1.5.4. Factores de la erosión relacionados con el suelo

Kirkby y Morgan (1994) describen los diferentes factores de la erosión relacionados con el suelo:

a. Distribución del tamaño de las partículas de suelo

Según Kirkby y Morgan (1994), por lo general los suelos erosionables tienen un bajo contenido de arcilla. No existen suelos erosionables en el grupo de las arenas, y éstas en los suelos erosionables de arena limosa son finas.

Los suelos que contienen más del 30-35% de arcilla son, generalmente coherentes y forman agregados estables de suelos, que son resistentes al impacto de las gotas de lluvia a la erosión por dispersión. Las arcillas, a menudo, son suelos con terrones; sus superficies ásperas almacenan mucha agua y son resistentes a la erosión laminar y por arroyuelos. Las arenas y las arenas limosas de textura gruesa tienen tasas altas de infiltración; si eso se excede, sucede lo mismo con las partículas arenosas de más de 0.3.

b. Agregación del suelo

La proporción de agregados estables acuosos menores de 0.5 mm en un suelo, es un buen índice de erodabilidad; mientras mayor sea la proporción de agregados mayor será la erodabilidad del suelo.

c. Aspereza superficial

Ésta constituye un factor importante, ya que los suelos, entre más áspera sea su superficie, mayor será la cantidad de agua que pueden almacenar.

d. Pedregosidad superficial

Los suelos pedregosos son menos susceptibles a erosión, no solamente porque están protegidos por fragmentos rocosos, sino porque la infiltración aumenta a medida que el agua fluye hacia adentro del suelo alrededor de los bordes de las piedras.

e. Humedad del suelo

Este factor es determinante pues el suelo que ya está húmedo cuando la lluvia cae sobre él alcanzará más rápidamente su tasa de infiltración final.

f. Factores socioeconómicos

USDA (1981), señala que la causa principal de degradación del suelo y de la erosión, se origina en la interferencia indiscriminada de los humanos sobre el balance ecológico natural de los ecosistemas, consistente en abuso y mal manejo del suelo y de los recursos hídricos. Bajo condiciones naturales, los ecosistemas tienden a un equilibrio con la erosión en función de su geología, topografía, suelo y clima, de sus condiciones hidrológicas y de microclima, y de sus comunidades de plantas y animales. En su esfuerzo para alimentarse, el hombre explota los terrenos introduciendo cambios inestables en el ecosistema.

Aunque los productores utilizan el recurso suelo para la producción de plantas, ésta depende de que se mantenga la cantidad y calidad del suelo como un medio para el crecimiento de las raíces. La erosión del suelo reduce esta capacidad a través de cinco efectos:

- a. Pérdida de la capacidad de almacenamiento de agua
- b. Pérdida de los nutrientes aplicados y naturales
- c. Degradación de la estructura del suelo
- d. Remoción no uniforme del suelo
- e. Disminución de la tasa de conversión de los insumos energéticos normales.

4.1.6. Antecedentes de la estimación de pérdidas de suelo por erosión hídrica

Las décadas de los 70's y 80's se caracterizaron por un interés creciente de los investigadores agrícolas sobre el fenómeno de erosión de los suelos bajo cultivo

por el agua. Además de las consecuencias económicas de la erosión del suelo, el fenómeno tiene repercusiones sociales de consideración.

Muchos de los productores no se dan cuenta del problema erosivo al que se enfrentan, en vista de que los avances en tecnología agrícola enmascaran las pérdidas de productividad ocasionadas por la erosión, a través de la entrada masiva de los insumos energéticos a las fincas productivas.

Este no es el caso en zonas con agricultura campesina o de subsistencia, en donde la erosión provoca una continua disminución del potencial productivo del suelo y, por consecuencia, un incremento en la erosión, que ha convertido muchas de estas zonas en áreas sin potencial productivo. Figueroa (1979).

Los esfuerzos para predecir la erosión hídrica se remontan al análisis que realizó Cook (1936) para identificar las variables más importantes que influyen en este fenómeno. La primera ecuación para calcular la pérdida de suelo de un terreno fue en función de la inclinación y longitud de la pendiente, publicada por Zingg (1940). Posteriormente, Smith (1941) añadió a esa ecuación los factores por manejo de cultivo y prácticas de conservación. Browning *et al.* (1947), añadieron los factores de erosionabilidad y manejo del suelo y prepararon tablas para calcular los valores correspondientes a diferentes suelos, rotaciones y longitudes de pendientes.

En 1947, Musgrave publicó una ecuación que incluía factores para lluvia, inclinación y longitud de la pendiente, suelo y cobertura vegetal. Por su parte, Van Doren y Bartelli (1956) propusieron una ecuación de erosión para los suelos y prácticas de cultivo, en Illinois, que predecía la pérdida anual de suelos, en función de nueve factores. El factor suelo se obtenía de mediciones hechas en lotes de escurrimiento que se ajustaban por condiciones específicas de sitio obtenidas de investigaciones anteriores. Figueroa (1979).

En 1948, Smith y Whitt presentaron una ecuación para estimar la erosión, a la cual denominaron “racional”: $A = C * S * L * K * P$. El factor C era la pérdida promedio anual de suelo para un suelo arcilloso con una rotación, longitud e inclinación de la pendiente y dirección de surcado; dados los otros factores: por pendiente (S), longitud (L), tipo de suelo (K) y prácticas de conservación (P) eran multiplicadores adimensionales para ajustar el valor de C a otras condiciones.

El Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (ARS) estableció en 1954 el Centro Nacional para Colecta de Datos de Escurrimiento y Erosión en la Universidad de Purdue. Como resultado de las caridades de este Centro, en 1965, Wischmeier y Smith desarrollaron la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), la cual cuantifica la erosión a través del producto de seis factores que

representan la erosividad de la lluvia y la escorrentía (R), la erosionabilidad del suelo (K), el grado de la pendiente (S), la inclinación de la pendiente (L), las prácticas de manejo de cultivo (C) y las prácticas de conservación de suelos (P).

La USLE fue diseñada como una herramienta de trabajo de los conservacionistas. Se buscaba, en esta ecuación, que cada factor pudiera representarse por un solo número, que fuera predicho utilizando datos meteorológicos, de suelos o de investigación en erosión locales, y que no tuviera restricciones geográficas. Sin embargo, el uso de la misma (ecuación) se debe limitar a aquellos casos en los que se pueden evaluar en forma precisa los factores, y en los que las condiciones para su aplicación sean realistas.

Desde la publicación de la ecuación a la que se ha venido haciendo referencia, se efectuaron varias revisiones y se incorporaron en la versión publicada en 1978, como Manual Agrícola 537 del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Wischmeier y Smith, 1978).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), es una ecuación empírica muy conocida desarrollada para campos o parcelas con una capacidad limitada de desprendimiento, con curvatura muy moderada y sin rastros de deposición. Representa la pérdida promedio de suelo sobre un período de tiempo y en un área total. La ecuación tiene la siguiente forma (Wischmeier y Smith, 1987; Renard *et al.*, 1997; Lu, H *et al.*, 2001 y Mati, *et al.*, 2000 citados por Saavedra (2003): $E_r = R * K * LS_r * C * P$; donde: $E(r)$ [t/ha] es el promedio de pérdida de suelos, R [M].mm/ha.br es el factor de intensidad de lluvia (erosividad), K [t/ha por unidad de R] es el factor de erodabilidad del suelo, $LS(r)$ [adimensional] es el factor topográfico (longitud – pendiente), C [adimensional] es el factor de cobertura y P [adimensional] es el factor de conservación del suelo y de prácticas de prevención.

4.1.7. Metodología de estimación de la erosión hídrica propuesta por Almorox. (1994).

Esta metodología se basa en la propuesta por Almorox (1994), la cual a su vez, está basada en el principio que la erosión es más activa que la meteorización, lo que provoca la desaparición de los horizontes superficiales del perfil en la parte alta de las laderas y su acumulación, al menos parcialmente, en su base. Lineros (1999). Para dicha metodología se determina la Erosión Potencial –EP- y el Riesgo de Erosión –RE-, basados en los siguientes factores:

$$\mathbf{EP} = \mathbf{IES} * \mathbf{IEC}$$

$$\mathbf{RE} = \mathbf{EP} * \mathbf{ICV}$$

Donde:

IES = Índice de Erosionabilidad del Suelo

IEC = Índice de la Erosividad Climática

ICV = Índice de Cobertura Vegetal

4.1.7.1. Índice de erosionabilidad del suelo (IES)

El índice de erosionabilidad del suelo está determinado a partir de la evaluación de la textura, la pedregosidad, la profundidad, la capacidad de uso de la tierra y el porcentaje de pendiente del terreno.

IES = Índice de Textura del Suelo* Índice de Profundidad del Suelo* Índice de Capacidad de Uso de la Tierra * Índice de erosión por pendientes.

4.1.7.2. Índice de la erosividad climática (IEC)

Este factor está dado por la determinación del índice de Fournier (IF).

$$\mathbf{IEC} = \mathbf{IF}$$

4.1.7.3. Índice de cobertura vegetal (ICV)

Para la elaboración del índice se determinan las zonas más susceptibles a erosión con base en el uso actual del suelo y en la cobertura de copa de las áreas boscosas.

4.1.7.4. Estimación del riesgo de erosión (RE)

Dicho riesgo se estima por medio de la relación matemática propuesta por Almorox (1994).

$$\mathbf{RE} = \mathbf{EP} * \mathbf{ICV}$$

4.1.8. Metodología LEAM para determinar la erosión del suelo (Land Erodibility Assessment Methodology, LEAM)

El método LEAM es empleado para estimaciones de riesgo potencial de erosión combinando la taxonomía de suelos; los datos obtenidos por medio de LEAM,

proveen información básica para varios tipos de suelo, particularmente en cuanto al riesgo de erosión específico para cada uno, así como las limitaciones asociadas con cada caso. Manrique (1991).

Esta metodología, utilizada por Motta (1999), define las categorías de riesgo de erosión dentro de términos cuantitativos y operacionales y se fundamenta en los siguientes factores:

- a. Factor topográfico o de pendiente
- b. Riesgo de erosividad de la lluvia
- c. Erodabilidad del suelo.

4.1.8.1. Factor topográfico o de pendiente

El factor topográfico o de pendiente, en el sistema LEAM, usa la fórmula de (McCool) citada por Almorox (1994), que es la misma que utiliza el sistema USLE; tomando en cuenta los valores de LS, se subdivide en subclases de pendiente.

4.1.8.2. Erosividad de la lluvia

Para el cálculo de la erosividad de las lluvias, la metodología LEAM aplica el índice modificado de Fournier (IF).

4.1.8.3. Erodabilidad de suelo

El cálculo de la erodabilidad del suelo, según la metodología LEAM se basa en el nomograma de Wischmeier y los valores de K, los cuales cataloga en clases de erodabilidad.

4.1.8.4. Forma de establecer el método

El método LEAM es simple: está arreglado en dos categorías: clase y subclase. La clase indica el grado de riesgo potencial de erosión, en tanto que la subclase, las limitaciones de cada clase.

4.1.9. Ecuación universal de pérdida de suelo USLE “Universal Soil Loss Equation”

En el método USLE, las pérdidas de suelo **A** (en t/ha/año expresadas en el Sistema Internacional) se identifican así:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde:

R es un índice de erosión pluvial,

K un factor de erodabilidad del suelo,

L el factor longitud de pendiente (ladera de máxima pendiente),

S un factor pendiente,

C un factor de cultivo y

P un factor prácticas de cultivo.

La USLE es un modelo paramétrico totalmente empírico y su bondad depende del rigor con que los cinco multiplicandos que componen la ecuación reproduzcan las condiciones del medio. Almorox (1994).

4.1.10. Definición y funciones de los sistemas de información geográfica SIG

Un sistema de Información Geográfica, SIG “*Geographical Information System, GIS*”, es una base de datos computarizada que contiene información espacialmente referenciada. También se puede definir como un sistema georeferenciado para la adquisición, almacenamiento, búsqueda y manipulación de dato (Star 1984). La NCGIA (1990) (Nacional Center for Geographic Information and Analyst) define el SIG como sistema de hardware y software, con procedimientos elaborados para facilitar la obtención, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión. Por su parte, ESRI (2001) lo define como una herramienta de software que permite almacenar, recuperar, analizar y desplegar información geográfica; está compuesto por los siguientes elementos: a) Hardware, b) Software, c) Dato, d) Personal Técnico, y e) Métodos de análisis.

Un SIG se diferencia de la cartografía asistida por ordenador y de los programas de gestión de base de datos, por la capacidad del SIG de generar nueva información a partir de un conjunto previo de datos mediante su manipulación, reelaboración y análisis. Frente a un sistema de diseño asistido (CAD/CAM), un SIG es capaz de relacionar elementos gráficos (puntos, líneas, polígonos) con los elementos de una base de datos temática. Almorox (1994).

4.1.10.1. Modelos de datos y tipos de SIG

Existen varios modelos de datos respecto de los objetos geográficos; en mapas o planos formados por puntos, líneas y polígonos se utilizan, fundamentalmente, dos aproximaciones: el modelo *“vectorial”* y el modelo *“reticulado”*, también denominado *“raster”*. Los mapas tridimensionales o de volúmenes tienen sus propios modelos de datos, clasificados según utilicen como elementos básicos: puntos, líneas o funciones matemáticas. Figura 2.

Un modelo vectorial representa los objetos espaciales codificando sus fronteras. Las líneas que actúan como límites están constituidas por segmentos rectos y se establecen mediante las coordenadas de los puntos o vértices de los mismos. En un modelo de datos *raster* no se codifican las fronteras de los objetos, sino que se registra su interior, quedando sus límites implícitamente representados. De Antonio (1994).

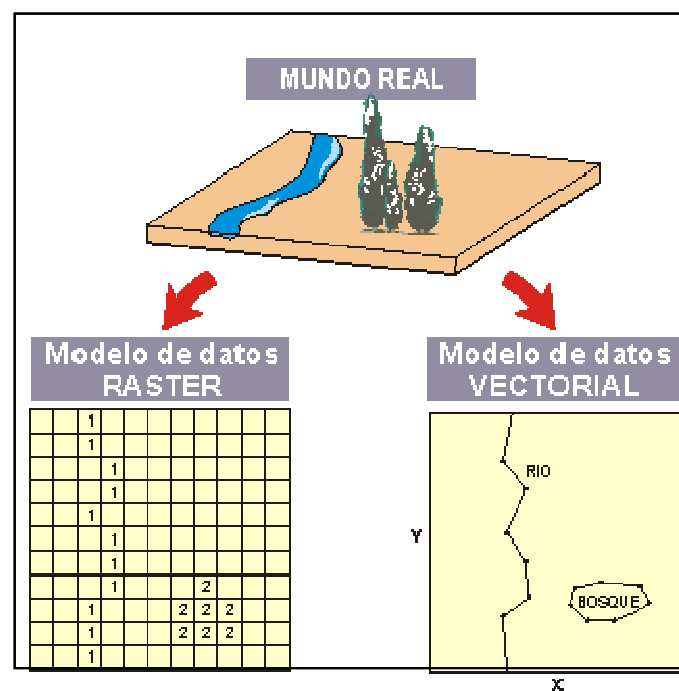


Figura 2. Modelos de datos de un SIG

4.1.11. Aplicación de los SIG en la determinación de la erosión hídrica

De Antonio (1994) indica que el empleo de los modelos de erosión con los sistemas de Información Geográfica permite estudiar las variaciones temporales de los modelos erosivos, analizar y mantener actualizada la gran cantidad de información requerida, normalizar y comparar las metodologías, obtener

representaciones gráficas y servir de punto de partida para la realización de estudios hidrológicos y de planificación, logrando lo siguiente:

- a. La creación de bases de datos con la información precisa para la aplicación de los modelos de erosión.
- b. La obtención de los parámetros que intervienen en cada modelo.
- c. La determinación de la erosión hídrica y la cualificación de los resultados de ésta.
- d. El cálculo de las superficies afectadas, según grados de erosión.

4.1.12. Concepto de riesgo

Es la estimación matemática de probables pérdidas, de daños a los bienes materiales, a la economía, para un periodo específico y área determinada. Ante un fenómeno natural es el número esperado de pérdidas humanas, personas heridas, propiedades dañadas e interrupción de actividades económicas para un área dada y un periodo de referencia. FAO 2005.

En términos matemáticos, el riesgo es el producto de peligro y vulnerabilidad

RIESGO = PELIGRO X VULNERABILIDAD

Conceptualmente, es el nivel probable de daño que sufriría un elemento expuesto ante el impacto de un peligro potencial en un área dada y un periodo de exposición determinado. En la Microcuenca se ha zonificado el riesgo teniendo en cuenta la ocupación del territorio donde los daños económicos pueden ser desde muy altos hasta bajos. FAO 2005.

4.2. Marco Referencial

4.2.1. Localización

El presente estudio se realizó en la parte alta cuenca del río Achiguate, correspondiente a la microcuenca del río Negro. El 66% de la superficie de la cuenca se ubica en el municipio de San Andrés Itzapa y el 34% en el municipio de Parramos, ambos del departamento de Chimaltenango; la cuenca limita al norte con la cabecera departamental de Chimaltenango, al sureste con el municipio de Parramos, al oeste con el Cerro Las Minas, la montaña El Soco, la finca Santa Rosa y el caserío El Ciprés. (Aguilar Marroquín, S.D., 198;. Instituto Geográfico Militar, 1984).

La microcuenca del río Negro se encuentra comprendida entre los meridianos - 90°48' y 90°52' de longitud oeste, y los paralelos 14°35' y 14°37' de latitud norte (Instituto Geográfico Nacional. Figura 4).

4.2.2. Clima y zonas de vida

Según datos de la estación climática de Chicazanga, ubicada en la aldea del mismo nombre, perteneciente al municipio de San Andrés Itzapa. La precipitación media anual de la microcuenca es de 1309.6mm, del cual se estima un volumen total precipitado anualmente de 27, 869,642 m³ para toda la cuenca. La temperatura media anual registrada es de 15.39 °C. La temperatura máxima promedio, de 22.81 °C, y la mínima promedio, de 12.36°C. En la Figura 3 se presenta el Climadiagrama de la estación Chicazanga.

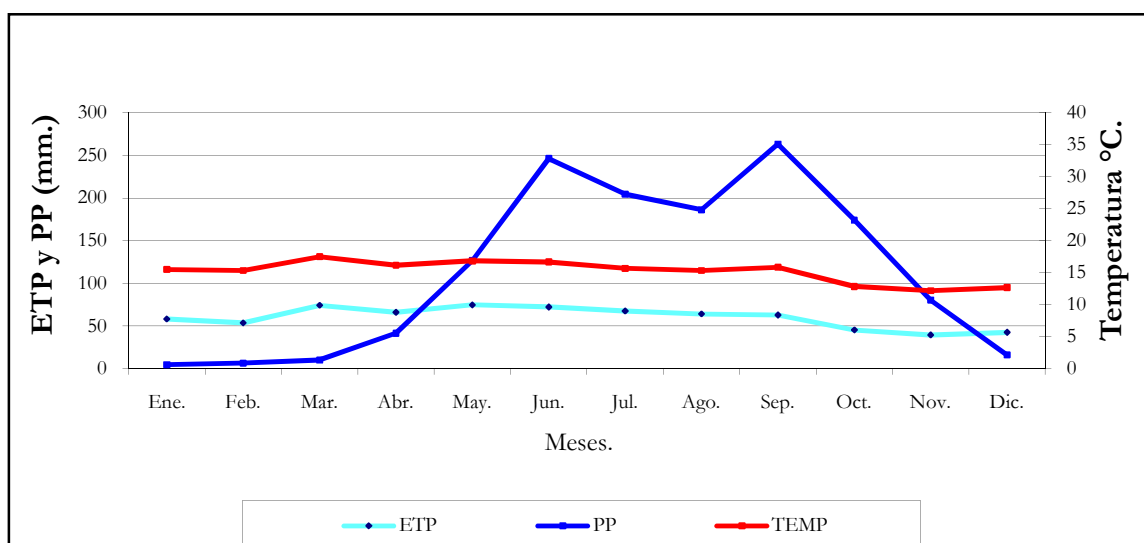


Figura 3. Climadiagrama de la estación Chicazanga

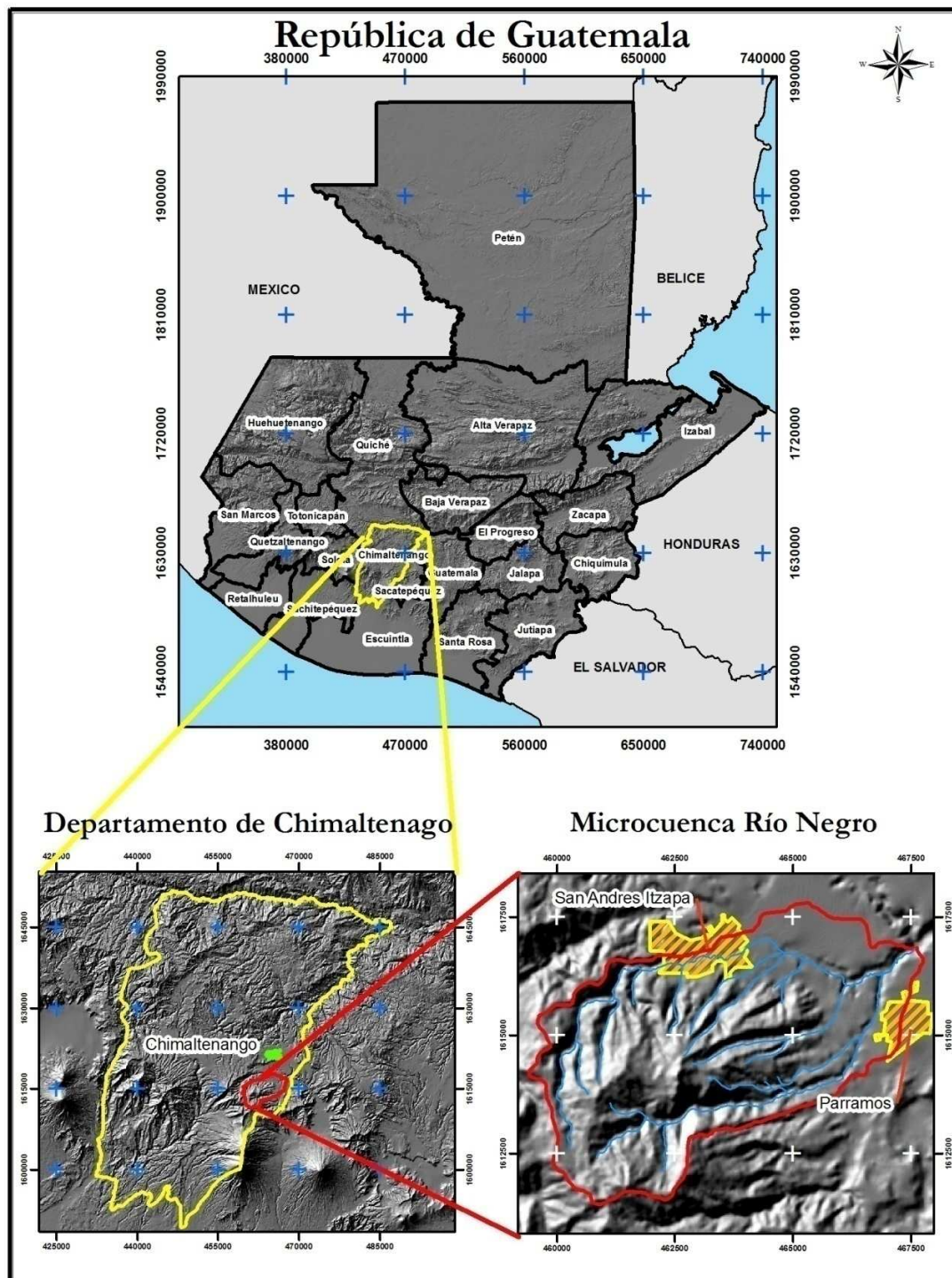


Figura 4. Mapa de Ubicación de la microcuenca del río Negro en los niveles nacional, departamental y municipal

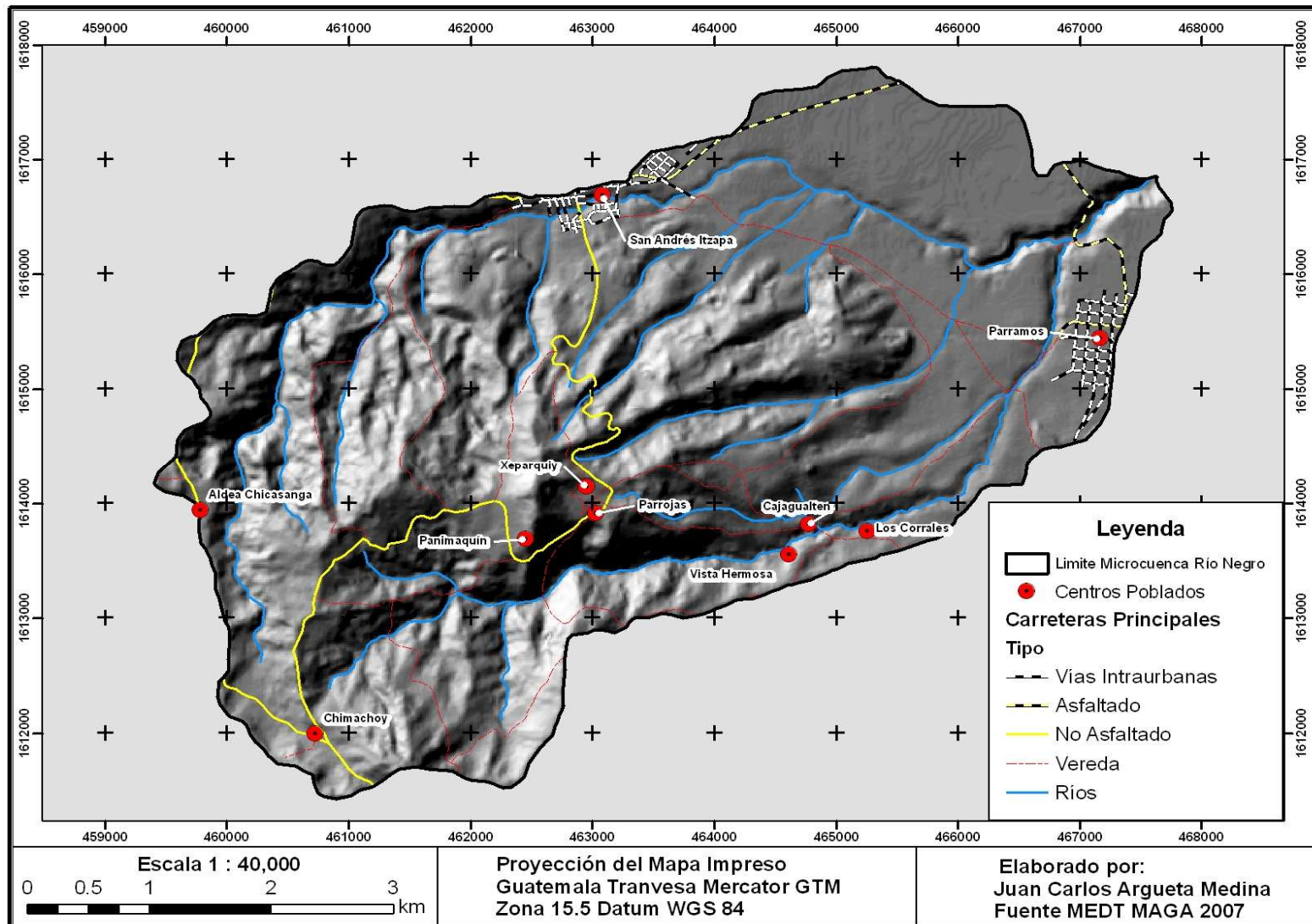


Figura 5. Mapa de la microcuenca del río Negro

De acuerdo con el sistema de clasificación de zonas de vida, de Holdridge, en la microcuenca se ubican las zonas de vida denominadas: Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical (bh-MB) y Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical (bmh-MB) MAGA (2002).

Las especies indicadoras que se pueden encontrar en la microcuenca son: para el Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical (bh-MB): *Quercus* sp., asociados generalmente con *Pinus pseudostobus* y *Pinus montezumae*, Uspantán *Juniperus comitan* en forma de individuos aislados; *Alnus jorullensis*, *Ostrya* sp. y *Carpinus*. Para Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical (bmh-MB): *Cupressus lisitanica*, *Chiranthodendron pentadactylon*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus hartwegii*. MAGA (2002).

En la primera zona de vida (bosque húmedo montano bajo subtropical) la topografía en general es plana y está dedicada a cultivos agrícolas. Sin embargo, las áreas accidentadas están cubiertas por vegetación. La elevación varía entre 1500 y 2400 msnm, en San Juan Ostuncalco. MAGA (2001).

La segunda, presenta una precipitación total anual que va de 2065 y 3900 mm, promediando 2730 mm. Las biotemperaturas van de 12.5 a 18.6 grados C. La topografía generalmente es accidentada, sobre todo en las laderas de los volcanes. La elevación va de 1800 a 3000 msnm en la cordillera de los Cuchumatanes. MAGA (2001).

En cuanto a su elevación, la micocuenca está comprendida desde los 1670 a los 2600 msnm.

4.2.3. Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica de suelos está basada en la presencia o ausencia de características denominadas “de diagnóstico”, las cuales coadyuvan a la determinación de la clasificación en sus diferentes taxas. Así, según la clasificación taxonómica, en el área de estudio se encuentran tres órdenes de suelos: Andisoles, Entisoles e Inceptisoles.

4.2.3.1. Andisoles

Éstos son suelos desarrollados sobre ceniza volcánica, que tienen baja densidad aparente (menor de 0.9 g/cc) y con altos contenidos de alófono. Generalmente, son suelos con alto potencial de fertilidad y adecuadas características físicas para su manejo. No obstante, por sus mismas características y las posiciones que, en algunos casos, ocupan en el relieve, tienden a erosionarse con facilidad. En el área de estudio se encontraron los siguientes subórdenes: a) Udands; Andisoles

que no están secos en su interior, por más de 90 días en el año. Tienen un adecuado contenido de humedad la mayor parte del año. b) Ustands; Andisoles que están secos entre 90 y 180 días del año, en su interior; presentan deficiencia de humedad. c) Vitrand; son suelos con alto contenido de vidrio volcánico, lo que hace que tengan texturas gruesas (arenosas) y una baja retención de agua. MAGA (2001).

4.2.3.2. Entisoles

Suelos con poca o ninguna evidencia de desarrollo de su perfil y, por consiguiente, de los horizontes genéticos. El poco desarrollo es debido a condiciones extremas, tales como: el relieve (el cual incide en la erosión o, en su defecto, en la deposición superficial de materiales minerales y orgánicos) y, por otro lado, las condiciones como el exceso de agua. De acuerdo con el relieve, estos suelos están presentes en áreas muy accidentadas (climas de montañas y volcanes) o en partes planas; en la microcuenca del Río Negro se encontraron los Psamments, que son los Entisoles más arenosos, localizados en superficies poco inclinadas y con menos del 35% de fragmentos rocosos. Generalmente, se encuentran en las áreas más cercanas a los ríos o en áreas de actividad volcánica muy reciente. A diferencia de los Fluvents, los Psamments no tienen capas deposicionales de materiales minerales en su interior. En muchas áreas, los Psamments están cubiertos con bosque de galería, y en otros casos están cultivados y forman parte de lo que los agricultores llaman “los suelos de vega”. MAGA (2001).

4.2.3.3. Inceptisoles

Éstos son suelos incipientes o jóvenes, sin evidencia de fuerte desarrollo de sus horizontes, pero son más desarrollados que los entisoles. Son suelos muy abundantes en diferentes condiciones de clima y materiales originarios. Los subórdenes encontrados en el área de estudio son: a) Udepts; inceptisoles que no están secos en su interior por más de 90 días; tienen un adecuado contenido de humedad la mayor parte del año. b) Usteps; son inceptisoles que están secos entre 90 y 180 días del año, en su interior; presentan deficiencia de humedad.

4.2.4. Clases de suelos

Los suelos dentro de la cuenca abarcan las siguientes series:

Suelos Tecpán: se caracterizan por ceniza volcánica de color claro como material madre, con un relieve casi plano a ondulado; poseen un buen drenaje interno. El suelo superficial es de color café oscuro, con una textura y consistencia franco arcillosa friable y un espesor aproximado de 30 a 50 cm. El subsuelo es de color café amarillento, de consistencia friable y textura franco arcillosa, con un espesor aproximado de 50 a 100 cm. Simmons (1977).

Suelos Patzicía: caracterizados por ceniza volcánica pomácea de color claro como material madre, con relieve inclinado y drenaje interno bueno. Suelo superficial café oscuro, textura y consistencia franco arcillosa suelta y de 25 a 40 cm. de espesor. El subsuelo se identifica por ser de color café, de consistencia suelta a friable y de textura franco arenosa, con un espesor aproximadamente de 40 a 60 cm. Simmons (1977).

Suelos Alotenango: éstos se caracterizan por tener un material madre constituido por ceniza volcánica máfica de color oscuro. Son de relieve inclinado a muy inclinado, con un drenaje excesivo. El suelo superficial es de color café oscuro a café muy oscuro, de textura y consistencia franca suelta de un espesor aproximado de 25 a 40 c. El subsuelo es de color café grisáceo oscuro y la consistencia suelta, su textura es franco arenosa y presenta un espesor aproximado de 40 a 50 cm. Simmons (1977).

4.2.5. Geología y geomorfología

Dentro de la microcuenca, la geología es superficial predominante, con rocas ígneas, que se encuentra divididas en dos clases: a) Tv, que corresponde al período terciario y cuyas características son rocas volcánicas sin dividir, predominantemente Mio-Plioceno. Incluye tobas, coladas de lava material lahárico y sedimentos volcánicos. b) Qp, del período cuaternario; sus características principales son los rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso. MAGA (2002).

La microcuenca se encuentra dentro de la región fisiográfica de las Tierras Altas Volcánicas, diferenciando en ella dos subpaisajes, que son: a) Montaña volcánica del centro del país; b) Valle tectónico de Chimaltenango, cuya edad geológica abarca de finales del terciario hasta el cuaternario; el drenaje característico es dendrítico subparalelo y el material geológico predominante lo constituyen las rocas volcánicas.

4.2.6. Hidrología e hidrografía

La microcuenca del río Negro es drenada superficialmente por la vertiente de varios ríos pero dentro de los principales están: el propio río Negro, Chirijuyú, Cajagualtén, Panaj, Aqueya, cuyos caudales, en las partes alta y baja, son en promedio $0.0045 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.205 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.2.7. Uso de la tierra

El uso de la tierra dentro de la cuenca se encuentra distribuido de la siguiente manera: un 42% de la cuenca posee cobertura forestal, entre coníferas, latifoliadas, bosques mixtos y secundarios; 53% se utiliza para agricultura, incluyendo un 18% de área destinado para el cultivo del café; finalmente, un 5% es área urbana. MAGA (2002).

4.2.8. Características socioeconómicas

De acuerdo con el XI Censo de Población y VI de Habitación, efectuado por el Instituto Nacional de Estadística -INE- en el año 2002, la población que se encuentra en la microcuenca del río Negro es de aproximadamente 18,595 habitantes, distribuida en los municipios de San Andrés Itzapa y Parramos, del departamento de Chimaltenango.

El idioma predominante en el área de estudio es el kaqchikel; sin embargo, existe una mezcla entre el kaqchikel y el español. Aguilar (1987).

El cuadro promedio de las familias de la microcuenca es de seis miembros (2 padres y 4 hijos) y en los casos extremos con un mínimo de uno y máximo de once hijos por familia. Sin embargo, la moda de la población en el área rural se presenta como una familia de cinco miembros, mientras que en el área urbana es de cuatro (2 padres y 2 hijos).

La Secretaría General de Planificación de la Presidencia (SEGEPLAN) ubica a los municipios de San Andrés Itzapa y Parramos en el rango de baja pobreza extrema, alrededor de 7.22% y 9.34% respectivamente. Asimismo, están catalogados con una alta vulnerabilidad a la inseguridad alimentaria. MAGA (2002).

El Plan de Manejo de la Subcuenca del Río Pensativo-Alto Guacalate, Guatemala, publicado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), señala que la mayoría de la población de esta área se ubica en grupos etáreos en edad económicamente activa, lo que representa una riqueza de

perspectiva de fuerza de trabajo, tanto físico como intelectual, para el futuro del país. En contra posición a ello, hay un crecimiento poblacional (tasa de 2.4%) que no va acorde con el manejo de los recursos naturales y de algunos satisfactores principales de la sociedad, como el empleo, vivienda, educación y otros, manifestándose en la pérdida de cobertura boscosa, fertilidad del suelo, disminución del suelo como espacio habitacional con los servicios básicos. PCEG (2000).

Entre de los servicios que se prestan en la subcuenca, figuran los aspectos de educación, salud (prioritarios para el desarrollo) vivienda, agua potable, drenaje, energía eléctrica y telefonía.

En el mismo estudio del MAGA se presenta una encuesta referente a las principales fuentes de agua en la subcuenca, y, según los resultados, el 57.4% de los entrevistados considera que provienen de pozos, mientras el 40%, de nacimientos, y el 2.6%, de ríos; este último porcentaje es bajo, debido a la contaminación de los ríos.

Esta es la opinión de las personas encuestadas en cuanto a si es suficiente la cantidad de agua: el 57% considera que el agua disponible es suficiente para el consumo familiar, en tanto que el 38% indica que esa misma cantidad alcanza también para riego.

El problema de la tenencia de tierra en la microcuenca es de tipo estructural, común a la historia agraria nacional. Los asentamientos agrarios se definen como micro parcelamientos, lotificaciones, comunidades agrarias, patrimonios familiares, mixtos y patrimonios agrarios colectivos.

En el área de estudio, la tenencia de la tierra se da en tres formas: privada, comunal y estatal. Prevalecen las condiciones de latifundio y minifundio, tal como en el ámbito nacional, situación que pone de manifiesto que las grandes fincas con mejores tierras cultivables se encuentran en pocas manos.

5 OBJETIVOS

5.1. General

5.1.1. Estimar los riesgos y/o niveles de erosión hídrica de los suelos en la microcuenca del río Negro.

5.2. Específicos

5.2.1. Estimar el riesgo erosión, en la microcuenca del río Negro, según los índices que intervienen en cada riesgo, planteados por Almorox (1994).

5.2.2. Calcular el riesgo a erosión en la microcuenca del río Negro mediante la utilización de la metodología Land Erodibility Assessment Methodology, LEAM.

5.2.3. Estimar la pérdida de suelo, utilizando la ecuación universal de pérdidas de suelo USLE (Universal Soil Loss Equation).

5.2.4. Realizar un análisis de similitud entre las metodologías en estudio (Almorox, LEAM, USLE).

6. METODOLOGÍA

La investigación realizada utilizó tres metodologías para la estimación de los riesgos y/o niveles de erosión hídrica, siendo las siguientes:

- a. Metodología de Estimación de la Erosión Hídrica propuesta por Almorox, en la cual los riesgos se definen de un conjunto de parámetros de estimación, los que se relacionan entre sí a través de ecuaciones matemáticas de primer orden. Cada parámetro de estimación posee un índice numérico que representa la agresividad de la variable con respecto a la erosión hídrica; con esta metodología se estimarán las áreas con mayor riesgo a erosión dentro de la microcuenca.
- b. Metodología de Evaluación de la Erosión del Suelo (LEAM). Esta cuantifica la erosión a través del producto de 6 factores que representan la erosividad de la lluvia y la escorrentía (R), la erosionabilidad del suelo (K), la longitud de la pendiente (L), el grado de la pendiente (S), las prácticas de manejo de cultivo (C) y las prácticas de conservación de suelos (P) .
- c. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE (Universal Soil Loss Equation). Es utilizada para estimaciones de riesgo potencial de erosión combinando unidades de referencia de suelos con las pendientes y la precipitación; los datos obtenidos por medio de LEAM, proveen información básica para varios tipos de suelo y proporcionan datos respecto de un riesgo de erosión específico para cada uno.

El desarrollo de los diferentes análisis y la determinación de cada una de las variables que incluye cada metodología se realizaron en formato digital recurriendo a las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica SIG, así como diferentes técnicas aplicadas a los sensores remotos, utilizando los siguientes programas; ArcGIS 9.2, ArcView 3.2, Erdas Imagine 8.7, ENVI 3.6.

6.1 Fase preliminar

La fase preliminar de la investigación fue imprescindible (como paso previo) para planificar las distintas actividades tendientes a la determinar las variables necesarias para cada una de las metodologías. La misma consistió en lo siguiente:

6.1.1. Delimitación de la cuenca

Con base en el Modelo de Elevación Digital con resolución de pixel de 15 m., derivado de la fotografía aérea generada por el laboratorio de sistemas de información geográfica del MAGA, utilizando la extensión “Spatial Analyst tools” y aplicando la herramienta “Hydrology”, se determinaron las direcciones y acumulaciones de flujo para delimitar la microcuenca, la cual posee un área de 30.83 Km². Figura 5.

6.1.2. Clasificación fisiográfica del terreno

El análisis fisiográfico se realizó mediante un método de clasificación sistemático, con la interpretación de imágenes del área de estudio, que se caracterizó por establecer una clasificación que integró los aspectos de las formaciones fisiográficas, tomando aspectos como: condiciones climáticas, uso de la tierra, rasgos erosionales, geología, sedimentología, litología (con énfasis en el material parental de los suelos), hidrología como el patrón de drenaje y la condición de humedad de los suelos, aspectos de ambientes locales. Tomando éstos aspectos, se procedió a efectuar el análisis de las fotografías aéreas, teniendo como resaltado el cuadro 1.

Cuadro 1. Unidades fisiográficas, microcuenca río Negro, 2007

Unidades Fisiográficas	Área Km ²	Porcentaje de Área
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	4.13	13.4
Cresta o Etribaciones Erosionadas	4.33	14.05
Meseta de Pie de Monte (Coladas)	5.76	18.68
Pie de Monte	3.11	10.09
Cerro Testigo	1.35	4.38
Edificios Volcánicos Erosionados Antiguos (Terciarios)	0.74	2.4
Ladera Erosionada	11.41	37.01

Tomando como base al análisis territorial con enfoque paisajístico realizado, se determinó el número de muestras necesarias para la obtención de los datos edáficos precisos en cada una de las metodologías. Figura 6.

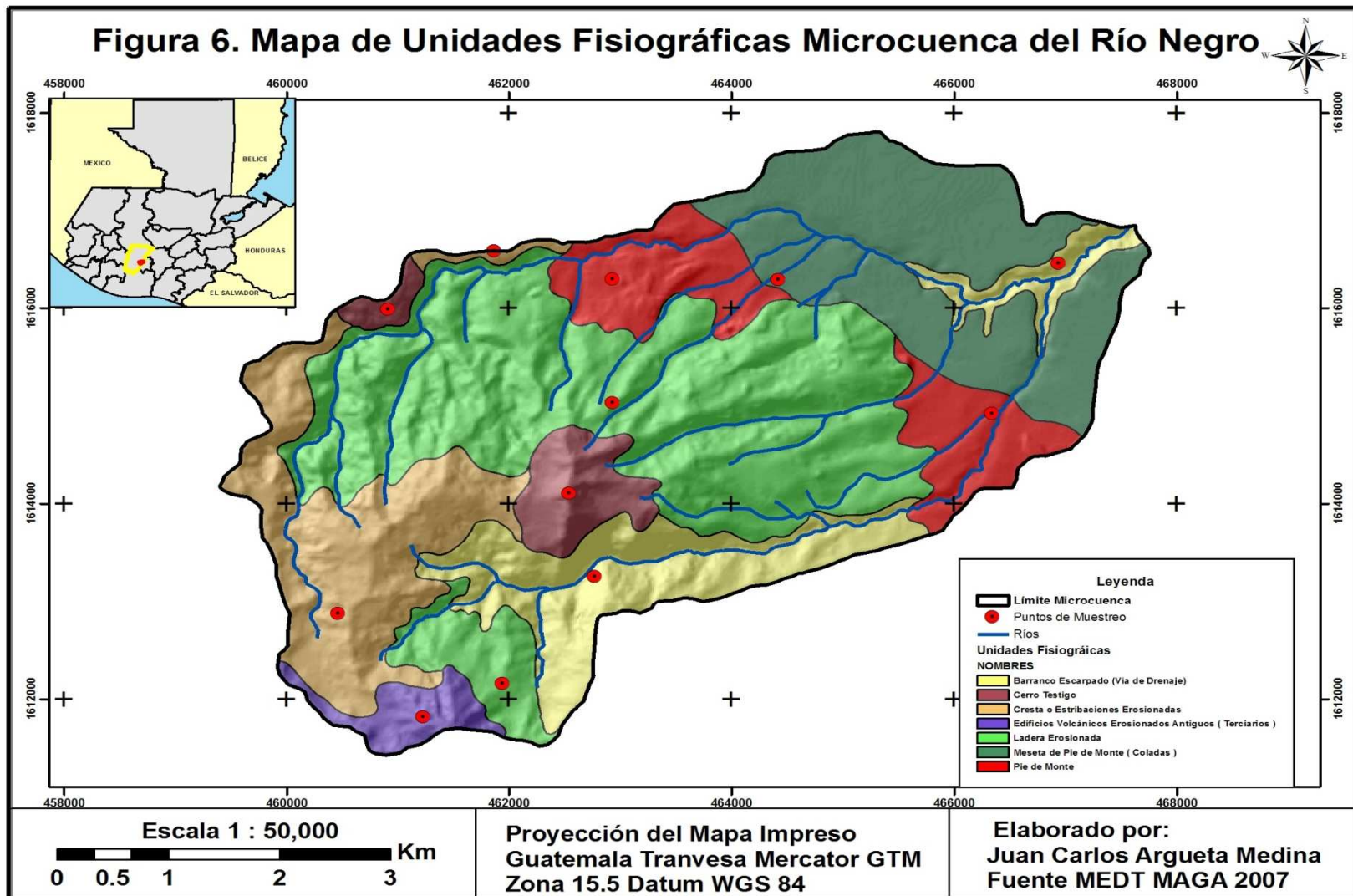


Figura 6. Mapa Unidades Fisiográficas Microcuenca del río Negro, Chimaltenango, 2007.

6.2. Metodología de estimación de la erosión hídrica propuesta por Almorox

6.2.1. Índice de erosionabilidad del suelo (IES)

El índice de erosionabilidad del suelo se determinó a partir de la evaluación de la textura, profundidad, la capacidad de uso de la tierra y pendientes. Figura 7.

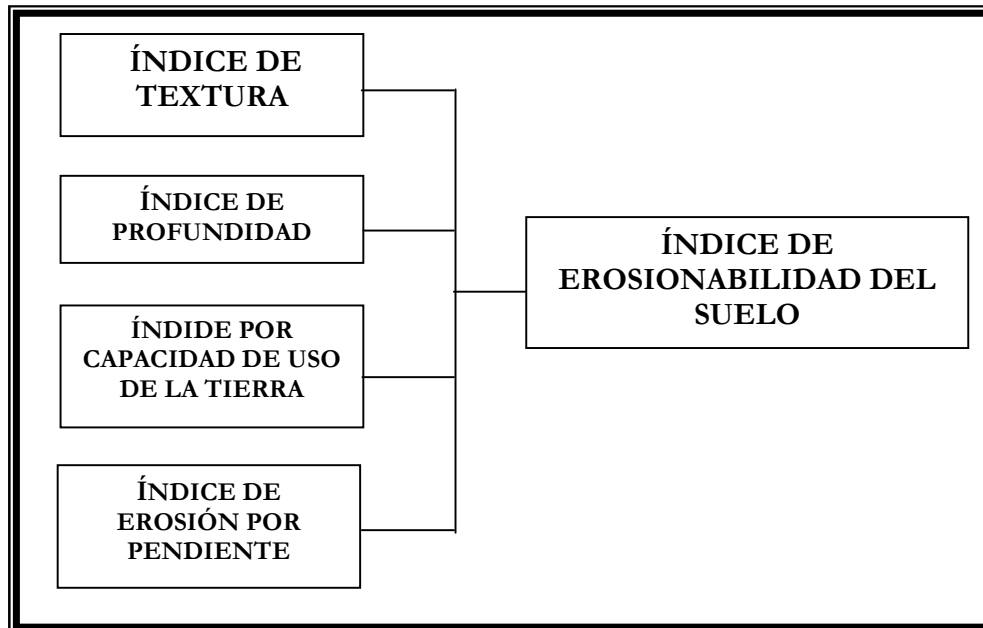


Figura 7. Cálculo del índice de erosionabilidad del suelo

6.2.1.1. Índice de Textura del Suelo

El tamaño relativo de las partículas de suelo se expresa en el término *textura*, que se refiere a la finura mayor o menor del suelo. De manera más específica, *textura es la proporción relativa de arena, limo y arcilla*. Hernández (7). Los triángulos de textura están basados en el triángulo textural del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA). Almorox (1), basado en el diagrama de USDA, se plantea la siguiente agrupación del índice de textura en el cuadro 1, asignando el valor 1 a aquellas texturas consideradas como muy finas y finas. El Valor 2, a las texturas moderadamente finas, gruesas y muy gruesas. Finalmente, el valor 3, a texturas medianas y moderadamente gruesas. Cuadro 2.

Cuadro 2. Índice de erosionabilidad según textura del suelo

ÍNDICE	CATEGORÍA	TEXTURAS
1	Baja	Arcillosa, arcillo-arenosa y arcillo-limosa
2	Media	Franco-arcillo-arenosa, franco-arcillosa, Franco-arcillo-limosa, arenosa y arenoso-franca
3	Alta	Franco-arenosa, franca, franco-limosa y limosa y arenosa

Fuente: Hernández (1999)

6.2.1.2. Índice de Profundidad del Suelo

Almorox (1) define la profundidad del suelo como la distancia entre la superficie y la base del perfil, y se establece una clasificación con relación a la erosionabilidad. Cuadro 3.

Cuadro 3. Índice de erosionabilidad según profundidad del suelo

ÍNDICE	CATEGORÍA	PROFUNDIDAD (cm)
1	Baja	Mayor a 75
2	Media	25 - 75
3	Alta	Menor a 25

Fuente: Hernández (1999)

6.2.1.3. Índice de Capacidad de Uso de la Tierra (Metodología USDA)

MAGA (2001) señala que la clasificación de los suelos, según su capacidad de uso, es un ordenamiento sistemático de carácter práctico e interpretativo, fundamentado en la aptitud natural que presenta el suelo para producir constantemente bajo tratamiento continuo y usos específicos. Este ordenamiento proporciona una información básica que muestra la problemática de los suelos bajo los aspectos de limitaciones de uso, necesidades y prácticas de manejo que requieren, y, también, suministra elementos de juicio necesarios para la formulación y programación de planes integrales de desarrollo agrícola.

Para la determinación de la Capacidad de Uso de la Tierra se utilizó la metodología USDA reagrupando las clases de acuerdo con el ordenamiento propuesto por Lineros (1999). Cuadro 4.

Cuadro 4. Índice de erosionabilidad según capacidad de uso de la tierra

ÍNDICE	CATEGORÍA	CLASE DE CAPACIDAD DE USO DE LA TIERRA
1	Baja	I, II, V
2	Media	III, IV
3	Alta	VI, VII, VIII

Fuente: Lineros (1999)

6.2.1.4. Índice de erosión por pendientes

La determinación del mapa de pendientes se efectuó de forma digital utilizando los SIG; se utilizó, específicamente, el software ArcGIS 9.2 en el Modelo de Elevación Digital del Terreno con resolución de pixel de 15m, del cual se derivan las pendientes mediante la herramienta *derive slope*, de la herramienta Surface Analysis de la extensión 3D Analyst. El resultado se clasificó agrupándolo a través de los rangos propuestos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA). Cuadro 5.

Cuadro 5. Agrupación de pendientes según USDA

CLASE	RANGO	CATEGORIA
1	0 - 4 %	Baja
2	4 - 8 %	Media
3	8 - 16 %	Media
4	16 - 32 %	Alta
5	Mayor a 32%	Alta

Fuente: Hernández (1999)

6.2.1.5. cálculo del Índice de erosionabilidad del Suelo –IES-

Almorox (1) explica este índice como una ecuación matemática estática mediante el producto de los diferentes índices, el producto de los índices se determinó a través de un análisis espacial con SIG, aplicando la siguiente ecuación:

IES = Índice de Textura del Suelo* Índice de Profundidad del Suelo* Índice de Capacidad de Uso de la Tierra * Índice de Erosión por pendientes.

6.2.2. Índice de la erosividad climática -IEC-

Se entiende por erosividad de la lluvia, la capacidad de la misma para provocar erosión. Se trata de un parámetro de gran peso en la evaluación de las pérdidas de suelo.

Este índice se calculó a partir del Índice de Fournier; los parámetros representativos de precipitaciones los muestra la Figura 8.

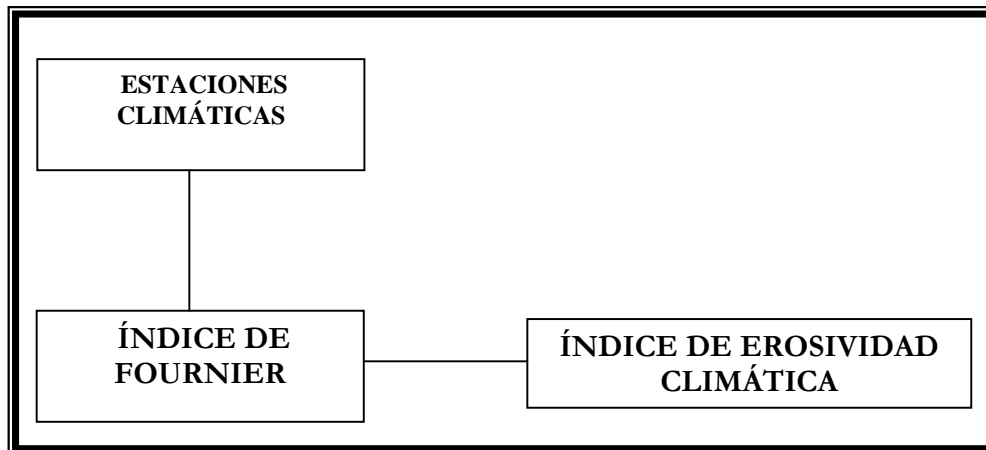


Figura 8. Cálculo del índice de erosividad climática

6.2.2.1. Índice de Fournier (IF)

Es índice de agresividad climática o de Fournier (1960); dicho índice pretende representar la potencia erosiva del clima, considerado sólo el efecto de las precipitaciones medias anuales, se determinó aplicando la siguiente ecuación y agrupado como se muestra en el cuadro 6.

$$IF = \sum (p_i^2 / P) \text{ (Sumatoria de } i=1 \text{ hasta } i=12)$$

Donde:

- IF** = Índice de Fournier
Pi = Precipitación total (mm) del mes i.
P = Precipitación total (mm) media anual

Cuadro 6. Rango de categorías del índice de Fournier

ÍNDICE	CATEGORÍA	ÍNDICE DE FOURNIER
1	Muy Baja	< 60
2	Baja	60 - 90
3	Media	90 - 120
4	Alta	120 - 160
5	Muy Alta	> 160

Fuente: Lineros (1999)

6.2.2.2. Cálculo de la erosividad climática (IEC)

Se trata del índice definido mediante la aplicación de álgebra de mapas, clasificándolo de acuerdo con lo propuesto por Almorox *et al.*

Cuadro 7. Índice de erosividad climática (IEC)

ÍNDICE	CATEGORÍA	RANGO
1	Baja	0-90
2	Media	90-120
3	Alta	>120

6.2.3. Estimación de la de erosión potencial (Riesgo a Erosión) -EP-

Con estos términos se designa la susceptibilidad a la erosión que se prevé, va a tener un lugar, en el futuro, en una determinada zona. Hernández (1999). Este riesgo se estima por medio de la relación matemática propuesta por Almorox (1994).

$$EP = IES * IEC$$

El índice resultante se reclasificó en tres categorías de riesgo a erosión. Cuadro 8.

Cuadro 8. erosión potencial (Riesgo a Erosión)

ÍNDICE	RIESGO
1	Bajo
2	Medio
3	Alto
4	Muy Alto

Fuente: Hernández (1999)

6.2.4. Índice de cobertura vegetal (ICV)

La elaboración del índice se concretó a partir de la fotointerpretación digital de ortofotos, con resolución de pixel de 0.5m., la fotointerpretación digital, clasificándolo en cuatro categorías, como lo muestra el Cuadro 9.

Cuadro 9. Índice de cobertura vegetal

ÍNDICE	CATEGORÍA	RANGO
4	Muy Alto	Agricultura
3	Alto	Pastos
2	Medio	Entre el 50 y 75% de Cobertura de Copa
1	Bajo	Entre 75 y 100% de Cobertura de Copa

Fuente: Hernández (1999)

6.2.5. Estimación del riesgo a erosión (RE)

El riesgo de erosión determina la erosión que existe en determinado lugar en el momento presente, Hernández (1999). Dicho riesgo se estimó por medio de la relación matemática propuesta por Almorox (1994).

$$RE = EP * ICV$$

El índice resultante se reclasificó en cuatro rangos de Riesgo, como lo muestra el cuadro 10.

Cuadro 10 Riesgo a erosión

ÍNDICE	RIESGO
1	Bajo
2	Medio
3	Alto
4	Muy Alto

Fuente: Hernández (1999)

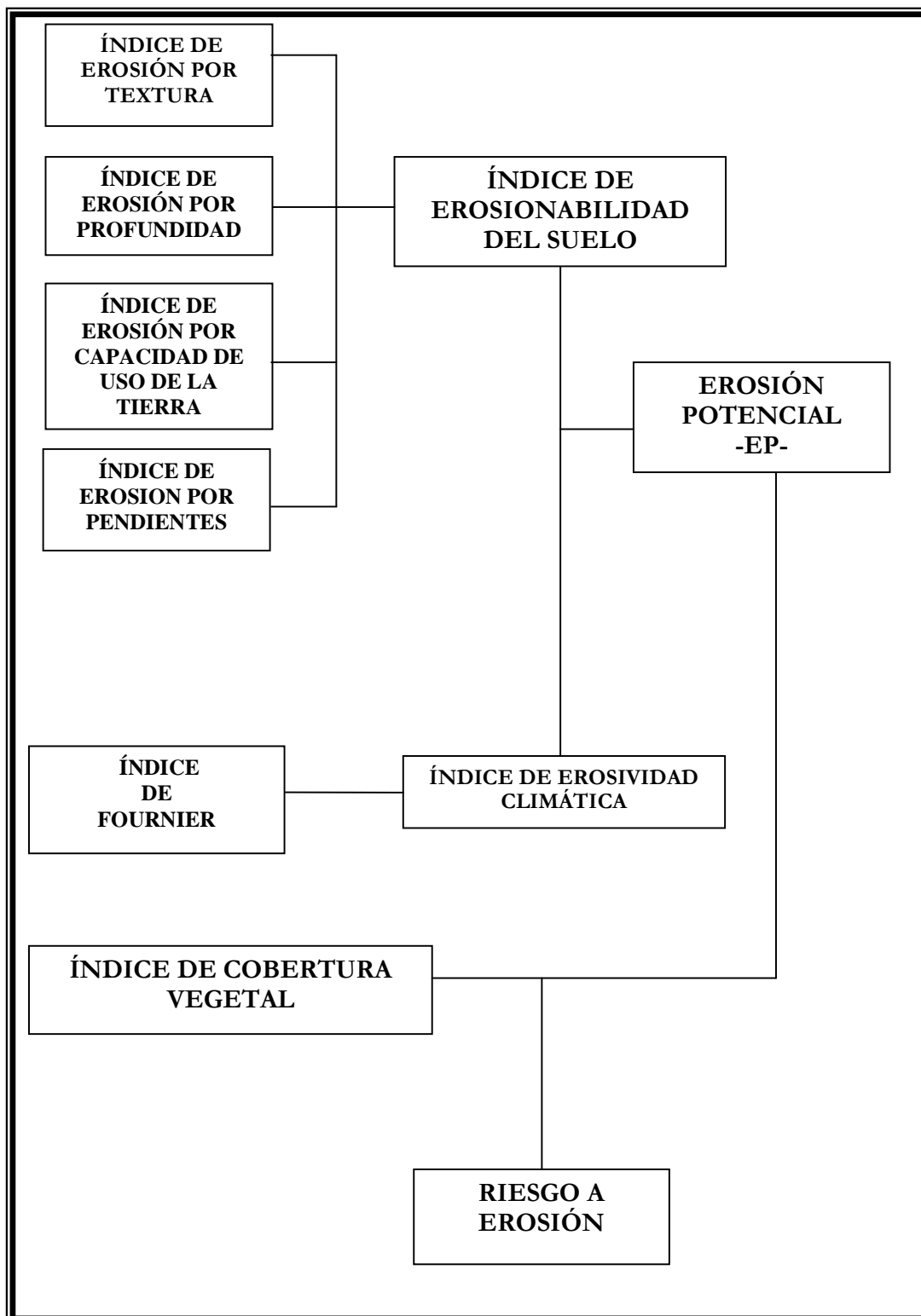


Figura 9. Modelo cartográfico para evaluar los riesgos de erosión mediante la metodología propuesta por Almorox (1991), en la microcuenca del río Negro, 2007.

6.3. Metodología de evaluación de la erosión del suelo (LEAM) “Land erodibility assessment methodology”

Esta metodología ha sido utilizada en diferentes partes del planeta como lo son Hawai, Mali, en el este de África, entre otras. Manrique (1991). Motta en 1999 aplicó dicha metodología en la microcuenca del río Itzapa, que colinda con la microcuenca del río Negro, con la cual confirmó los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología USLE

La metodología LEAM se basa en tres grandes factores:

- a. Factor de longitud y gradiente de la pendiente (LS)
- b. Riesgo de erosividad de la lluvia
- c. Erodabilidad del Suelo.

6.3.1. Factor de longitud y gradiente de la pendiente

Los valores del factor LS se determinaron a partir de la aplicación de la extensión “**Topocrop**”; ésta es una compilación en lenguaje avenue, la cual emplea diversos algoritmos que han sido optimizados para su aplicación en análisis del terreno.

La herramienta usada “**Slope-Lenght-Factor**” calcula el factor LS a partir del Modelo de Elevación Digital del Terreno para USLE, basado en el trabajo de Moore y Wilson (1992); es adaptada al factor de la ecuación de erosión de pérdida de suelo, aplicando la siguiente ecuación:

$$((\text{flowaccumulationGrid}/22.13)^{0.4}) * 1.4 * ((\text{slopeGrid.sin})/0.0896)^{1.3})$$

Reclasificando los valores obtenidos de acuerdo con lo propuesto por Motta (1999). Cuadro 11.

Cuadro 11. Subclase de pendiente de terreno, según metodología LEAM

CLASE DE PENDIENTE	FACTOR TOPOGRÁFICO (LS)	PORCENTAJE DE PENDIENTE
S ₁ Baja	0 - 2	0 - 10
S ₂ Moderada	2 - 4	10 - 20
S ₃ Alta	4 - 6	20 - 30
S ₄ Muy Alta	Mayor que 6	Mayor que 30

Fuente: Manrique (1991)

6.3.2. Riesgo de erosividad de las lluvias

El riesgo de erosividad de las lluvias se determinó tomando como fundamento el índice modificado de Fournier; para éste cálculo se utilizó la base de datos climática de 186 estaciones nacionales y fronterizas del INSIVUMEH, actualizada hasta el año 2007.

Mediante análisis espacial de raster se aplicó la siguiente fórmula

$$IF = \sum (p_i^2 / P) \text{ (Sumatoria de } i=1 \text{ hasta } i=12)$$

Donde:

- IF** = Índice de Fournier
P_i = Precipitación total (mm) del mes *i*.
P = Precipitación total (mm) media anual

Con los valores de IF, se determinan las subclases de erosividad de la lluvia.

Cuadro 12. Subclase de erosividad de las lluvias, según metodología LEAM

CLASE DE EROSIVIDAD	RIESGO DE EROSIVIDAD	VALOR DE FI
R1	Muy poca	Menor que 50
R2	Poca	50 – 100
R3	Moderada	100 – 200
R4	Alta	200 – 300
R5	Muy alta	Mayor que 300

Fuente: Manrique (1991)

6.3.3. Erodabilidad del suelo

El factor de erodabilidad del suelo (factor K) es un valor cuantitativo que fue determinado experimentalmente; para su cálculo fue necesario contar con información de las características físicas del suelo, tal es como textura, estructura, permeabilidad, contenido de materia orgánica. Con todos estos parámetros se determinará el valor de K utilizando el nomograma de Wischmeir para reclasificarlo en las subclases de erosividad del suelo, según la metodología LEAM que fue utilizada por Motta (1999). Cuadro 13.

Cuadro 13. Subclase de erodabilidad del suelo, según metodología LEAM

CLASE DE ERODABILIDAD	RIESGO DE ERODABILIDAD	RANGO DE K
K1	Muy bajo	0.001 - 0.010
K2	Bajo	0.010 - 0.020
K3	Moderado	0.020 - 0.030
K4	Moderadamente Alto	0.030 - 0.040
K5	Alto	0.040 - 0.050
K6	Muy Alto	Mayor que 0.050

Fuente: Manrique (1991)

6.3.4. Determinación de clases y subclases de erosión

Por el efecto, fue utilizado el programa ArcGis9.2. Cada uno de los mapas de factor LS, Factor K e Índice de Fournier, se reclasificó para determinar las subclases de erodabilidad; realizando un cruce de mapas, se reubicó, cada área dentro de la clase de erodabilidad correspondiente a las clases propuestas por Motta (1999). Cuadro 14.

Cuadro 14. Clases o Subclases de erodabilidad según metodología LEAM

CLASE DE ERODABILIDAD	SUBCLASES
E1	S1RR1K1 S1RR1K2 S1RR1K3 S1RR2K1 S1RR2K2 S1RR2K3 S1RR3K1 S1RR3K2 S1RR3K3
E2	S1RR4K1 S1RR4K2 S1RR4K3 S2RR5K1 S2RR5K2 S2RR5K3 S1RR1K4 S1RR1K5 S1RR1K6 S1RR2K4 S1RR2K5 S1RR2K6 S1RR3K4 S1RR3K5 S1RR3K6 S2RR1K1 S1RR3K5 S2RR1K3 S2RR2K1 S2RR2K2 S2RR2K3 S2RR3K1 S2RR3K2 S2RR3K3
E3	S1RR4K4 S1RR4K5 S1RR4K6 S1RR5K4 S1RR5K5 S1RR5K6 S2RR4K1 S2RR4K2 S2RR4K3 S2RR5K1 S2RR5K2 S2RR5K3 S2RR1K4 S2RR1K5 S2RR2K4 S2RR2K5 S2RR2K6 S2RR3K4 S2RR3K5 S2RR3K6 S3RR1K1 S3RR1K2 S3RR1K3 S3RR2K1 SERR2K2 S3RR2K3 S3RR3K1 S3RR3K2 S3RR3K3
E4	S2RR4K4 S2RR4K5 S2RR4K6 S2RR5K4 S2RR5K5 S2RR5K6 S3RR4K1 S3RR4K2 S3RR4K3 S3RR5K1 S3RR5K2 S3RR5K3 S3RR1K4 S3RR1K5 S3RR1K6 S3RR2K4 S3RR2K5 S3RR2K6 S3RR3K4 S3RR3K5 S3RR3K6 S4RR1K1 S4RR1K2 S4RR1K3 S4RR2K1 S4RR2K2 S4RR2K3 S4RR3K1 S4RR3K2 S4RR3K3
E5	S3RR4K4 S3RR4K5 S3RR4K6 S3RR5K4 S3RR5K5 S3RR5K6 S4RR4K1 S4RR4K2 S4RR4K3 S4RR4K4 S4RR4K5 S4RR4K6 S4RR5K1 S4RR5K2 S4RR5K3 S4RR5K4 S4RR5K5 S4RR5K6

Fuente: Manrique (1991)

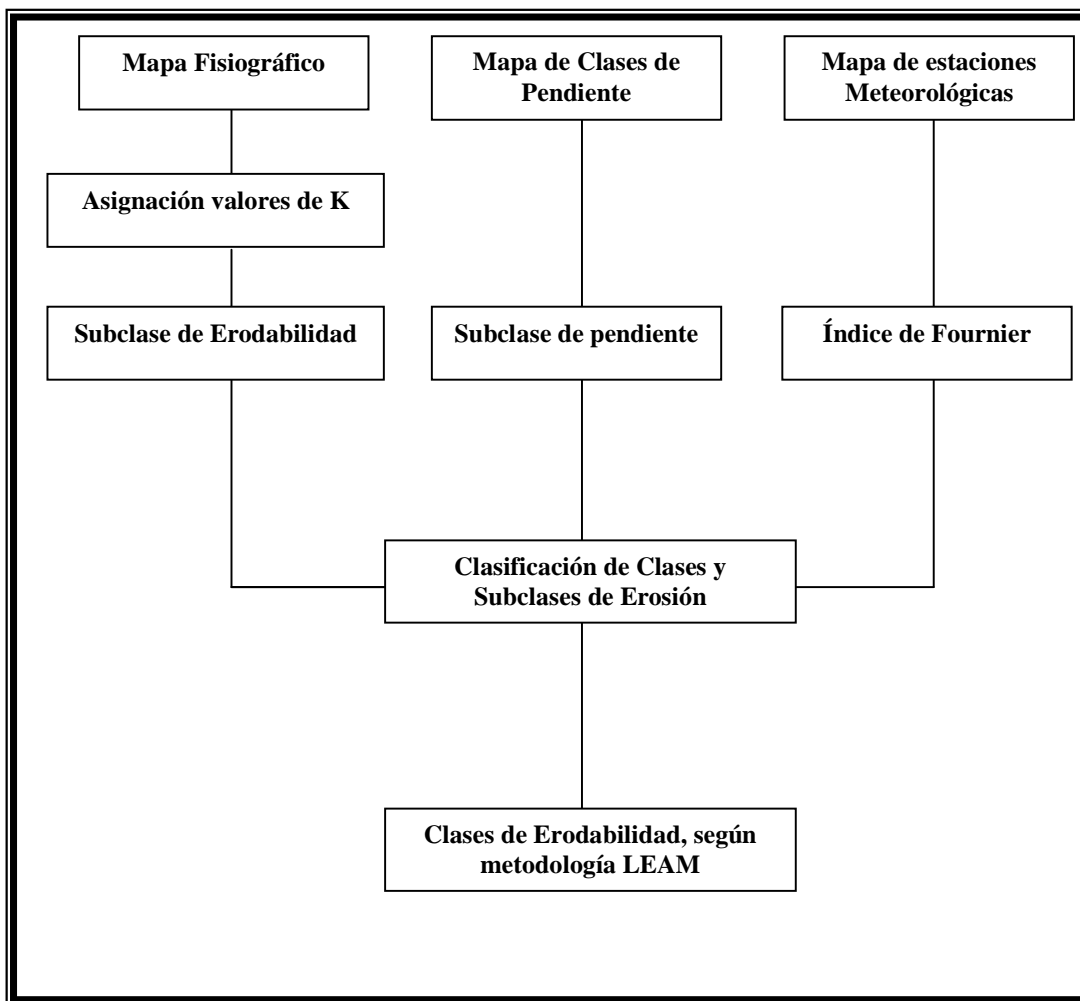


Figura 10. Modelo cartográfico para evaluar los niveles de erosión, mediante la metodología LEAM, en la microcuenca del río Negro, 2007.

6.4. Ecuación universal de pérdida de suelo USLE (Universal soil loss equation)

El Modelo USLE ha permitido estimar las pérdidas por efecto de la erosión hídrica en diferentes partes del mundo, dada la facilidad de su aplicación:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

Donde:

- R** = un factor de erosividad de la lluvia,
- K** = un factor de erodabilidad del suelo,
- L** = el factor longitud de pendiente
- S** = un factor pendiente,
- C** = un factor de cultivo y
- P** = un factor prácticas de cultivo.

6.4.1. Erosividad de las lluvias (Factor R)

El factor R fue determinado con base al área de influencia de las estaciones climáticas, de la misma forma que con las metodologías propuestas por Almorox y LEAM.

6.4.2. Erodabilidad del suelo (Factor K)

El factor de erodabilidad del suelo (factor K) es el mismo que se obtuvo en la metodología LEAM. Cuadro 13.

6.4.3. Erodabilidad topográfico (Factor LS)

Para determinar el factor LS según la metodología USLE, se siguieron los mismos procedimientos y valores de los factores obtenidos al utilizar la metodología LEAM.

6.4.4. Factor de manejo de cobertura vegetal (Factor C)

El factor C se estableció tomando como base el mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra obtenido a partir de las ortofotos, que es el mismo utilizado en la metodología de Almorox, asignándole los valores de factor de manejo que propone Motta (1999).

6.4.5. Factor de prácticas de conservación de suelos (Factor P)

Para la determinación de este factor se consideró un valor de 1; esto, debido a que en el área de estudio no se realizan prácticas de conservación de suelos, en extensiones considerables.

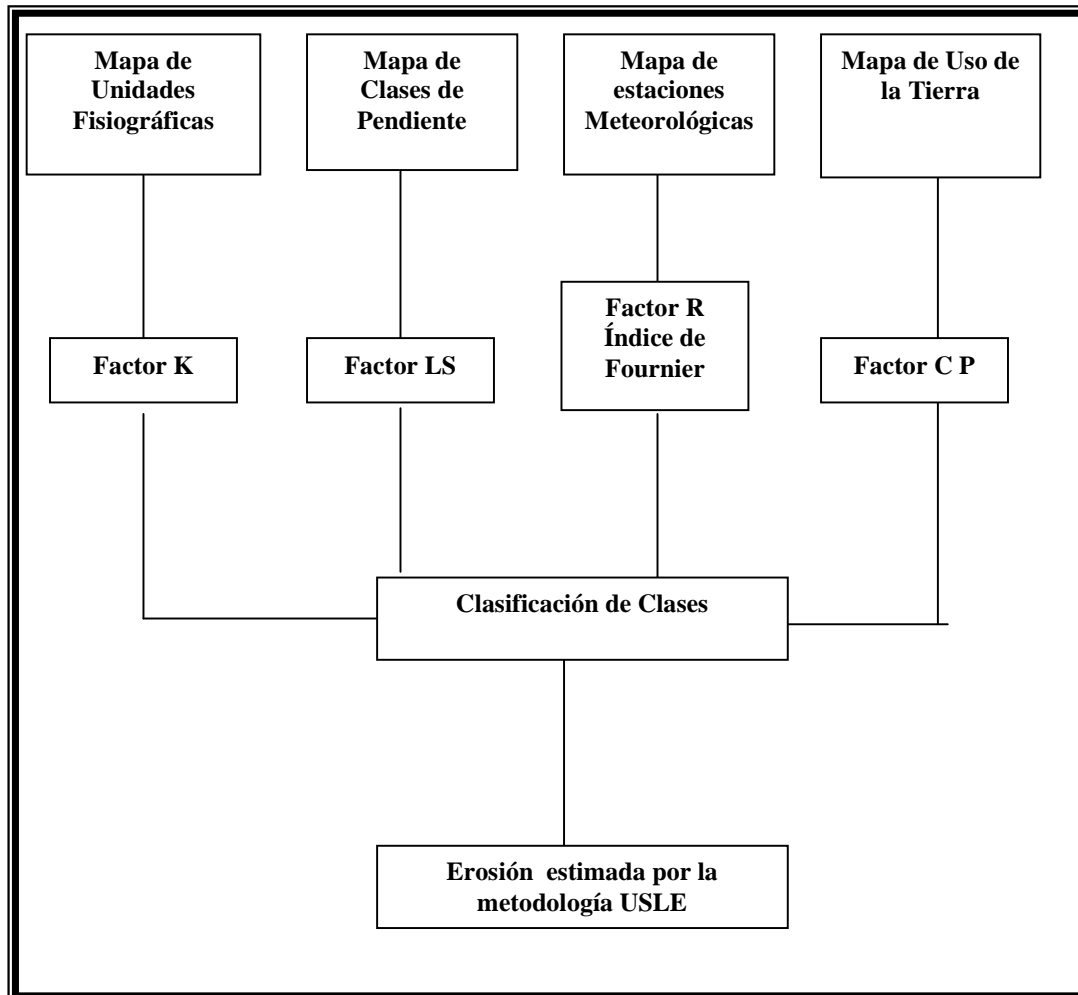


Figura 11. Modelo cartográfico para evaluar los niveles de erosión, mediante la metodología USLE, en la microcuenca del río Negro, 2007.

7. RESULTADOS

7.1. Estimación de la erosión hídrica propuesta por Almorox

7.1.1. Índice de erosionabilidad del suelo (IES)

La estimación de este índice está determinada por el cálculo de los siguientes índices:

7.1.1.1. Índice de textura del suelo

Para la determinación del índice de textura se realizaron 12 calicatas, con base en las unidades fisiográficas identificadas (Figura4). Para cada punto de muestreo se realizó una calicata obteniendo una muestra por cada horizonte. Éstas fueron enviadas al laboratorio de suelos, para su análisis, donde se determinó que el 67.53% de la microcuenca comprende suelos franco-arenosos; 18.68%, francos; un 6.84% franco arcillo arenosos; un 2.40%, de arena franca, y un 4.55%, franco arcillosos; Tomando como base la clase textural, se reagruparon como lo indica Almorox (cuadro 2), dando como resultado dos categorías de erosionabilidad, según la textura del suelo, agrupando a la microcuenca de la siguiente manera: el 88.61% con un índice alto, y el 11.39% con un índice medio, distribuido como lo muestra el cuadro 15.

Cuadro 15. Resultados índice de erosionabilidad según textura del suelo, microcuenca río Negro, 2007.

Unidad de Mapeo	Clase Textural	Índice de Textura	Área Km ²	Porcentaje de Área
Meseta de Pie de Monte (Coladas)	Franco	ALTA	5.76	18.68
Ladera Erosionada	Franco arenoso	ALTA	10.26	33.29
Cresta o Estribaciones Erosionadas	Franco arenoso	ALTA	4.18	13.55
Edificios Volcánicos Erosionados Antiguos (Terciarios)	Arena franca	ALTA	0.74	2.40
Cerro Testigo	Franco arenoso	ALTA	1.10	3.58
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	Franco arenoso	ALTA	3.37	10.94
Ladera Erosionada	Franco arenoso	ALTA	1.15	3.72
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	Franco arenoso	ALTA	0.76	2.45
Pie de Monte	Franco arcillo arenoso	MEDIA	1.71	5.54
Cresta o Estribaciones Erosionadas	Franco arcillo arenoso	MEDIA	0.15	0.48
Cerro Testigo	Franco arcillo arenoso	MEDIA	0.25	0.82
Pie de Monte	Franco arcilloso	MEDIA	1.40	4.55

7.1.1.2. Índice de profundidad del suelo

La profundidad del suelo se determinó directamente en campo, midiendo, en cada calicata, cada horizonte; luego, con los resultados de laboratorio y apoyo del criterio de un experto en suelos, se estableció el horizonte limitante y la profundidad a la que se encontró dicho horizonte, para después agruparlo como lo muestra el cuadro 16. Sin embargo, la microcuenca del río Negro posee suelos profundos: el 77% tiene profundidades mayores a un metro, mientras que en el restante 23% son moderadamente profundos. La agrupación propuesta en el cuadro 3 dos categorías de erosionabilidad, según la profundidad del suelo, agrupando a la microcuenca así: el 19.16% con un índice medio y el 80.84 % con un índice bajo, distribuido como lo muestra el cuadro 16.

Cuadro 16. Resultados índice de erosionabilidad, según profundidad del suelo, microcuenca río Negro, 2007.

Unidad de Mapeo	Profundidad cm.	Índice de Profundidad	Área Km ²	Porcentaje de Área
Meseta de Pie de Monte (Coladas)	72	MEDIA	5.7590	18.68
Cresta o Estribaciones Erosionadas	58	MEDIA	0.1466	0.48
Pie de Monte	127	BAJA	1.7069	5.54
Cerro Testigo	139	BAJA	0.2524	0.82
Ladera Erosionada	116	BAJA	10.2626	33.29
Cresta o Estribaciones Erosionadas	146	BAJA	4.1783	13.55
Pie de Monte	100	BAJA	1.4039	4.55
Edificios Volcánicos Erosionados Antiguos (Terciarios)	115	BAJA	0.7388	2.40
Cerro Testigo	125	BAJA	1.1026	3.58
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	108	BAJA	3.3736	10.94
Ladera Erosionada	89	BAJA	1.1454	3.72
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	158	BAJA	0.7560	2.45

7.1.1.3. Índice de capacidad de uso de la tierra (Metodología USDA)

Se efectuó una sobreposición digital del mapa de pendientes y profundidad del suelo; el resultado fue codificado debidamente para, luego, aplicar la “Clave de Interpretación de Clases de Capacidad de Uso de la Tierra” según USDA, a fin de agruparlo de conformidad con la propuesta de Lineros (1999. Cuadro 4, con lo que se pudo determinar que la mayor parte de la microcuenca, específicamente el 72.05%, tiene un alto índice de erosionabilidad debido a la capacidad de uso, extremos que se muestran en el cuadro 17.

Cuadro 17. Resultados índice de capacidad de uso de la tierra (Metodología USDA) ,microcuenca río Negro, 2007.

Índice de Capacidad de Uso	Área Km ²	Porcentaje de Área
ALTA	22.21	72.05
BAJA	3.21	10.41
MEDIA	5.40	17.53

7.1.1.4. Índice de erosión por pendientes

La Agrupación llevado a cabo para este índice, como lo indica Almorox, muestra que la mayor parte de la microcuenca cuenta con altas pendientes el 45.12% se encuentra en un índice de erosión por pendiente de categoría alta, con pendientes mayores al 16%; el 34.77% se sitúa en rangos de pendientes de 4 a 16%. Por lo tanto, corresponde a éstas áreas una categoría de índice medio y el 20.11% del área de la microcuenca con pendientes menores al 4%, ubicando un índice de categoría baja para este segmento de la cuenca, como lo demuestran los resultados del cuadro 18.

Cuadro 18. Resultados índice de erosión por pendientes, microcuenca río Negro, 2007.

Índice por Pendientes	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	6.20	20.11
MEDIO	10.72	34.77
ALTO	13.91	45.12

7.1.1.5. Cálculo de índice de erosionabilidad del suelo -IES-

El cálculo del IES no es más que una aplicación del análisis espacial en SIG, que es el álgebra de mapas, en este caso, para aplicar la fórmula:

IES = (Índice de Textura del Suelo)(Índice de Profundidad del Suelo)*(Índice de Capacidad de Uso de la Tierra)*(Índice de Erosión por pendientes).

Aplicando la herramienta “Map Álgebra” de la extensión Spatial Analyst de ArcGIS 9.2, se multiplicó cada uno de los índices obtenidos anteriormente, identificando que el 43.9% de la microcuenca posee un riesgo alto a erosionarse a causa de los factores edáficos y topográficos existentes; 39.70% tienen un riesgo medio, y el 16.39% restante se encuentra en un riesgo bajo, como lo ilustra el cuadro 19.

Cuadro 19. Resultados índice de erosionabilidad del Suelo –IES-, microcuenca río Negro, 2007.

IES	Área km²	Porcentaje de Área
BAJO	5.05	16.39
MEDIO	12.24	39.70
ALTO	13.53	43.90

7.1.2. Índice de erosividad climática

Este determinó con base en el índice modificado de Fournier. Para el cálculo se utilizó la base de datos climática de 186 estaciones nacionales y fronterizas del INSIVUMEH, actualizada hasta el año 2007, calculando el IF para cada una de las estaciones; posteriormente, utilizando la extensión 3D Analyst se interpolaron los datos a través del método “**Kriging**”, el cual está basado en modelos geoestadísticos que incluyen una autocorrelación de los puntos.

El 100% de la microcuenca se encuentra en un índice de erosividad climática Alto, ya que los valores están por arriba de los 120 (Cuadro 7). Esto nos indica que aunque existen diferencias en los valores de IF, dentro de la cuenca éstas no son significativas, por lo que la intensidad de la lluvia influye de manera uniforme en toda el área de la cuenca.

Cuadro 20. Resultados índice de erosividad climática -IEC-, microcuenca río Negro, 2007.

Unidad de Mapeo	IF Promedio	IEC	Área Km ²	Porcentaje de Área
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	171.81	ALTO	4.11	13.35
Cerro Testigo	175.93	ALTO	1.35	4.37
Cresta o Estribaciones Erosionadas	182.08	ALTO	4.31	13.98
Edificios Volcánicos Erosionados Antiguos (Terciarios)	190.42	ALTO	0.75	2.43
Ladera Erosionada	177.65	ALTO	11.40	36.96
Meseta de Pie de Monte (Colada)	161.50	ALTO	5.75	18.65
Pie de Monte	165.36	ALTO	3.10	10.05

7.1.3. Estimación de la erosión potencial -EP-

Se aplicó el álgebra de mapas para multiplicar el Índice de Erosionabilidad del Suelo por el Índice de Erosividad Climática, determinándose que la mayor parte de la cuenca posee alto riesgo potencial a erosionarse, dividiendo como lo muestra el cuadro 21.

Cuadro 21. Resultados Estimación de la Erosión Potencial, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión Potencial	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	5.05	16.39
MEDIO	4.19	13.58
ALTO	8.05	26.12
MUY ALTO	13.53	43.90

7.1.4. Índice de cobertura vegetal

Este índice es uno de los que diferencia a la metodología propuesta por Almorox, de las otras dos, por los pesos que le asigna a cada una de las categorías de uso, en donde los extremos son los que acumulan los mayores porcentajes, como se indica en el cuadro 22.

Cuadro 22. Resultados índice de cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.

Índice de Cobertura Vegetal	Área km ²	Porcentaje de Área
MUY ALTO	11.80	38.29
ALTO	1.51	4.88
MEDIO	1.05	3.41
BAJO	16.46	53.40

7.1.5. Estimación del riesgo a erosión -RE-

Se utilizó el álgebra de mapas para la multiplicación del riesgo a erosión potencial y el índice de cobertura vegetal, a efecto de determinar el riesgo a erosión calculada o real, representando las áreas con mayor probabilidad a erosionarse según los factores que propone Almorox. A partir de ello, se puede establecer que el 47.30% de la microcuenca se encuentra en un riesgo a erosión medio, esto principalmente por el peso que le da Almorox a la cobertura vegetal, ya que en este caso, las coberturas de arbustos o matorra, les influyen para la reducción de la erosión. Los resultados de este índice se incluyen en el cuadro 23.

Cuadro 23. Resultados riesgo a erosión, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión Calculada	Área Km²	Porcentaje de Área
BAJO	2.14	6.93
MEDIO	14.58	47.30
ALTO	8.93	28.96
MUY ALTO	5.18	16.80

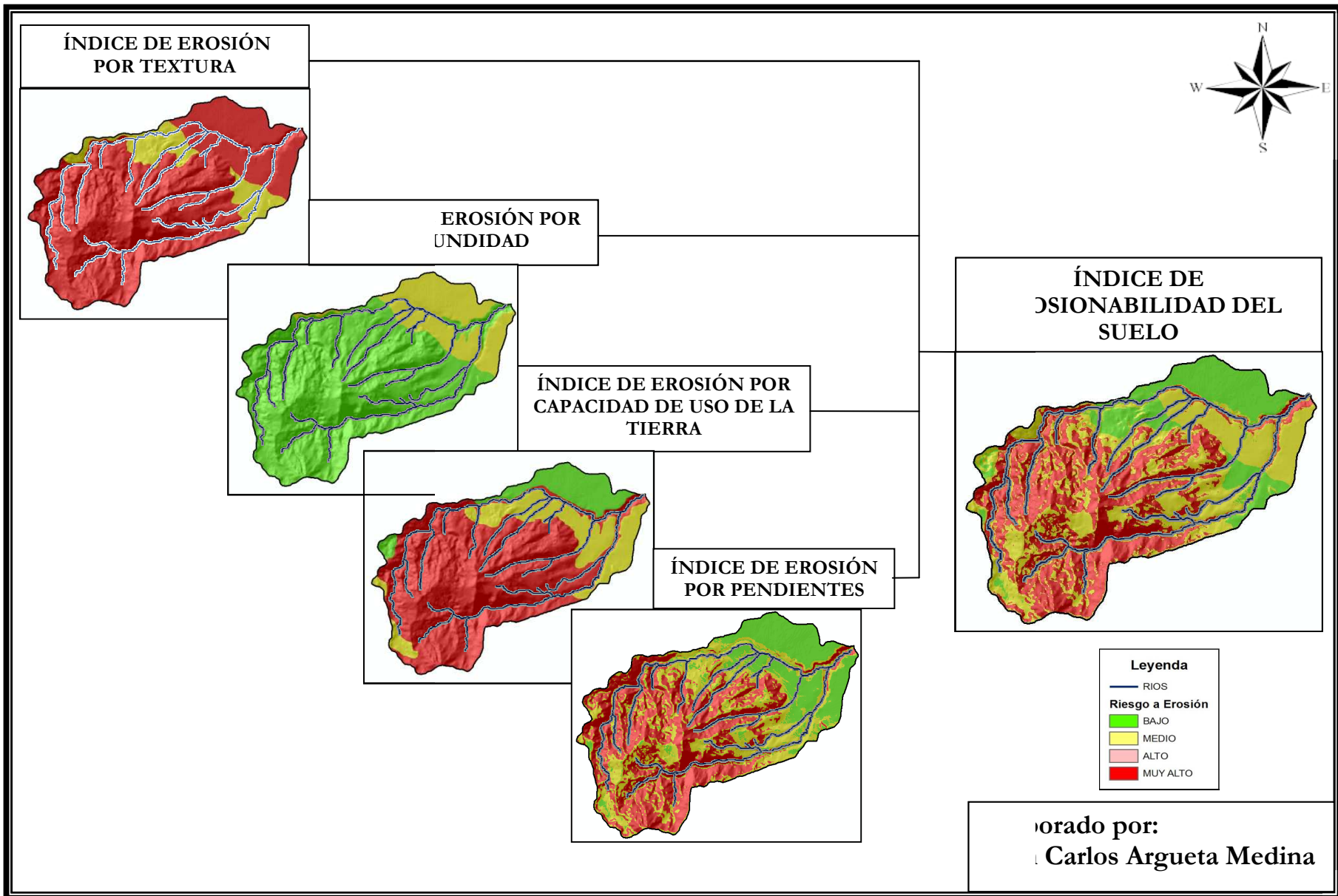


Figura 12. Procedimiento y productos parciales en la determinación de la erosionabilidad del suelo.

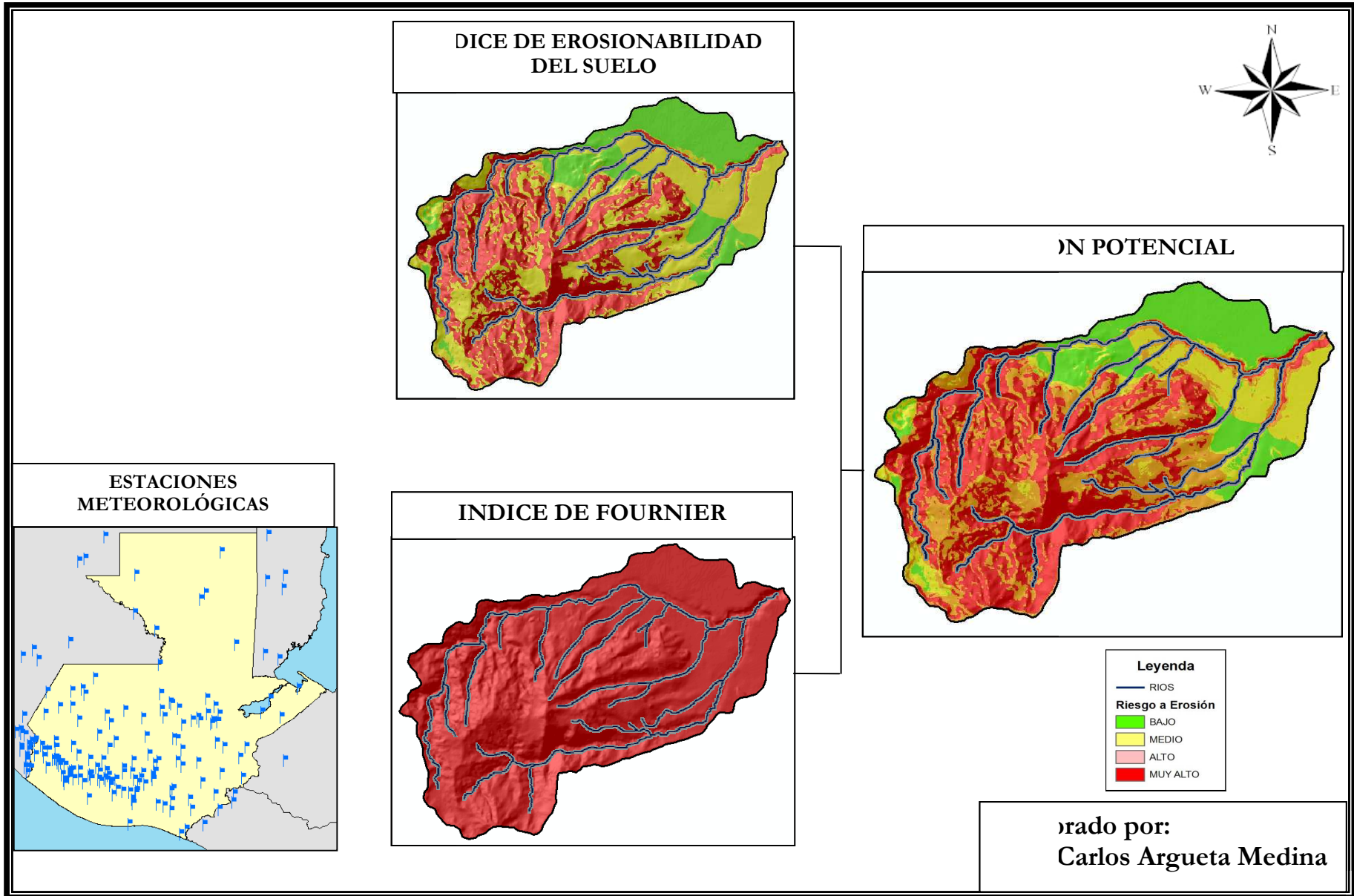


Figura 13. Procedimiento y productos parciales en la determinación de la Erosión Potencial

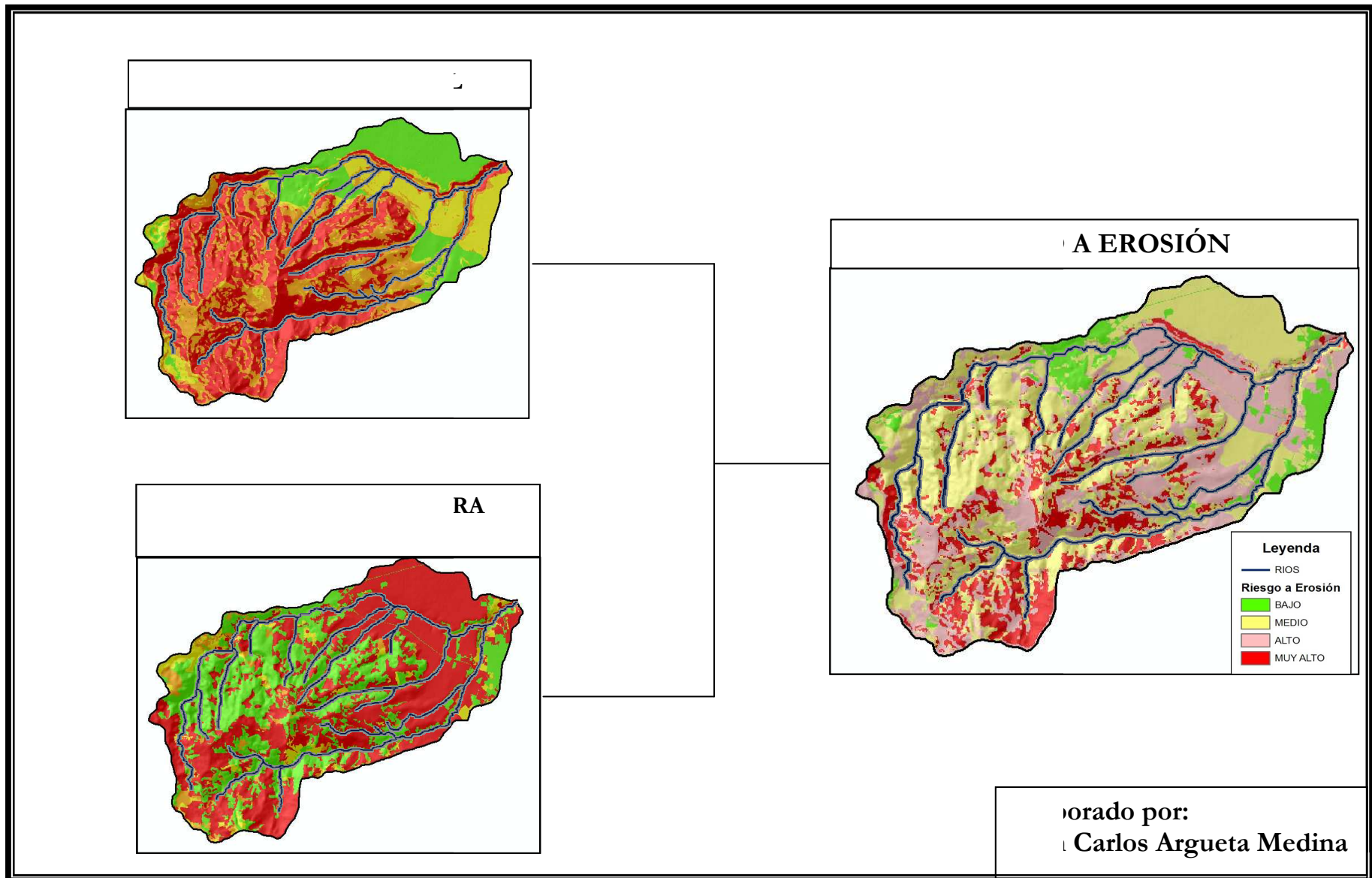


Figura 14. Procedimiento y productos parciales en la determinación del Riesgo a Erosión.

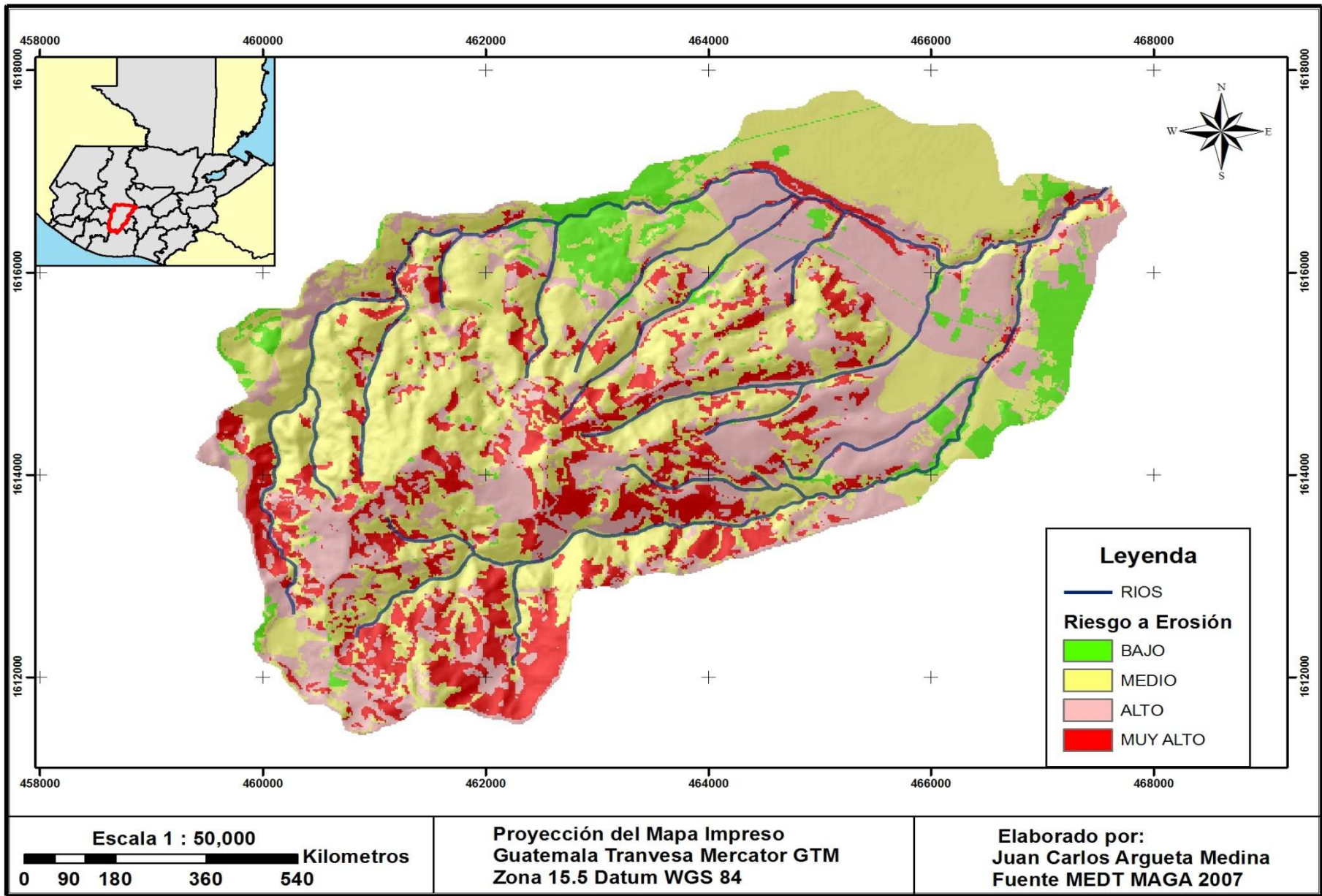


Figura 15. Mapa de Riesgo a Erosión, Metodología Propuesta por Almorox

7.2. Cálculo del riesgo a erosión en la microcuenca del río Negro por la metodología LEAM

7.2.1. Factor topográfico o de pendiente

La aplicación de la herramienta “**Slope-Lenght-Factor**” con la que se calculó el factor LS utilizando el programa ArcView 3.2, muestra, en el cuadro 24, que la mayor parte de la microcuenca está catalogada dentro de la subclase S4, correspondiente a un 43.43%; coincidiendo los datos con los obtenidos por Motta en la microcuenca del río Itzapa, vecina a la del río Negro; si esto no se acompaña de un buen manejo de los suelos, las tasas de erosión pueden aumentar y, consecuentemente, disminuir el capital productivo de la microcuenca.

Cuadro 24. Resultados factor topográfico o de pendiente, microcuenca río Negro, 2007.

Subclase de Pendientes	Área Km ²	Porcentaje de Área
S1	7.88	25.55
S2	4.61	14.90
S3	4.86	15.72
S4	13.39	43.43

7.2.2. Riesgo de erosividad de las lluvias

La metodología para obtener los valores del riesgo de erosividad de las lluvias, fue la misma propuesta por Almorox, y reclasificada con base en lo propuesto por Motta (cuadro 11).

El 100% de la microcuenca se cataloga en la clase de erosividad R3, siendo valor más bajo es de 160 y el más alto de 190.18; los valores promedio se pueden observar en el cuadro 25.

Cuadro 25. Resultados riesgo de erosividad de la lluvia, microcuenca río Negro, 2007.

Unidad de Mapeo	IF Promedio	Clase de Erosividad	Área Km ²	Porcentaje de Área
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	171.81	RR3	4.11	13.35
Cerro Testigo	175.93	RR3	1.35	4.37
Cresta o Estribaciones Erosionadas	182.08	RR3	4.31	13.98
Edificios Volcánicos Erosionados Antiguos (Terciarios)	190.42	RR3	0.75	2.43
Ladera Erosionada	177.65	RR3	11.40	36.96
Meseta de Pie de Monte (Coladas)	161.50	RR3	5.75	18.65
Pie de Monte	165.36	RR3	3.10	10.05

7.2.3. Erodabilidad del suelo (factor K)

En el cuadro 26 se presentan los valores de K, según las unidades fisiográficas de la microcuenca del río Negro (figura 4); asimismo, la subclase de erodabilidad a la que pertenece.

La subclase de erodabilidad K2 representa el 65.4 % de la microcuenca, lo que indica que existe un riesgo de bajo a moderado de erosión; por consiguiente, el factor K no es el que más afecta la erosión del suelo de la microcuenca.

Cuadro 26. Resultados riesgo de erodabilidad del suelo, microcuenca río Negro, 2007.

Unidad de Mapeo	Área Km ²	Porcentaje de Área	Factor K (<i>T-ha-hora/ha-Mj-mm</i>)	Subclase de Erodabilidad
Meseta de Pie de Monte (Coladas)	5.7590	18.70	0.0210	K3
Pie de Monte	1.7069	5.54	0.0160	K2
Cresta o Estribaciones Erosionadas	0.1466	0.48	0.0200	K2
Cerro Testigo	0.2524	0.82	0.0200	K2
Ladera Erosionada	10.2626	33.32	0.0120	K2
Cresta o Estribaciones Erosionadas	4.1783	13.57	0.0060	K1
Pie de Monte	1.4039	4.56	0.0140	K2
Edificios Volcánicos Erosionados Antiguos (Terciarios)	0.7089	2.30	0.0100	K1
Cerro Testigo	1.1026	3.58	0.0110	K2
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	3.3736	10.95	0.0120	K2
Ladera Erosionada	1.1454	3.72	0.0120	K2
Barrancos Escarpado (Vía de Drenaje)	0.7560	2.45	0.0200	K2

7.2.4. Valor de erosión de la microcuenca del río Negro, por la metodología LEAM

En el cuadro 27 se presentan las clases de erosión de los suelos agrupados según la metodología LEAM.

Cuadro 27. Clases y rangos de erosión, microcuenca río Negro, 2007.

Clase de Erosión	Riesgo a Erosión LEAM	Área Km ²	Porcentaje de Área
E1	BAJO	7.86	25.56
E2	MEDIO	4.20	13.66
E3	ALTO	5.30	17.24
E4	MUY ALTO	13.39	43.54

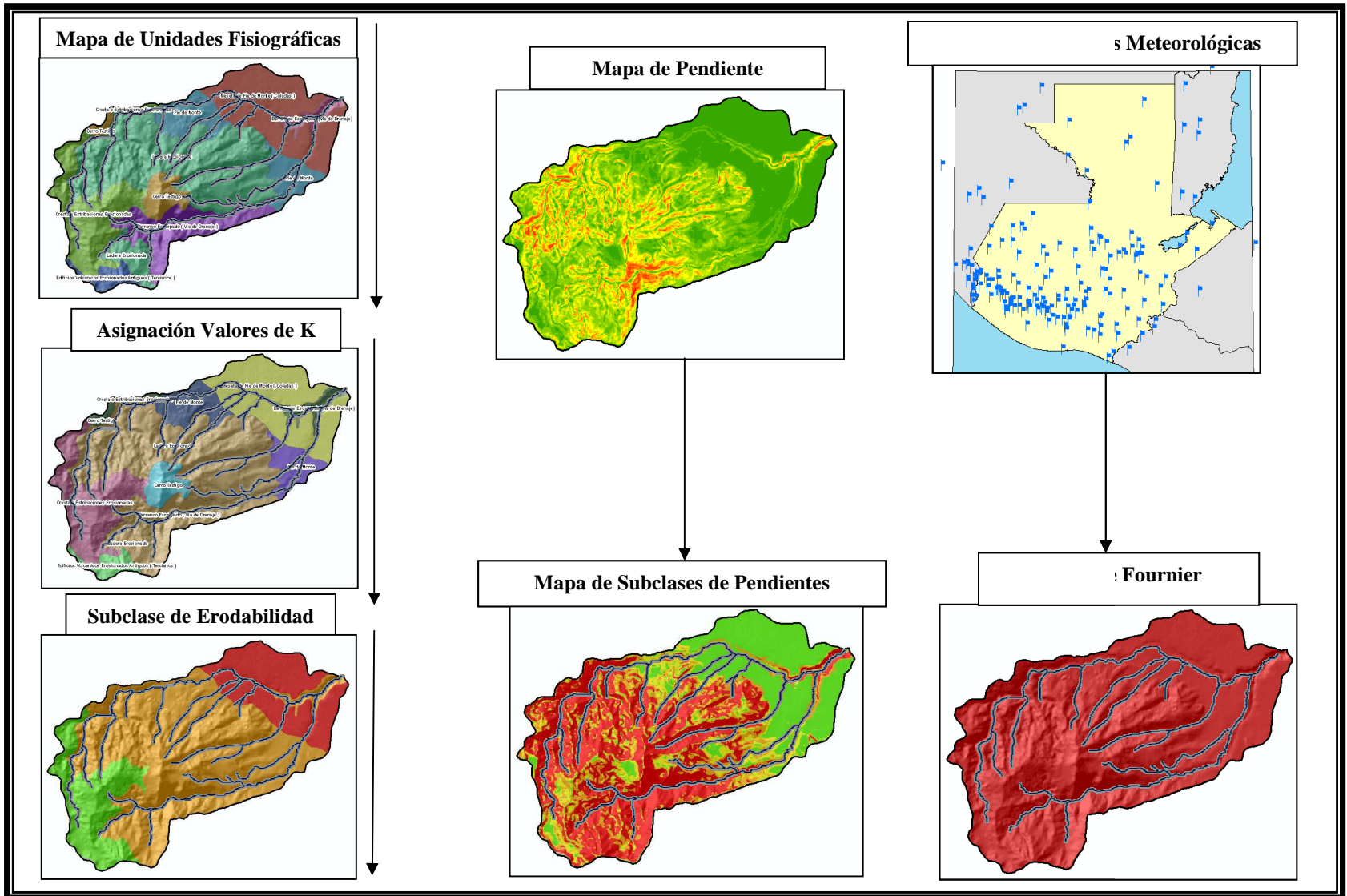


Figura 16. Procedimiento y productos parciales en la determinación de riesgo a erosión, por la Metodología LEAM.

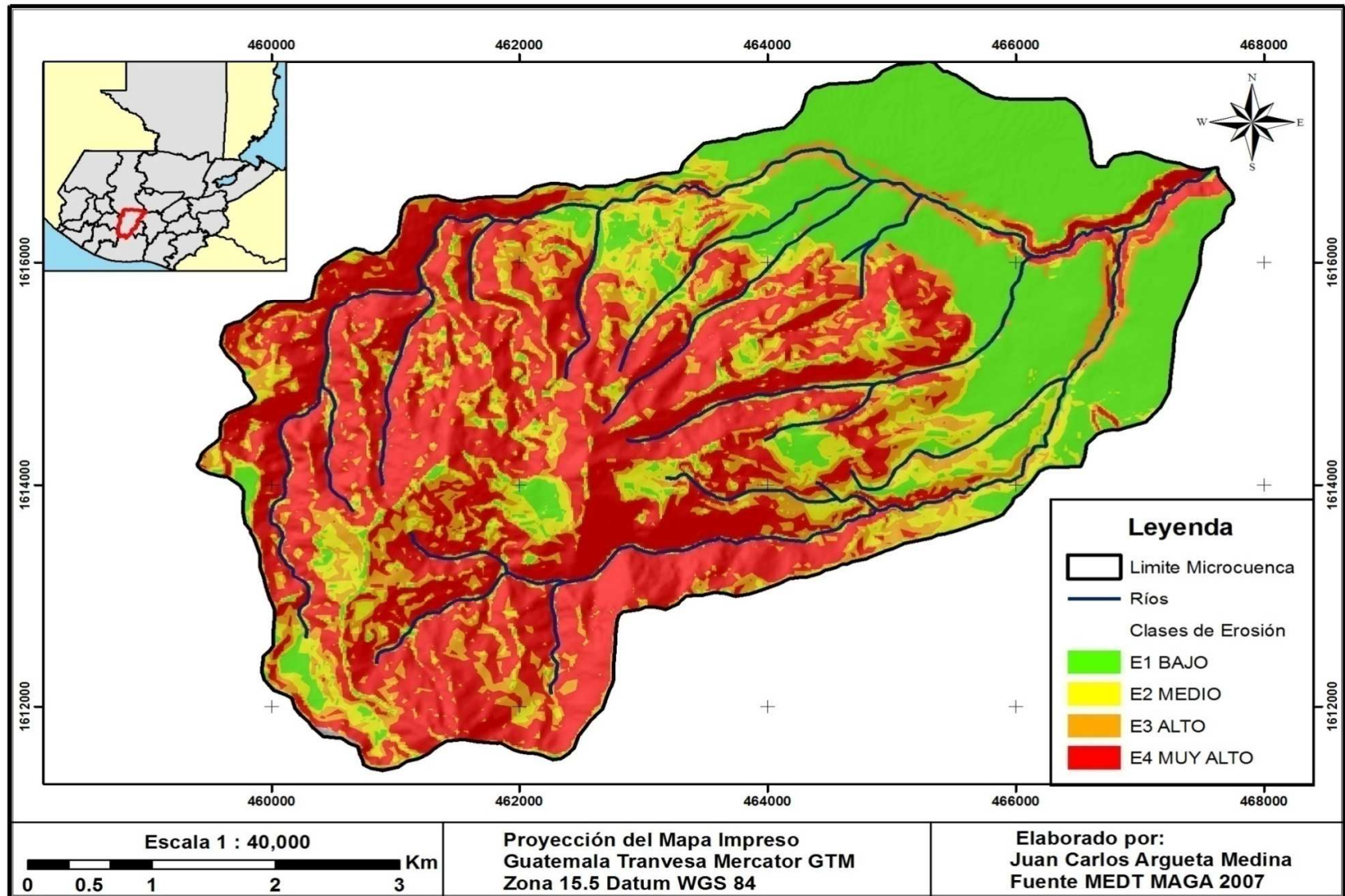


Figura 17. Mapa de Riesgo a Erosión en la Microcuenca del río Negro por la Metodología LEAM.

7.3. Estimación de la pérdida de suelo por medio de la ecuación universal de pérdidas de suelo -USLE-

7.3.1. Erosividad de la lluvia (Factor R)

La metodología utilizada para obtener los valores del riesgo de erosividad de las lluvias, fue la misma propuesta por Almorox; en este caso, no se reclasificó, ya que se usará el valor de FI de cada pixel, con un tamaño de 15*15 de resolución; ya que los valores se encuentran en un rango de 100 a 200, se puede inferir que es un factor alto para toda la cuenca, y aunque existen diferencias dentro de la cuenca, éstas son mínimas.

Cuadro 28. Resultados Erosividad de la lluvia (Factor R), microcuenca río Negro, 2007.

Unidad de Mapeo	IF Promedio	Área Km ²	Porcentaje de Área
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	171.81	4.11	13.35
Cerro Testigo	175.93	1.35	4.37
Cresta o Etribaciones Erosionadas	182.08	4.31	13.98
Edificios Volcánicos Erosionados Antiguos (Terciarios)	190.42	0.75	2.43
Ladera Erosionada	177.65	11.40	36.96
Meseta de Pie de Monte (Coladas)	161.50	5.75	18.65
Pie de Monte	165.36	3.10	10.05

7.3.2. Erodabilidad del suelo (Factor K)

La determinación del Factor K se basó en la información de campo levantada y analizada en laboratorio, asignándole un valor de K a cada una de las unidades fisiográficas identificadas; luego, se convirtió a formato raster con un tamaño de pixel de 15*15; de tal forma que cada pixel cuenta con el valor de K correspondiente, como lo muestra el cuadro 29.

Cuadro 29. Resultados erodabilidad del suelo (Factor K), microcuenca río Negro, 2007.

Unidad de Mapeo	Área Km ²	Porcentaje de Área	Factor K (T-ha-hora/ha-Mj-mm)
Meseta de Pie de Monte (Coladas)	5.7590	18.70	0.0210
Pie de Monte	1.7069	5.54	0.0160
Cresta o Estribaciones Erosionadas	0.1466	0.48	0.0200
Cerro Testigo	0.2524	0.82	0.0200
Ladera Erosionada	10.2626	33.32	0.0120
Cresta o Estribaciones Erosionadas	4.1783	13.57	0.0060
Pie de Monte	1.4039	4.56	0.0140
Edificios Volcánicos Erosionados Antiguos (Terciarios)	0.7089	2.30	0.0100
Cerro Testigo	1.1026	3.58	0.0110
Barranco Escarpado (Vía de Drenaje)	3.3736	10.95	0.0120
Ladera Erosionada	1.1454	3.72	0.0120
Barrancos Escarpado (Vía de Drenaje)	0.7560	2.45	0.0200

7.3.3. Erodabilidad topográfica (Factor LS)

La metodología para obtener los valores del factor topográfico LS, es la misma de LEAM; éstos valores, al igual que los otros, se manejaron en formato raster con pixeles uniformizados de 15*15m, equivalente a la resolución del modelo de elevación utilizado.

7.3.4. Factor de manejo de la cobertura vegetal (Factor C)

Para la obtención de éste valor, se utilizó el Mapa de Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra de la microcuenca del río Negro; para cada tipo de cobertura se estimó dicho coeficiente basado en los valores propuestos por Motta (1999); los resultados se presentan en el cuadro 30.

Cuadro 30. Resultados Factor de manejo de la cobertura vegetal (Factor C), microcuenca río Negro, 2007.

Cobertura Vegetal y Uso de La Tierra	Factor C	Área Km²	Porcentaje de Área
Agroindustria	0.00	0.05	0.15
Cementerio	0.00	0.03	0.09
Centros poblados	0.00	0.83	2.70
Complejo industrial	0.00	0.03	0.10
Café	0.07	1.09	3.53
Frutales deciduos	0.07	0.01	0.03
Arbustos - matorrales	0.08	6.55	21.23
Bosque latifoliado	0.08	1.13	3.66
Bosque mixto	0.08	4.45	14.44
Pastos naturales y/o yerbazal	0.22	0.19	0.60
Granos básicos	0.40	6.62	21.47
Granos básicos	0.40	0.30	0.96
Hortaliza - ornamental	0.83	8.93	28.97
Hortaliza - ornamental con riego	0.83	0.64	2.07

7.3.5. Factor de prácticas de conservación de suelos (Factor P)

Para este factor se consideró un valor de uno; ello, en virtud de que en el área objeto de estudio no se realizan prácticas de conservación de suelos en extensiones considerables.

7.3.6. Estimación del riesgo de erosión por medio de la ecuación universal de pérdidas de suelo -USLE-

Con los valores de los factores descritos anteriormente, se efectuó un análisis espacial por medio de los SIG, utilizando el programa ArcGIS 9.2; mediante la aplicación de la herramienta Map Álgebra de la extensión Spatial Analyst, se operó la multiplicación de los factores, siguiendo la fórmula:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

El resultado obtenido se reclasificó en cuatro grupos empleando el método de clasificación de ArcGIS “Natural Breaks”, el cual está basados en la fórmula estadística de optimización de Jenks; realizándose agrupaciones naturales inherentes a los datos, identificando los puntos de rotura con valores similares,

así como maximizando las diferencias entre clases cuyos datos principales se resumen en el cuadro 31.

Cuadro 31. Resultados Riesgo a Erosión USLE, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión	Área Km²	Porcentaje de Área
BAJO	17.09	55.44
MEDIO	6.00	19.46
ALTO	5.73	18.60
MUY ALTO	2.43	7.89

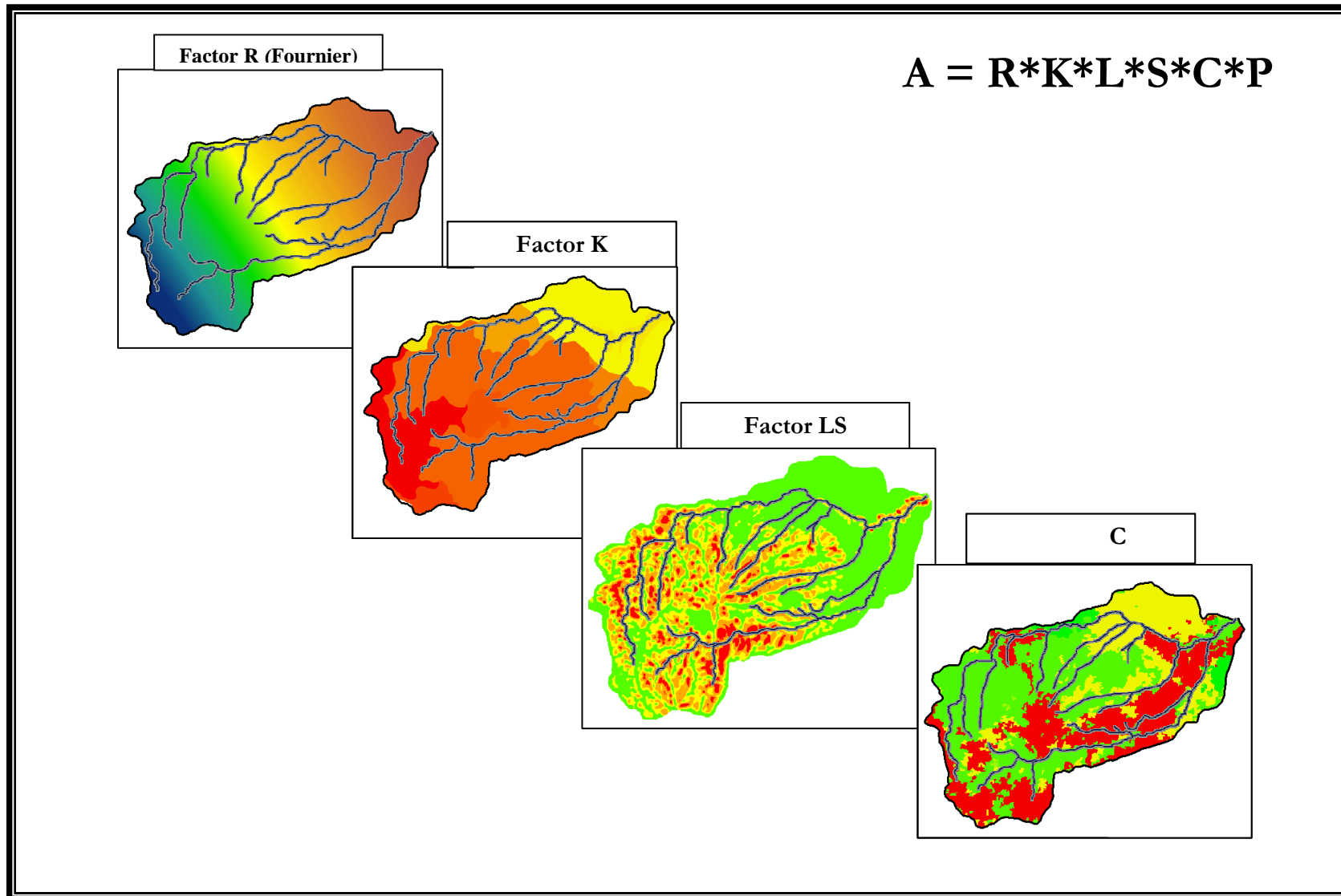


Figura 18. Procedimiento y productos parciales Riesgo a Erosión, por la Metodología USLE.

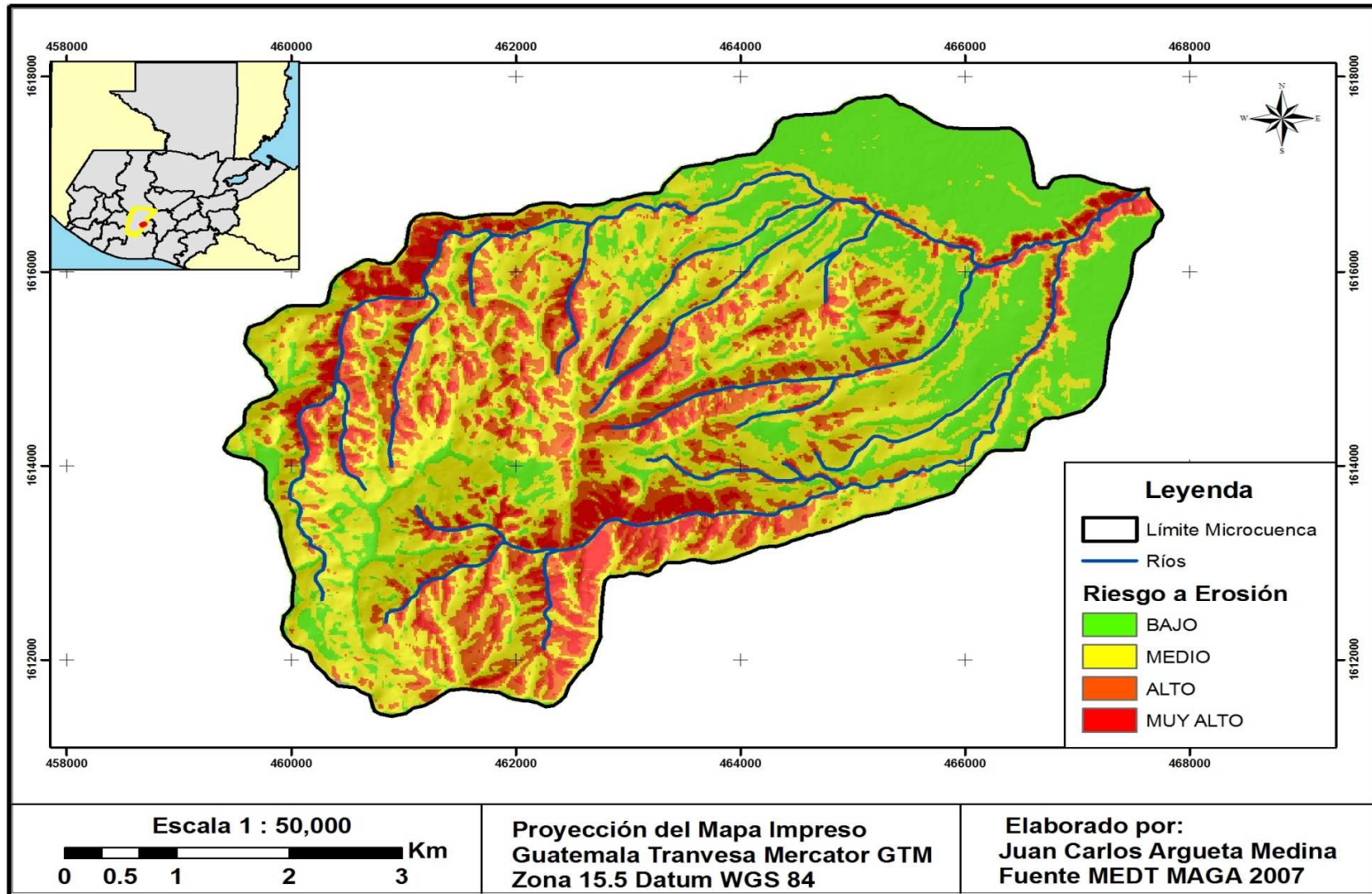


Figura 19. Mapa de Riesgo a Erosión en la Microcuenca del río Negro, por la Metodología USLE.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. Análisis de similitud entre las tres metodologías aplicadas

Con la finalidad de establecer la similitud de las tres metodologías utilizadas para la estimación de los riesgos y/o niveles de erosión hídrica de los suelos, se realizó un análisis de similitud por medio de la herramienta “Intersect de Analysis Tools” de ArcGIS 9.2, con la cual se aplicó una intersección geométrica de los tres shapes resultantes de cada metodología.

Al comparar las tres metodologías (Almorox, LEAM y USLE), se puede observar que el grado de similitud es muy bajo, ya que las tres concuerdan únicamente en un 9.36% de área (figura 19); es decir, que la ubicación de las clases de riesgo a erosión de cada una de las metodologías se encuentra en áreas diferentes. En un 90.64% del área de la cuenca. Esto lo ilustra el cuadro 32.

Cuadro 32. Análisis de similitud entre las tres metodologías aplicadas, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	1.00	3.26
MEDIO	0.93	3.03
ALTO	0.35	1.14
MUY ALTO	0.60	1.94
AREAS SIN SIMILITUD	27.94	90.64

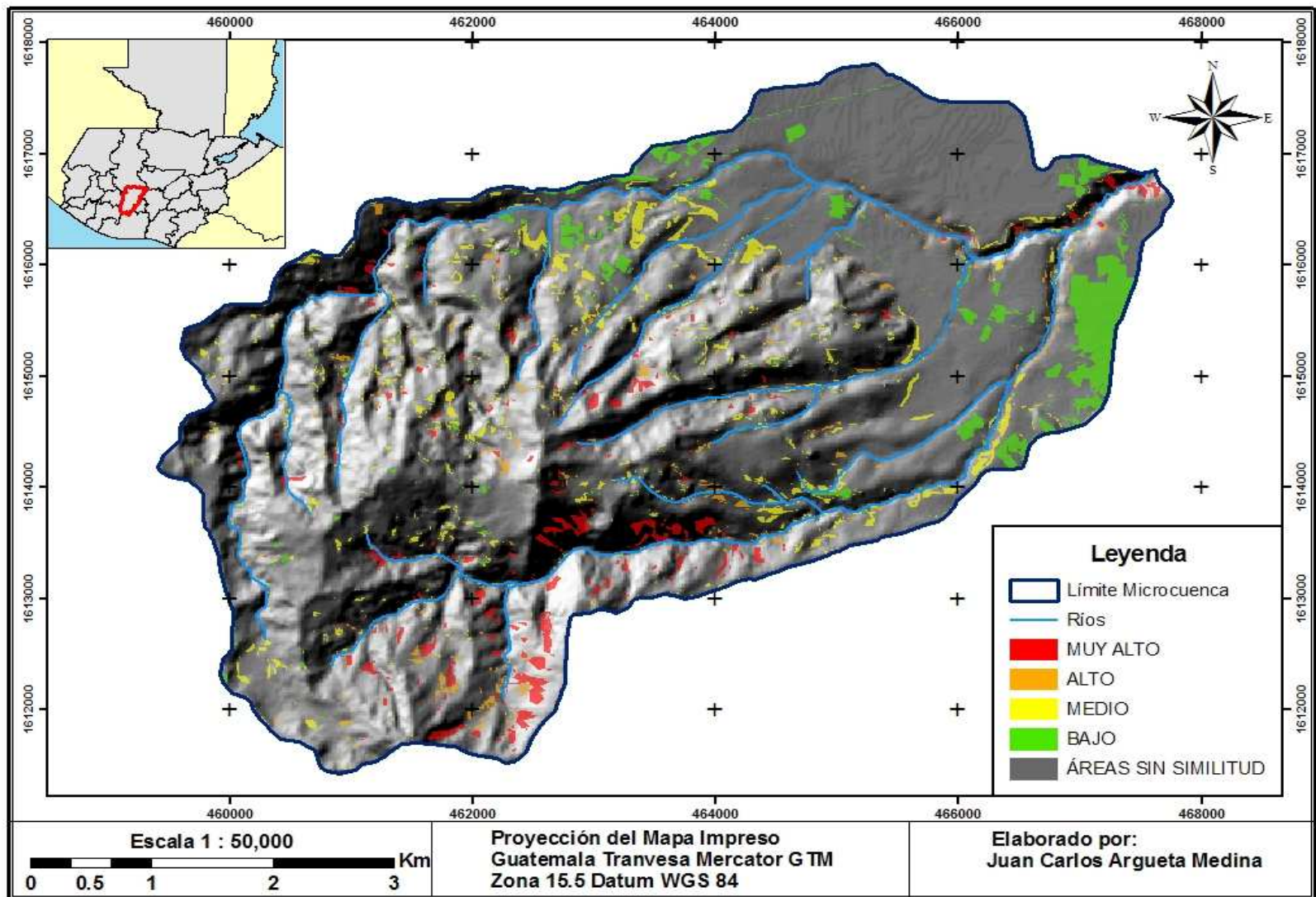


Figura 20. Análisis de similitud de las tres metodologías aplicadas, microcuenca río Negro, 2007.

Al comparar las tres metodologías y analizar el bajo porcentaje de similitud que existe entre ellas, fue necesario analizar cada uno de los factores que se aplican por metodología, los cuales se muestran en el (cuadro33).

Cuadro 33. Factores utilizados en la aplicación de cada metodología para estimar el riesgo a erosión

Metodología propuesta por Almorox	Metodología LEAM	Metodología USLE
Índice de Fournier	Índice de Fournier	Índice de Fournier
Pendientes	Pendientes (Factor LS)	Pendientes (Factor LS)
Textura	Factor K	Factor K
Profundidad		Cobertura del Vegetal (Factor C)
Capacidad de Uso de la Tierra		Factor P = 1
Cobertura Vegetal		

El factor en común entre las tres metodologías es el índice de Fournier, para estimar la erosividad de la lluvia; sin embargo, en la aplicación de cada metodología: Almorox y LEAM, cada una de éstas agrupa en clases los valores de IF, asignándole a toda la microcuenca un único valor de 3. Esto equivale a riesgo a erosión Alto, en el caso de Almorox, y de subclase de erosividad R3, equivalente a un riesgo de erosividad moderada en el caso de LEAM, por los valores de IF de la microcuenca del Río Negro.

Por lo tanto, en ambas metodologías asignan un único valor a toda la microcuenca, lo que no incide en las diferencias que podemos observar; no obstante, en el caso de USLE, como se efectuó un análisis espacial raster por medio de los SIG, el resultado obtenido se reclasificó en cuatro clases, aplicando el método de clasificación de ArcGIS “Natural Breaks”, el cual está basado en la fórmula estadística de optimización de Jenks, con la que se realizaron agrupaciones naturales inherentes a los datos, identificando los puntos de rotura con valores similares y maximizando las diferencias entre clases cuyos datos principales; con lo cual las áreas en el índice de Fournier se distribuyen de forma diferente.

Es importante resaltar que la metodología LEAM no contempla dentro de sus factores el efecto de la cobertura vegetal para determinar el riesgo a erosión, lo que determina una gran diferencia, en comparación con las otras metodologías aplicadas.

8.1.1. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-USLE

Al realizar el análisis de similitud existente entre las metodologías de Almorox y USLE, se determinó que ésta (la similitud) entre cada una de las clases de riesgo a erosión es, dado que solo el 28.02% del área total de la microcuenca presenta similitudes en las clases de riesgo a erosión, como lo ilustra el cuadro 34.

Cuadro 34. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-USLE

Riesgo a Erosión	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	1.13	3.68
MEDIO	5.83	18.91
ALTO	1.04	3.37
MUY ALTO	0.64	2.07
ÁREAS SIN SIMILITUD	22.19	71.98

Las principales diferencias en la aplicación de estas metodologías se describen a continuación:

- En la aplicación de la metodología USLE se llevó a cabo un análisis raster, en el cual cada una de las celdas posee un comportamiento independiente, mientras que en Almorox se aplica un análisis vectorial con asignación de valores a las diferentes unidades paisajísticas.
- Almorox, para calcular los índices, agrupa de manera cualitativa los factores de incidencia en el riesgo o nivel de erosión. USLE calcula estos factores utilizando información cuantitativa.
- Los criterios en los que Almorox agrupa cada uno de los factores de riesgo a erosión están ya predeterminados, en tanto que en la forma aplicada por USLE éstos se basan en el empleo de Álgebra de mapas, de donde se obtienen resultados para cada una de las celdas, que posteriormente, se agrupan utilizando el método de clasificación de ArcGIS “Natural Breaks”, el cual está fundamentado en la fórmula estadística de optimización de Jenks, realizanco agrupaciones naturales inherentes a los datos.

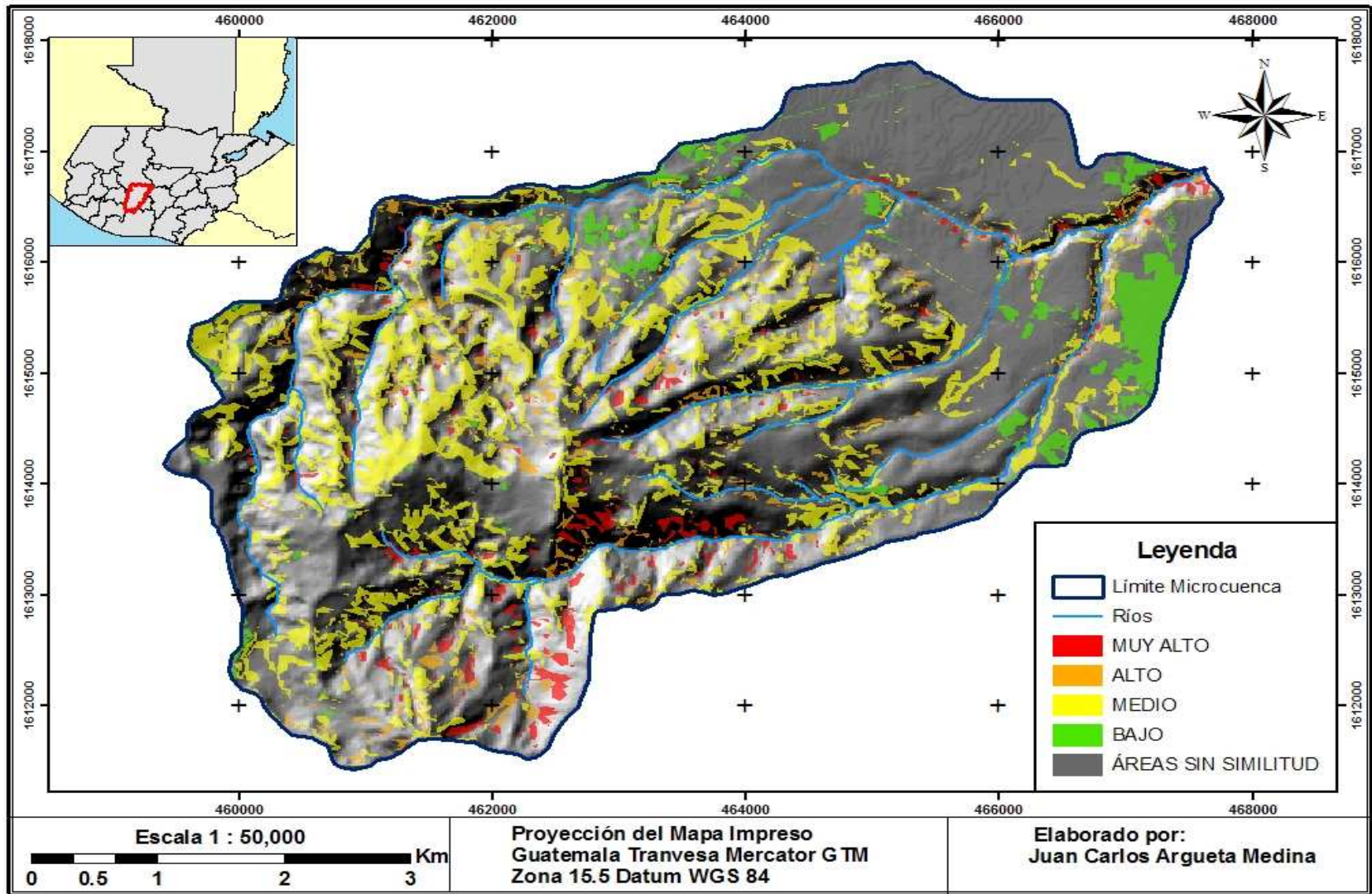


Figura 21. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías Almorox-USLE

8.1.2. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-LEAM

En el análisis de similitud en cuanto a la aplicación de las metodologías de Almorox-LEAM, se estableció que la similitud de las áreas con igual rango de riesgo a erosión entre ambas metodologías es baja, ya que solo un 32.34% del área total de la microcuenca concordó una metodología con la otra.

Cuadro 35. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-LEAM, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	1.26	4.10
MEDIO	1.51	4.91
ALTO	2.62	8.48
MUY ALTO	4.58	14.84
AREAS SIN SIMILITUD	20.86	67.66

Existen dos grandes diferencias entre las metodologías LEAM y Almorox siendo estas:

La metodología LEAM no considera el factor de cobertura vegetal para determinar la erosión de suelos por lo que esto influye en los valores que presentan una metodología con la otra, mientras que los factores que utiliza Almorox son los que inciden directamente en los cambios de categorías de las áreas; si se observan las áreas de riesgo que presenta Almorox sin tomar en cuenta aun el factor de la cobertura vegetal, las áreas son muy similares a las que presenta el riesgo a erosión de la metodología LEAM sin embargo al aplicar el factor de cobertura se observa como las área de riesgo cambian considerablemente y es acá donde se da la principal diferencia.

La forma en agrupar los rangos de pendientes entre las metodologías es diferente lo que contribuye a que exista diferencias entre ambas.

La erodabilidad del suelo en LEAM utiliza únicamente el factor K mientras que en Almorox se toma en cuenta la profundidad y la pedregosidad del suelo

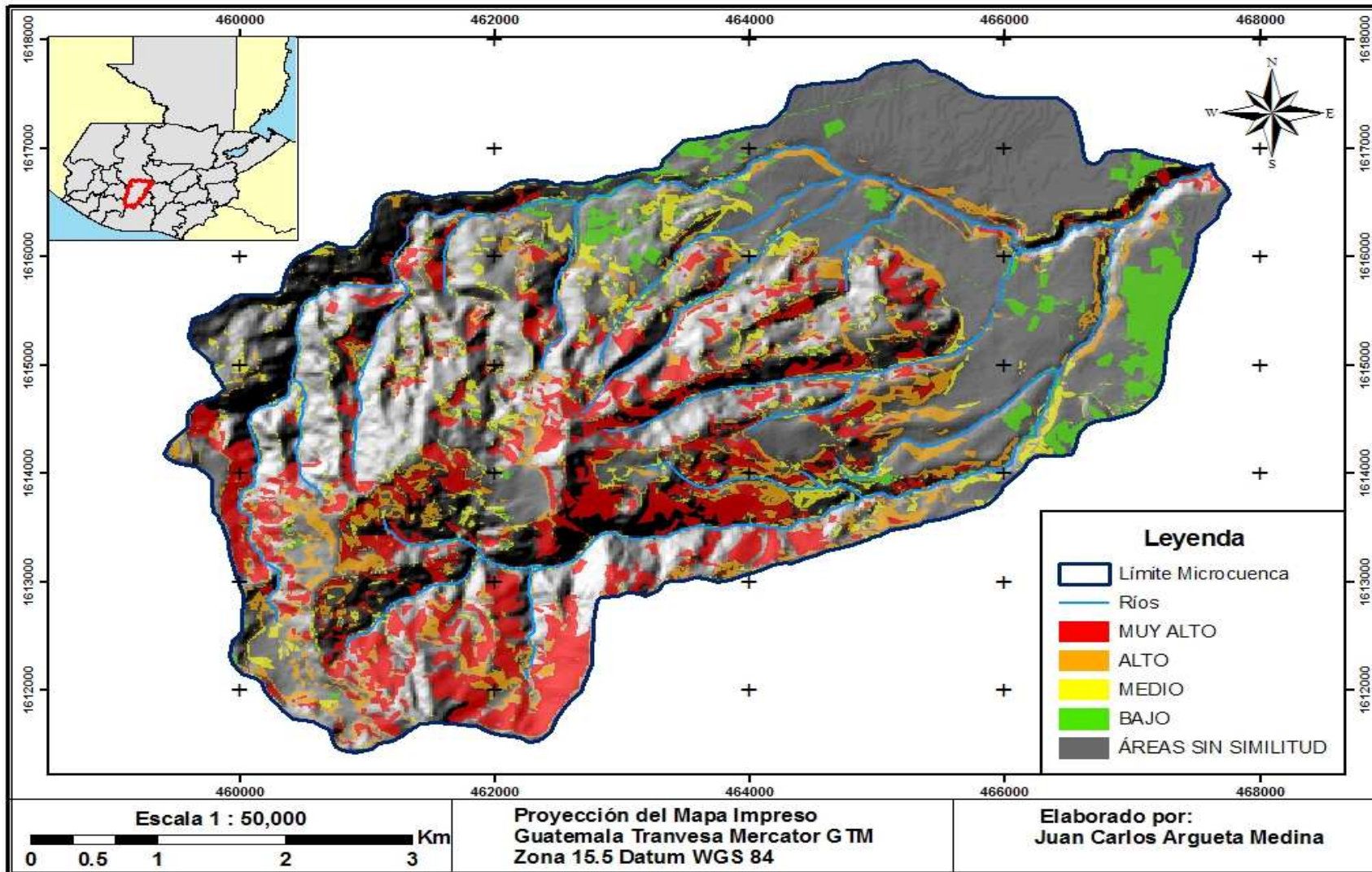


Figura 22. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías Almorox-LEAM

8.1.3. Análisis de similitud entre las metodologías USLE-LEAM

Al realizar el intersect entre los mapas, se determinó que el porcentaje de los niveles de erosión hídrica de los suelos aportado por ambas metodologías es bajo, dado que el 38.76% del área total de la microcuenca en estudio presenta similitudes. Algo que es importante resaltar es que, entre todos los análisis efectuados, la comparación LEAM-USLE es la que mayor porcentaje de áreas similares presenta.

Cuadro 36. Análisis de similitud entre las metodologías USLE-LEAM, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	6.07	19.68
MEDIO	2.67	8.65
ALTO	0.84	2.73
MUY ALTO	2.37	7.69
AREAS SIN SIMILITUD	18.88	61.24

Las diferencias entre las metodologías comparadas se deban principalmente a que LEAM no contempla el facto de cobertura vegetal

En la aplicación de la metodología USLE se utilizó un análisis raster en el cual cada una de las celdas posee un comportamiento independiente mientras que LEAM aplica un análisis vectorial con asignación de valores a las diferentes unidades paisajísticas con agrupaciones de rangos para cada una de las clases de erosión.

Otra observación que presenta esta comparación es que se obtuvieron datos complementarios, fundamentalmente en el sentido que USLE aporta información más precisa para el riesgo o nivel de erosión bajo y Leam proporciona esta información más precisa para el riesgo o nivel de erosión muy alto.

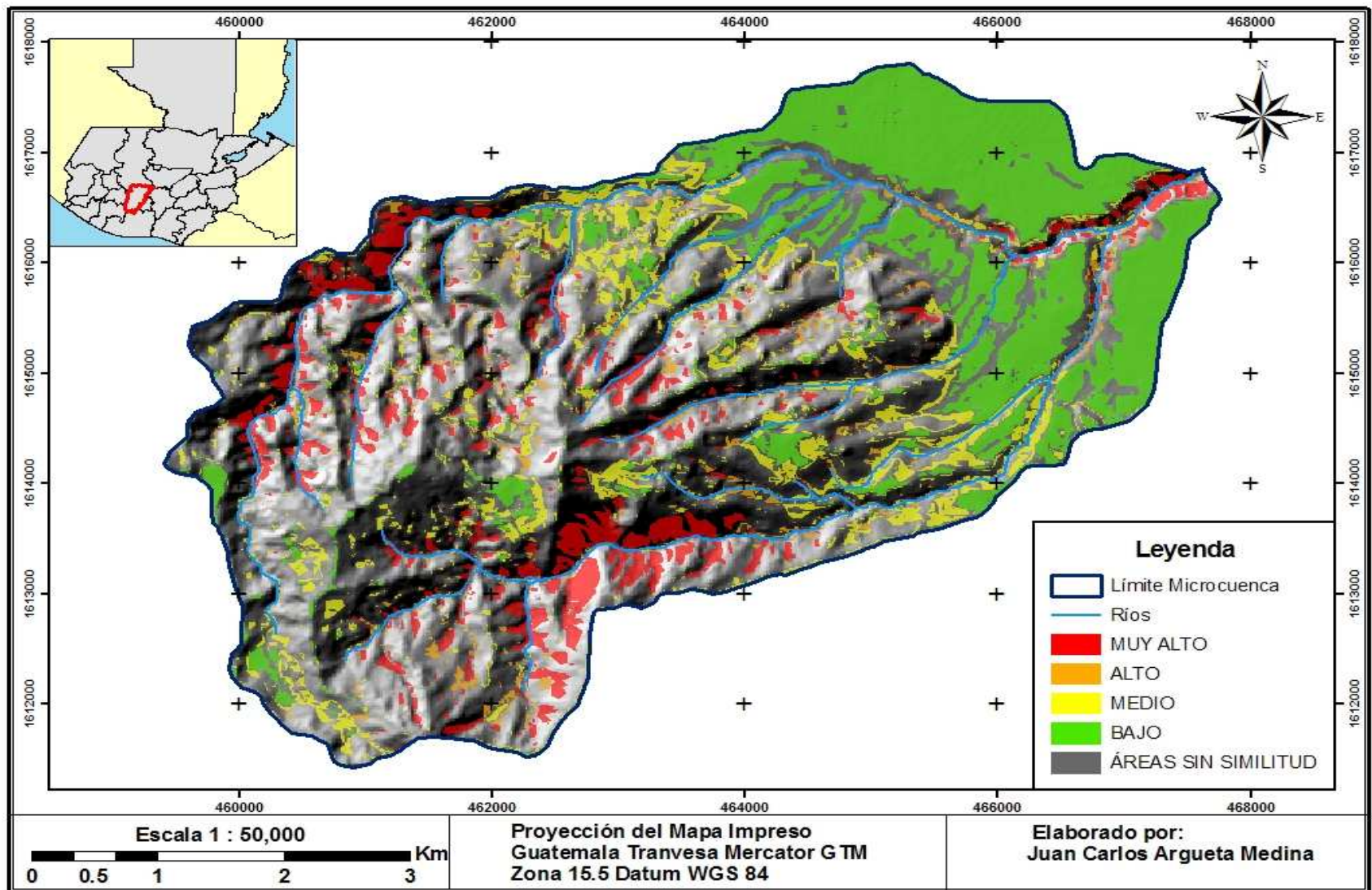


Figura 23. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías USLE-LEAM

8.2. Análisis de la cobertura vegetal para determinar el riesgo a erosión

Al momento de analizar en cada metodología los factores que se emplean para establecer el riesgo de erosión en la microcuenca del río Negro, perteneciente a la subcuenca del río Guacalate, se determinó que los factores en común son la pendiente, el índice de founier, textura y profundidad. Sin embargo, Almorox y USLE toman en cuenta un factor que LEAM no aplica: la cobertura vegetal. Es de resaltar la importancia que representa este factor, en virtud de que actúa directamente en los siguientes aspectos del suelo:

- Aumenta la infiltración de la lluvia
- Reduce la pérdida de humedad por evaporación
- Aumenta la humedad disponible
- Disminuye la temperatura
- Aumentar el contenido de materia orgánica
- Incrementa la capacidad de retención de humedad del suelo
- Reducir la escorrentía.

Con base en los aspectos mencionados, en los cuales interviene directa o indirectamente la cobertura vegetal, y la relación que existe entre éstos y la erosión de los suelos, resultó la siguiente reflexión: ¿Qué tan influyente es el factor cobertura vegetal, para determinar el riesgo a erosión del suelo?

Se realizó el análisis de similitud de las tres metodologías aplicadas omitiendo el factor C (cobertura vegetal), para determinar qué tan similares son las metodologías en estudio y qué tan influyente es el factor cobertura vegetal al determinar el riesgo a erosión del suelo en una microcuenca.

Los resultados así como el análisis de las comparaciones se presentan a continuación:

8.2.1. Análisis de similitud entre las tres metodologías aplicadas, sin utilizar el factor de la cobertura vegetal

Al realizar el análisis de similitud de los tres mapas de riesgo a erosión de las metodologías aplicadas, omitiendo el factor de cobertura vegetal, se estableció que el grado de similitud es bajo, ya que tan sólo el 22.94 % del área total de la microcuenca en estudio presenta similitudes; cuadro 37; es decir, que clases de riesgo a erosión de cada una de las metodologías se encuentran ubicadas en áreas diferentes. (Figura 24).

Cuadro 37. Análisis de similitud entre las tres metodologías aplicadas sin cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	3.87	12.54
MEDIO	0.14	0.45
ALTO	0.65	2.11
MUY ALTO	2.42	7.84
ÁREAS SIN SIMILITUD	23.76	77.06

Al igual que en la comparación inicial en la cual si se incluyó la cobertura vegetal, el grado de similitud es muy bajo, la metodología LEAM desde el inicio no incluye el factor C por lo que el aporte que el quitar este factor a las metodologías de Almorox y USLE no influye al analizar las tres metodologías juntas

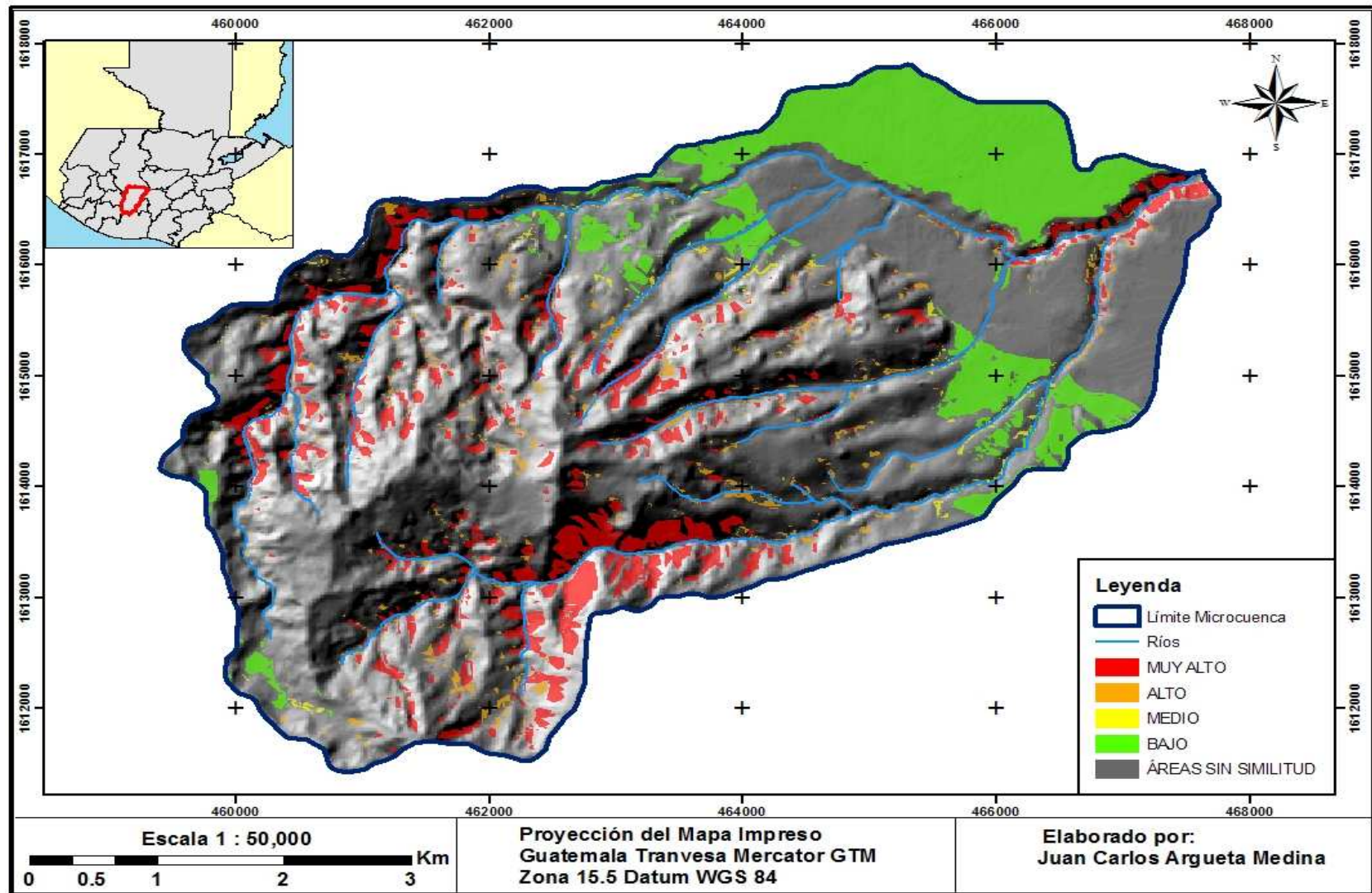


Figura 24. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías sin cobertura vegetal

8.2.2. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox y USLE sin utilizar el factor de la cobertura vegetal

En la siguiente comparación se analizaron los mapas resultantes de la aplicación de cada una de las metodologías, que no toman en cuenta la cobertura vegetal para determinar el nivel de erosión de los suelos (Almorox y USLE), los resultados determinaron que el grado de similitud es bajo, solamente en un 28.64% del total de las clases de Riesgo de Erosión de cada metodología, concordó una con la otra.

Cuadro 38. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-USLE, sin cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	4.57	14.83
MEDIO	0.51	1.65
ALTO	1.24	4.01
MUY ALTO	2.51	8.14
ÁREAS SIN SIMILITUD	22.00	71.36

Existen dos grandes diferencias al momento de aplicar estas dos metodologías que pueden influir en la baja similitud existente entre las mismas.

La clasificación de las pendientes es muy diferente en ambas metodologías ya que al aplicar el factor LS en USLE da categorías diferentes a las agrupaciones por rangos que presentan Almorox y LEAM

El análisis raster utilizado en USLE aplicando algebra de mapas de cada uno de los factores en comparación con el análisis vectorial que aplica Almorox nos da otra gran diferencia que es necesario evaluar mas a profundidad.

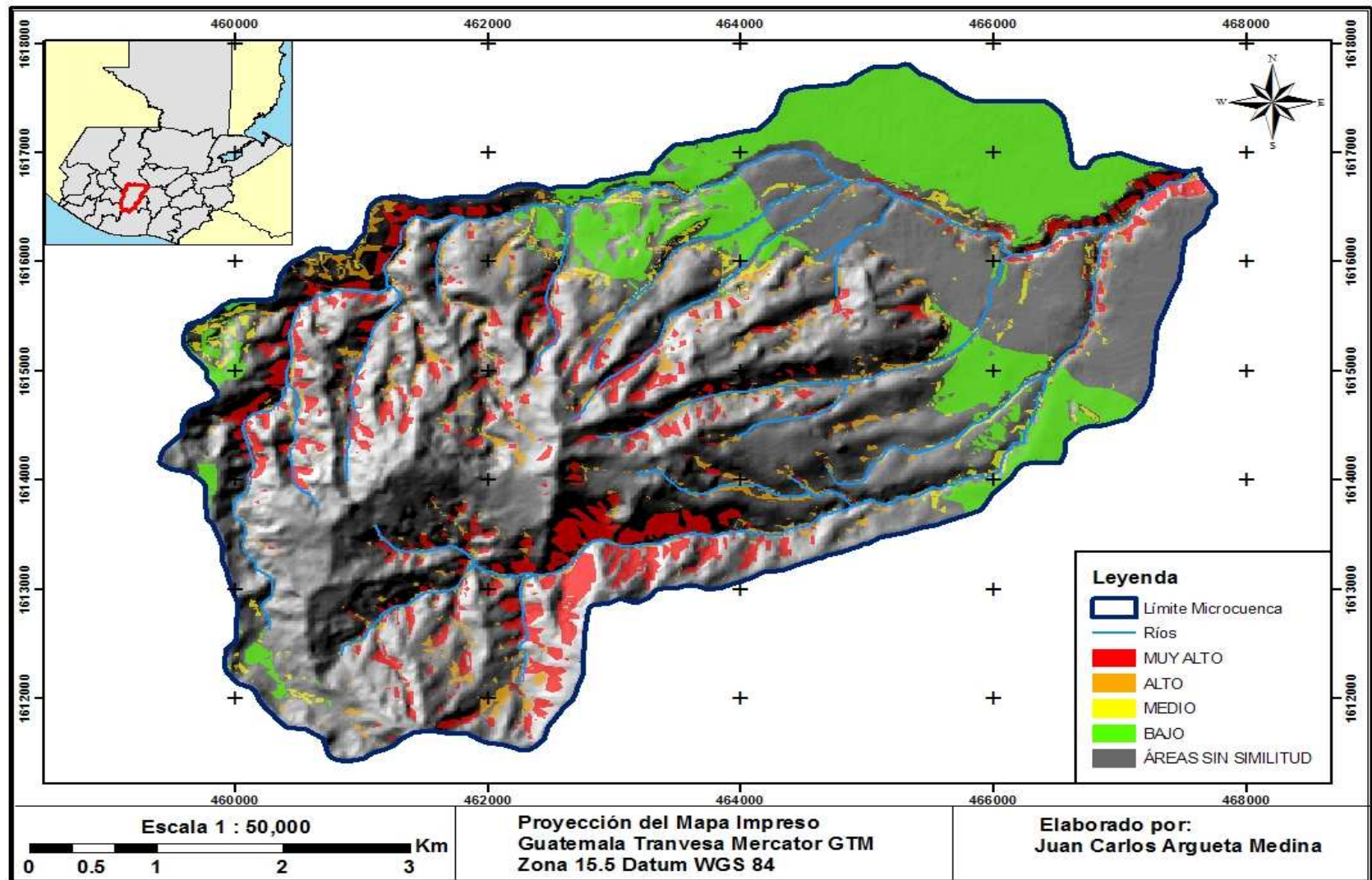


Figura 25. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías Almorox-USLE sin cobertura vegetal

8.2.3. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-LEAM, sin cobertura vegetal

En este análisis se realizó la intersección de mapas de las metodologías de Almorox y de LEAM, omitiendo en Almorox el factor cobertura vegetal, en donde se estableció que la comparación presenta un rango de similitud alto, consistente en 67.66% del área total. Esto obedece a que ambas metodologías son muy similares al momento de analizar los datos, ya que aplican el análisis vectorial al momento de realizar el algebra de mapas y, aun más, al omitir en Almorox el factor cobertura vegetal.

Cuadro 39. Análisis de similitud entre las metodologías Almorox-LEAM sin cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	3.97	12.89
MEDIO	0.67	2.16
ALTO	3.69	11.98
MUY ALTO	12.52	40.62
AREAS SIN SIMILITUD	9.97	32.34

Con esta comparación se pueden distinguir que categorización que la metodología de Almorox le asigna a las categorías de cobertura vegetal es el principal factor para que no exista similitud entre las metodologías

El 32.34% de áreas de sin similitud entre las metodologías se ve afectado en primer lugar por la agrupación de clases de pendientes ya que en ambas metodologías se agrupan los rangos diferentes; LEAM no toma en cuenta la profundidad del suelo y de de los factores propios del suelo LEAM toma en cuenta estructura y permeabilidad, las cuales no se consideran en la metodología Almorox.

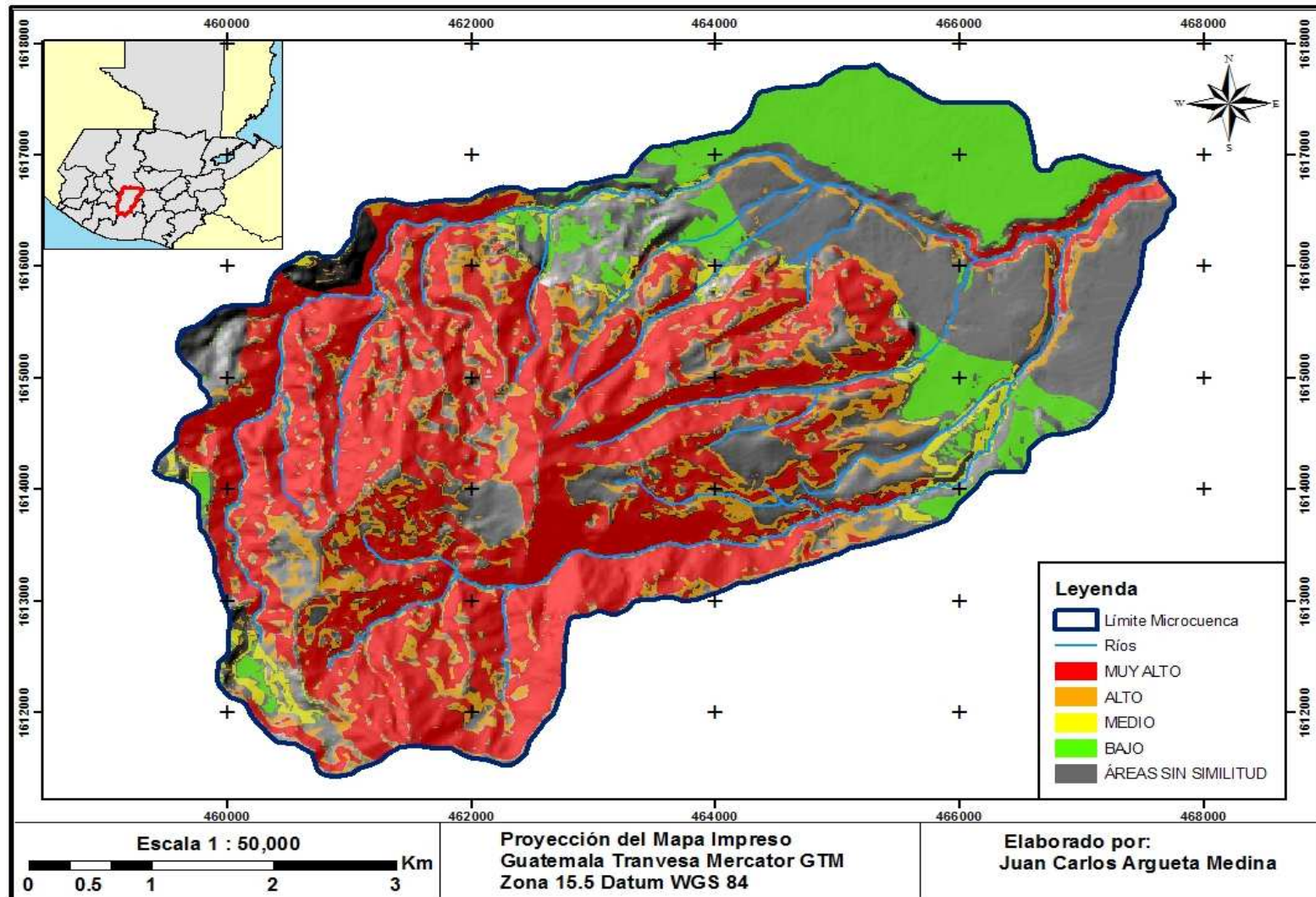


Figura 26. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías Almorox-LEAM sin cobertura vegetal

8.2.4. Análisis de similitud entre las metodologías de USLE-LEAM sin cobertura vegetal

Al analizar los mapas resultantes se determinó que el porcentaje de similitud de los niveles de erosión hídrica de los suelos en ambas metodologías es bajo, representado en el 37.89 % del área total de la microcuenca en estudio.

Cuadro 40. Análisis de similitud entre las metodologías USLE-LEAM, sin cobertura vegetal, microcuenca río Negro, 2007.

Riesgo a Erosión	Área Km ²	Porcentaje de Área
BAJO	7.29	23.66
MEDIO	0.86	2.79
ALTO	0.96	3.11
MUY ALTO	2.57	8.34
ÁREAS SIN SIMILITUD	19.15	62.11

Al realizar la comparación de metodologías sin tomar en cuenta el factor de cobertura los datos son muy similares a la comparación anterior en donde si se tomaba en cuenta dicho factor, por lo que se puede concluir que las diferencias entre estas dos metodologías se deben principalmente al tipo de análisis utilizado así como a la aplicación de cada una de las variables.

En esta comparación se mantiene la complementariedad de los datos, fundamentalmente en el sentido que USLE aporta información más precisa para el riesgo o nivel de erosión bajo y LEAM proporciona esta información más precisa para el riesgo o nivel de erosión muy alto.

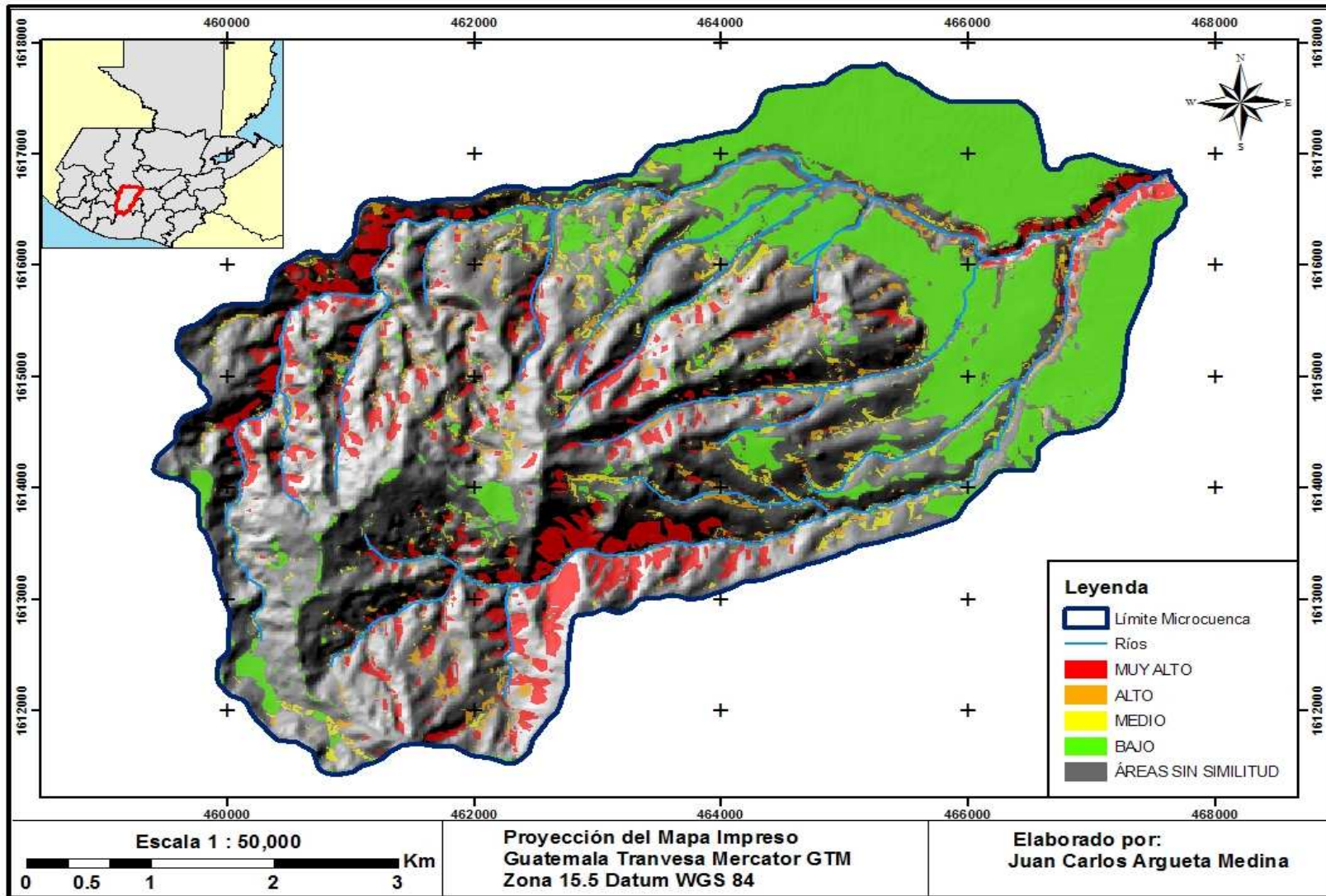


Figura 27. Resultado de la comparación de áreas en común entre las metodologías USLE-LEAM sin cobertura vegetal

9. CONCLUSIONES

- 9.1 Al aplicar la metodología propuesta por Almorox, se estimó el riesgo a erosión. En cuanto al riesgo de erosión el 45.46% de la microcuenca es muy alto y alto, que se localiza principalmente en la parte media y alta de la microcuenca, mientras que el 47.3% del área de la microcuenca presentó un riesgo medio. Lo anterior debido al efecto de la cobertura vegetal como capa protectora del suelo.
- 9.2 Cuando se usa la metodología LEAM, el riesgo a erosión presenta el 43.54% del total del área de la microcuenca dentro de la clase de erosión E4 (rango de erosión arriba de 15t/ha-año); la cual se clasifica en riesgo a erosión muy alto; esta clase se localiza en las partes media y alta de la microcuenca. Estos datos están influenciados porque la metodología LEAM no considera la cobertura vegetal..
- 9.3 La pérdida de suelo por la metodología USLE se transformo a valores cualitativos de riesgo con fines comparativos. Los resultados indican que el 55.44% del total del área de la microcuenca con tasas de erosión menores de 16t/ha-año; lo cual la ubica con un riesgo a erosión bajo. Por otro lado únicamente un 7.8% (2.43 Km²) presenta riesgo muy alto a la erosión (mayor de 16t/ha-año).
- 9.4 De acuerdo al análisis de similitud entre las tres metodologías, únicamente un 9.36% del área de la microcuenca muestra coincidencias en cuanto a los riesgos a erosión. Por lo que se concluye que no existe similitud entre las metodologías utilizadas. Se considera que este hecho se debe a la aplicación del factor de cobertura vegetal. Lo anterior se sustenta en la similitud entre Almorox y LEAM (70%) ya que esas metodologías no utilizan el factor mencionado

10. RECOMENDACIONES

- 10.1 Para efectos de estimar el riesgo a erosión en una microcuenca como las del altiplano central, se recomienda utilizar metodologías como las propuestas por Almorox o LEAM; esta recomendación se hace, tomando en cuenta que es más fácil su implementación y los factores utilizados están más accesibles en muchos casos, siempre y cuando se cuente con la información hidrometeorológica necesaria.
- 10.2 Que entidades tales como el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación así como las distintas entidades que realicen procesos de investigación en Guatemala profundicen en el estudio de la cobertura vegetal y su incidencia en la erosión, con el fin de poder contar con índices que se adapten a cada una de las regiones de nuestro país, de tal forma que sea necesario adaptar valores de otros países que influyan al momento de aplicar cualquier metodologías para evaluar la erosión.
- 10.3 Se recomienda a entidades tales como IINSIVUMEH, MARN, MAGA (poner nombres completos) así como a los diferentes centros de investigación, considerar entre las prioridades, la generación de información climática, hidrométrica y edáfica que contribuya a alimentar modelos permitan explicar el comportamientos de determinados fenómenos como el escurrimiento superficial y la erosión de los suelos en Guatemala.
- 10.4 Evaluar a más profundidad la diferencia en la aplicación del análisis vectorial y el análisis raster cuando se utilizan los sistemas de información geográfica –SIG- en las metodologías, para estimar la erosión.
- 10.5 A las Universidades y Centros de Investigación de Guatemala, que promuevan la investigación interdisciplinaria, especialmente en temas tales como la erosión, de tal forma que se puedan hacer evaluaciones de modelos y que en algún momento se pueda contar con nuevos modelos que se ajusten mejor a las características biofísicas y socioeconómicas de Guatemala.

11. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar Marroquín, SD. 1987. Uso actual del recurso forestal de la subcuenca del río Itzapa, Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 71 p.
2. Almorox A, J *et al.* 1994. Métodos de estimación de la erosión hídrica. Madrid, Editorial Agrícola Española. 152 p.
3. Asce.org. 1976. Sedimentation engineering. Ed. VA Vanoni. US, American Society of Civil Wngineering. (Manuals and Reports on Wngineering Practice). Consultado 12 dic 2003. Disponible en <http://www.pubs.asce.org/cedbsrch.html>
4. De Antonio, R. 1994. Evaluación de la erosión hídrica mediante sistemas de información geográfica: aplicación a la comunidad de Madrid. Tesis PhD. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid. 85 p.
5. ESRI (Environmental Systems Research Institute, US). 2001. Using ArcView GIS 2001. US. 340 p.
6. FAO, IT. 1994. Erosión de suelos en América latina. Italia. Consultado 17 mayo 2004. Disponible en <http://www.fao.org>
7. FAO, IT. 2005. Estudio de vulnerabilidad y riesgo para actividades productivas y erosión por tipo de cultivo en la microcuenta Piuray-Corimarca. 44 p. Consultado 17 mayo 2008. Disponible en <http://www.fao.org>
8. Figueroa Sandoval, B. 1976. Pérdida de suelos y nutrientes y su relación con el uso del suelo en la cuenca del río Texcoco. Tesis MSc. Montecillo, Chapingo, México, Colegio de Postgraduados de Chapingo. 209 p.
9. _____. 1979. A study of the physical stability of soil aggregates and its relevance to water erosion. Thesis PhD. Australia, University of Sydney. 249 p.
10. Figueroa S, B *et al.* 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Chapingo, México, Colegio de Postgraduados de Chapingo. 150 p.
11. Gallego Álvarez, FJ; Cobo Collado, MD; Navarrete Cámara, LJ; Valderrama Zafra, JM; Jiménez, Espinoza, R. 2002. Determinación de riesgos de erosión

- en la comarca olivarera de “Sierra Mágina” (JAÉN) mediante técnicas SIG y teledetección. Santander, España, Ingegraf. 59 p.
12. González Figueroa, A. 1994. Determining agricultural soil erosion and conservation in a mountain watershed in Guatemala. Thesis PhD. Fort Collins, Colorado, US, Colorado State University. 95 p.
 13. Henry, D. 1986. Fundamentos de la ciencia del suelo. 2 ed. México, CECSA. 433 p.
 14. Hernández Guzmán, MIM. 1999. Evaluación del riesgo potencial de erosión hídrica de la cuenca del río Budi. Tesis Lic. RN. Chile, Universidad Católica de Temuco. 85 p.
 15. INE (Instituto Nacional de Estadística, GT). 2003. XI censo nacional de población y VI de habitación 2002. Guatemala. 1 CD.
 16. Kirkby M, J; Morgan, RPC. 1994. Erosión de suelos. 3 ed. México, Limusa. 375 p.
 17. Laws, JO; Parson, DA. 1943. The relationship of raindrop size to intensity. US, Trans. Am. Geophys. 452 p.
 18. Lineros Luengo, CA. 1999. Evaluación de riesgos de erosión potencial y real a través del modelamiento en sistemas de información geográficos en la cuenca del río Collins. Tesis Ing. Fortal. Chile, Universidad Católica de Temuco. 95 p.
 19. MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT). 2002. Atlas temático digital de la república de Guatemala. Guatemala. 127 p.
 20. McCool, D, K *et al.* 1989. Slope length an steepness factors (LS) in the revised universal soil loss equation. Arizona, US, USDA, Agricultural Research Service. 131 p.
 21. Motta Franco, EL. 1999. Estudio de la erosión hídrica del suelo, microcuenca del río Itzapa, Chimaltenango, de 1994 a 1996. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC. 98 p.

22. National Soil Erosion-Soil Productivity Research Planning Committee, US. 1981. Soil erosion effects on soil productivity: a research perspective. *Journal Soil and Water Conservation* 36(2):82-90. 145 p.
23. NCGIA (National Center for Geographic Information and Analysis, US). 1990. Introduction to GIS. Santa Barbara, California, US, National Center for Geographic Information and Analysis. 85 p.
24. PCEG (Proyecto de Cuencas Estratégicas de Guatemala, GT). 2000. Plan de manejo subcuenca del río Pensativo-alto Guacalate Guatemala. Guatemala, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Programa de Emergencia por Desastres Naturales –PEDN-. 230 p.
25. Quince Claude Ayres, CE. 1936. Soil erosion and its control. New York, McGraw-Hill Book. 236 p.
26. Saavedra, CP. 2003. Evaluación y monitoreo de modelos de erosión y sedimentación a escala regional usando sensores remoto y SIG: caso de estudio en la región Andina. Investigación PhD. Holanda, ITC, Departamento de Recursos Hídricos. 117 p.
27. Sánchez Escoto, O. 1993. Determinación de áreas críticas mediante sistemas de información geográfica. Cuenca del río Reventado, CATIE, Costa Rica. 75 p.
28. Sánchez, M. 1979. Determinación de escurrimiento superficial y erosión en el suelo del área del proyecto de conservación de suelos Michatoya. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 54 p.
29. Shaxson, TF. 1981. Reconciling social and technical needs in conservation work on village farmlands. *In* Morgan, RPC (ed.). Soil conservation: problems and prospects. US, Willey. 397 p.
30. Suárez de Castro, F. 1979. Conservación de suelos. 3 ed. San José, Costa Rica, IICA. 315 p.
31. Tobías, H; Lira, E. 2001. Primera aproximación al mapa de clasificación taxonómica de los suelos de la república de Guatemala, escala 1:250,000. Guatemala, MAGA / UPIE / PAFG / INAB / BID. 1 CD.