

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN
HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO ILAVE UTILIZANDO
TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG”**

TESIS

PRESENTADO POR:

Bach. ULISES CCAMA TICONA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Puno - Perú

2012

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“ESTIMACIÓN DE LA PERDIDA DE SUELO POR EROSIÓN
HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO ILAVE UTILIZANDO
TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG”**

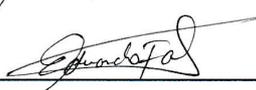
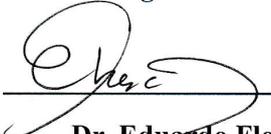
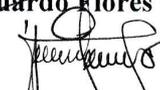
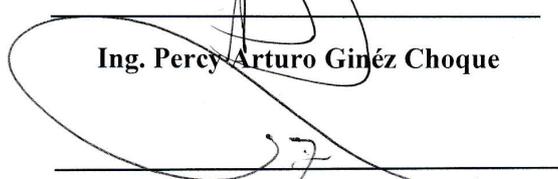
TESIS PRESENTADO POR:

BACH. ULISES CCAMA TICONA

PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO:

PRESIDENTE	:	 _____
		M.Sc. Ing. Alberto Pílares Huallpa
PRIMER JURADO	:	 _____
		Ing. Germán Belizario Quispe
SEGUNDO JURADO	:	 _____
		M.Sc. Ing. Eduardo Flores Quispe
DIRECTOR DE TESIS	:	 _____
		Dr. Eduardo Flores Condori
ASESOR DE TESIS	:	 _____
		Ing. Percy Arturo Ginéz Choque
ASESOR DE TESIS	:	 _____
		M.Sc. Ing. Cayo Leónidas Ramos Taype

ÁREA : Ingeniería y Tecnología

TEMA: Geomática, aplicación de SIG

LÍNEA: Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

DEDICATORIA

Con cariño y gratitud eterna a mis queridos padres: Julio y Valentina. Quienes con su paciencia, sacrificios y desvelos me han guiado por este camino hasta alcanzar los objetivos más altos y hacer de mi un profesional.

Con el más profundo reconocimiento a mis hermanos Luis Adolfo y Ofelia por haber sido un buen ejemplo a seguir y por brindarme apoyo, consejo y sabiduría cuando más lo necesite.

A mis hermanos: Regina, Virginia, Fredy, Edgar y Mary, que con su apoyo y paciencia me han dado la fuerza necesaria para seguir adelante, por la unión que tenemos y ese inmenso cariño y protección que nos brindamos mutuamente.

Con inmenso cariño a mis pequeños sobrinos; Lizeth Nayely, Luis Adolfo André y Jadhira Jamiley, por ser inspiración para mi continua superación.

AGRADECIMIENTO

Podría escribir innumerables páginas de agradecimiento nombrando a todas las personas que de alguna u otra manera formaron parte en esta maravillosa etapa de mi vida. Sé que es una tarea más que imposible, lo que me hará caer en omisiones lamentables. Desde ya pido las disculpas.

Agradezco a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno y a todos los catedráticos de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola que con el afán de servicio y de contribuir en la superación profesional, guiaron con éxito mi formación académica.

Al director de esta tesis Dr. Eduardo Flores Condori, por su ayuda, colaboración y su respaldo incondicional en todo el desarrollo de esta tesis.

Al M.Sc. Ing. Cayo Leonidas Ramos Taype, profesor asociado en el Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, y asesor de esta tesis, por su confianza y generosidad al compartir sus conocimientos, su apoyo constante y disposición a escucharme durante el desarrollo de esta tesis.

Mis más sinceros agradecimientos al Ing. Percy Arturo Ginéz Choque, asesor de esta tesis, quien con su comprensión, orientación, asesoría y sobre todo por su amistad brindada, supo apoyarme de forma decisiva para la culminación de este trabajo de investigación.

Agradezco a los miembros del jurado, M.Sc. Ing. Isidro Alberto Pilares Huallpa, Ing. Germán Belizario Quispe y M.Sc. Ing. Eduardo Flores Quispe, por sus orientaciones acertadas al trabajo de investigación, sin la cual el presente trabajo no habría alcanzado los resultados obtenidos.

A todos mis amigos y compañeros que de una u otra forma me acompañaron e hicieron posible la realización de este trabajo de investigación.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE CUADROS

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Justificación.....	7
1.4 Objetivos.....	8
1.4.1 Objetivo general.....	8
1.4.2 Objetivos específicos.....	8
II. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Cuenca hidrográfica.....	9
2.2 Erosión de suelos.....	9
2.2.1 Procesos de la erosión del suelo.....	9
2.2.2 Mecánica de la erosión del suelo.....	10
2.2.3 Factores que influyen en la erosión.....	11
2.2.4 Tipos de erosión hídrica.....	11
2.2.4.1 Erosión por salpicadura.....	11
2.2.4.2 Erosión laminar.....	12
2.2.4.3 Erosión en surcos.....	12
2.2.4.4 Erosión en cárcavas.....	12
2.2.4.5 Movimiento en masa.....	12
2.2.5 Niveles aceptables de erosión.....	13
2.3 Modelo de estimación de la erosión hídrica.....	13
2.3.1 Ecuación universal de pérdida de suelo USLE.....	13
2.3.1.1 Índice de erosión pluvial – R.....	15
2.3.1.2 Índice de erosionabilidad del suelo – K.....	16
2.3.1.3 Factores topográficos L y S.....	18
2.3.1.4 Factor cobertura vegetal – C.....	19
2.3.1.5 Factores de prácticas de conservación – P.....	19
2.4 Teledetección.....	20
2.4.1 Características de los datos de teledetección.....	20
2.4.2 Aplicaciones de la teledetección.....	21
2.4.3 Mecanismo para la obtención de datos de satélite.....	23
2.4.4 Radiación electromagnética.....	23
2.4.5 Espectro electromagnético.....	23
2.4.6 Bandas espectrales.....	24

2.4.6.1 Espectro visible.....	24
2.4.6.2 El infrarrojo.....	25
2.4.6.3 El infrarrojo próximo.....	25
2.4.6.4 El infrarrojo medio.....	25
2.4.6.5 El infrarrojo lejano o térmico.....	25
2.4.7 Microondas.....	25
2.5 Sensores espaciales.....	25
2.5.1 El satélite landsat.....	26
2.5.2 Bandas de imágenes del visible al infrarrojo medio.....	26
2.5.3 Combinaciones con las bandas del sensor landsat TM.....	28
2.5.3.1 Combinación en color natural: RGB 321 bandas 3-2-1.....	28
2.5.3.2 Combinaciones en falso color RGB.....	29
2.5.4 Técnicas de tratamiento digital de imagen.....	31
2.5.4.1 Correcciones radiométricas.....	31
2.5.4.2 Corrección geométrica.....	31
2.5.4.3 Mejoramiento espectral.....	32
2.5.4.4 Clasificación digital de la imagen.....	33
2.6 Sistemas de información geográfica SIG.....	38
2.6.1 Modelo de datos espaciales en un SIG.....	40
2.6.2 Ventajas y requerimientos de un SIG.....	40
2.7 Interpolación.....	41
2.7.1 Clasificación de los métodos de interpolación.....	42
2.7.1.1 Métodos de interpolación globales.....	42
2.7.1.2 Métodos de interpolación locales.....	43
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	44
3.1 Área de estudio.....	44
3.1.1 Cuenca del río Ilave.....	44
3.2 Materiales y equipos.....	46
3.2.1 Materiales y equipos de campo.....	46
3.2.2 Materiales y equipos de gabinete.....	46
3.2.3 Información cartográfica e imágenes de satélite.....	46
3.2.3.1 Cartografía.....	46
3.2.3.2 Imágenes landsat 5 TM.....	47
3.2.3.3 Datos de elevación digital SRTM.....	47
3.2.4 Precipitación.....	48
3.2.5 Suelos.....	50
3.3 Metodología.....	50
3.3.1 Fase preliminar.....	50
3.3.1.1 Recopilación de la información básica.....	50
3.3.1.2 Delimitación hidrográfica de la cuenca.....	50

3.3.1.3 Reconocimiento preliminar de la zona de estudio.....	53
3.3.2 Procesamiento de las variables.....	53
3.3.2.1 Factor “R” erosividad de las lluvias.....	55
3.3.2.2 Factor “LS”, topografía.....	56
3.3.2.3 Factor “C”, cobertura vegetal.....	58
3.3.2.4 Factor “K”, erosionabilidad del suelo.....	62
3.3.2.5 Factor “P”, prácticas de conservación de suelos.....	63
3.3.3 Integración de los factores.....	63
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
4.1 Procesamiento de las variables.....	64
4.1.1 Factor “R”, erosividad de las lluvias.....	64
4.1.2 Factor “LS”, topografía.....	66
4.1.3 Factor “C”, cobertura vegetal.....	68
4.1.3.1 Composición de bandas.....	68
4.1.3.2 Selección de bandas.....	68
4.1.3.3 Mosaico de imágenes.....	69
4.1.3.4 Corrección geométrica.....	70
4.1.3.5 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	70
4.1.3.6 Mejoras y realces.....	71
4.1.3.7 Clasificación no supervisada.....	71
4.1.3.8 Clasificación supervisada.....	73
4.1.4 Factor “K”, erosionabilidad del suelo.....	75
4.2 Erosión hídrica actual de la cuenca del río Ilave.....	78
4.3 Erosión hídrica actual por subcuencas.....	80
V. CONCLUSIONES.....	85
VI. RECOMENDACIONES.....	86
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	87
VIII. ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Proceso de erosión.....	10
Figura 2.2: Desprendimiento y arrastre de partículas.....	10
Figura 2.3: Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión.....	11
Figura 2.4: Abaco para la determinación gráfica del índice de erosionabilidad del suelo – K.....	18
Figura 2.5: Proceso de la teledetección.....	23
Figura 2.6: Espectro electromagnético.....	24
Figura 2.7: Sensores espaciales.....	25
Figura 2.8: Banda azul (TM 1).....	27
Figura 2.9: Banda verde (TM 2).....	27
Figura 2.10: Banda rojo (TM 3).....	27
Figura 2.11: Infrarrojo cercano (TM 4).....	27
Figura 2.12: Infrarrojo medio, 1.55 a 1.75 μm (TM 5).....	27
Figura 2.13: Infrarrojo medio, 2.08 a 2.35 μm (TM 7).....	28
Figura 2.14: Colores básicos para la combinación.....	28
Figura 2.15: Combinación en color natural Rojo (TM 3)=R, Verde (TM 2)=G, Azul (TM 1)=B.....	29
Figura 2.16: Combinación en falso color RGB, Infrarrojo Cercano (TM 4) = R, Rojo (TM 3) = G, Verde (TM 2) = B.....	30
Figura 2.17: Combinación en falso color RGB, Infrarrojo Medio (TM 7) = R, Infrarrojo Cercano (TM 4) = G, Verde (TM 2) = B.....	30
Figura 2.18: Método de clasificación del paralelepípedo.....	34
Figura 2.19: Método de clasificación de mínima distancia.....	35
Figura 2.20: Método de distancia de mahalanobis.....	36
Figura 2.21: Extensión a dos bandas del algoritmo de máxima probabilidad.....	38
Figura 2.22: Entrada de datos en un GIS.....	39
Figura 2.23: Modelo de datos raster y vectorial.....	40
Figura 3.1: Ubicación del área en estudio.....	45
Figura 3.2: Estaciones pluviométricas y polígono de thiesen en la cuenca Ilave.....	49
Figura 3.3: Diagrama de la metodología desarrollada.....	51
Figura 3.4: Delimitación de la cuenca hidrográfica del río Ilave a partir del DEM.....	54

Figura 3.5: Modelo espacial para obtener el mapa de factor de erosividad.....	56
Figura 3.6: Modelo espacial para obtener el mapa del factor topográfico LS.....	58
Figura 3.7: Modelo espacial para obtener los coeficientes de correlación.....	59
Figura 3.8: Algoritmo del índice de vegetación de diferencia normalizada – NDVI.....	61
Figura 3.9: Modelo espacial para evaluar la erosión hídrica.....	63
Figura 4.1: Distribución espacial de la erosividad de las lluvias (Factor – R).....	65
Figura 4.2: Mapa de pendientes.....	66
Figura 4.3: Distribución espacial del factor topográfico – LS.....	67
Figura 4.4: Representación de las bandas espectrales (banda 1, 2, 3, 4, 5 y 7) y composición en falso color (4/5/1 y 3/5/4).....	68
Figura 4.5: Mosaico de las escenas Landsat 2-71 y 2-72.....	70
Figura 4.6: Índice de vegetación de diferencia normalizada.....	71
Figura 4.7: Comparación del efecto de la modificación del contraste y brillo.....	71
Figura 4.8: Resultado de la clasificación no supervisada.....	72
Figura 4.9: Mapa de cobertura vegetal, Factor - C (Clasificación supervisada).....	74
Figura 4.10: Serie de suelos de la cuenca del río Ilave.....	76
Figura 4.11: Susceptibilidad de los suelos (Factor K).....	77
Figura 4.12: Distribución en porcentajes de los niveles de erosión.....	78
Figura 4.13: Mapa de erosión actual de la cuenca del río Ilave.....	79
Figura 4.14: Superficie con grados de erosión por subcuencas.....	82
Figura 4.15: Distribución espacial de la erosión actual por subcuencas.....	84

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Niveles de pérdida de suelos.....	13
Cuadro 2.2: Valores de C para cobertura vegetal.....	19
Cuadro 2.3: Factor P de prácticas de conservación.....	20
Cuadro 2.4: Características de las imágenes satelitales landsat 5 TM.....	26
Cuadro 2.5: Combinaciones en falso color RGB.....	29
Cuadro 3.1: Coordenadas geográficas de la cuenca del río Ilave.....	44
Cuadro 3.2: Cartas nacionales (IGN).....	46
Cuadro 3.3: Imágenes satelitales landsat 5 TM.....	47
Cuadro 3.4: Modelos de elevación digital.....	47
Cuadro 3.5: Estaciones meteorológicas.....	48
Cuadro 3.6: Valores de Pendiente (%) y m.....	57
Cuadro 4.1: Matriz de correlación y desviaciones estándar de la imagen landsat: 2-71..	68
Cuadro 4.2: Matriz de correlación y desviaciones estándar de la imagen landsat: 2-72..	68
Cuadro 4.3: Resultados del factor de índice óptimo de la escena 2-71.....	69
Cuadro 4.4: Resultados del factor de índice óptimo de la escena 2-72.....	69
Cuadro 4.5: Superficie ocupada por los tipos de cubierta vegetal.....	73
Cuadro 4.6: Valores del factor C.....	73
Cuadro 4.7: Características de las unidades de suelo en la cuenca del río Ilave.....	75
Cuadro 4.8: Superficie con grados de erosión de la cuenca del río Ilave.....	78
Cuadro 4.9: Pérdida de suelos en km ² y porcentaje para las subcuencas.....	81

RESUMEN

La Vertiente Hidrográfica del Lago Titicaca (lado peruano), de la cual forma parte la cuenca del río Ilave, se encuentra afectado por avanzados procesos de degradación de suelos, entre los cuales la erosión hídrica constituye uno de los más importantes y el más predominante. Según estudios realizados por INTECSA - AIC PROGETTI – CNR, en el año de 1993, indica que la erosión del suelo es uno de los problemas ambientales mas graves, y de más difícil solución que está afectando los suelos en una extensión de 33433 km².

Por la magnitud de la problemática la realización de trabajos para prevenir y evaluar riesgos es imprescindible para una correcta gestión de los recursos naturales. El suelo es uno de los recursos más importantes y más amenazados, por lo que la estimación del riesgo de erosión hídrica es primordial para promover estrategias de conservación.

El presente trabajo de investigación referido a la “Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica utilizando técnicas de teledetección y SIG” se realizo en la cuenca del río Ilave, hidrográficamente ubicado en la Vertiente del Lago Titicaca, el objetivo del estudio fue estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica, con la finalidad de obtener un instrumento de gestión para la planificación y conservación de la cuenca.

Para la modelación del proceso se uso la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, siglas en ingles), de este modelo se trataron los factores erosividad de las lluvias, erosionabilidad del suelo, topografía y cobertura vegetal. La erosividad de las lluvias se determinó a través de la ecuación propuesto por Arnoldus (1978), el factor suelo se determinó de manera gráfica a través del nomograma de erosionabilidad del suelo, elaborado por Wischmeier *et al.* (1971), el factor topográfico se determinó a partir de un modelo de elevación digital y el factor cobertura vegetal se obtuvo a partir del tratamiento digital de imágenes satelitales Landsat 5 TM, cada uno de estos factores fue evaluado en un ambiente de sistemas de información geográfica que permitió conocer la distribución espacial de cada uno de estas variables y de los riesgos de erosión a nivel de la cuenca del río Ilave y por subcuencas.

Los resultados alcanzados permiten obtener una visión general de manera cualitativa y cuantitativa de la variación espacial de los sectores más susceptibles a la erosión hídrica en la cuenca del río Ilave, constituyéndose en un instrumento de gestión fundamental a partir del cual se podrá realizar la planificación y conservación de la cuenca en materia del recurso suelo.

Los valores obtenidos a través del modelo USLE, muestran que la cuenca del río Ilave posee, en un 5.9% de su superficie, un riesgo de degradación por erosión hídrica crítica (>200 tn/ha/año), los riesgos de degradación muy alta (100 – 200 tn/ha/año) cubren un 14.19% de la cuenca, los riesgos de degradación alta (50 - 100 tn/ha/año) ocupan una superficie de 9.65%, los riesgos de degradación media (25 - 50 tn/ha/año) ocupan una superficie de 21.23%, los riesgos de degradación moderada (5 – 25 tn/ha/año) ocupan una superficie de 34.71% y los riesgos de degradación baja (<5 tn/ha/año) cubren una superficie de 14.32%.

Del análisis de la pérdida de suelos por subcuencas resulto ser la subcuenca Uncallane la que presenta los mayores grados de pérdida de suelos seguido de las subcuencas Alto Ilave, Medio Alto Ilave, Conduriri, LLusta y Loripongo, el resto de subcuencas presentan menores grados de erosión.

I. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es un problema ambiental muy serio que está afectando a la mayoría de los países de América Latina. Las causas del problema de la erosión son conocidas, una de las principales es la pobreza. Cuando los pobres provocan la erosión lo hacen porque no tienen más alternativas para sobrevivir. La erosión del suelo está estrechamente vinculada con los problemas del desarrollo rural. Sin embargo, sin suelo, el desarrollo rural es imposible.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), actualmente la erosión del suelo afecta a un 20% de las tierras agrícolas, un 15% de los pastizales y un 30% de los bosques del mundo. La organización señala que este desgaste se encuentra en su punto más grave desde hace 20 años. De acuerdo a un reciente estudio de la FAO y sus aliados, a mediados de la primera década del siglo XXI la degradación del suelo afecta a más de 1500 millones de personas. Detalla que la erosión es causada principalmente por una mala gestión de la tierra, teniendo sus raíces en la pobreza, la tala abusiva de árboles, el sobrepastoreo y las malas prácticas de irrigación. El resultado final es que los ciudadanos del mundo sufrirán los daños que afectan los recursos naturales de los cuales dependen, la pérdida de biodiversidad, una fuerte disminución en la productividad agrícola de las tierras, y, por último, el hambre, fenómeno que en su turno causa la emigración de poblaciones humanas hacia zonas menos afectadas, que muchas veces ya se encuentran densamente pobladas.

Según estudios realizados por INTECSA - AIC PROGETTI – CNR, en el año de 1993, en la Vertiente Hidrográfica del Lago Titicaca (lado peruano), indica que la erosión del suelo es uno de los problemas ambientales más graves, y de más difícil solución que está afectando los suelos en una extensión de 33433 km², de los cuales 5303 km² presenta problemas de erosión ligera, 19366 km² presenta problemas de erosión moderado, 8386 km² presenta problemas de erosión severa y 82 km² presenta problemas de erosión muy severa, lo cual demuestra que la Vertiente Hidrográfica del Lago Titicaca (lado peruano) de la cual forma parte la cuenca del río Ilave, hace muchos años atrás presenta graves problemas de degradación de suelos.

Actualmente, las tecnologías de teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), son técnicas orientadas hacia la mejor gestión del territorio, haciendo especial hincapié en la mejora de la planificación ambiental, el uso sostenible de los recursos naturales y la prevención de desastres. Los sistemas de información geográfica (SIG), se presentan como una herramienta de gran interés en la integración de datos territoriales, facilitando el análisis en conjunto de variables muy diversas. La teledetección, por su parte, es una técnica de gran interés para recoger información vital sobre fenómenos ambientales de la superficie terrestre, tiene aplicaciones múltiples, como el análisis de procesos de deforestación y desertificación, la dinámica de la cobertura vegetal, entre otros, razón por la cual se planteo el siguiente trabajo de investigación, con el propósito de realizar la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Ilave utilizando técnicas de Teledetección y SIG, la cual será base para la intervención y toma de decisiones en materia de manejo y conservación de suelos.

En razón de lo expuesto, los objetivos que se persiguen alcanzar con el desarrollo del presente trabajo de investigación son:

- Obtener mapas digitales de cada una de las variables que afectan la susceptibilidad a la erosión, basado en el análisis de datos obtenidos por teledetección y la utilización del SIG.
- Estimar la pérdida actual del recurso suelo por acción de la erosión hídrica en la cuenca del río Ilave a través del modelo USLE.
- Comparar los grados de susceptibilidad a la erosión hídrica actual por subcuencas.

1.1 Planteamiento del problema

El Centro Internacional de Referencia e Información en Suelo (ISRIC) y el Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas (UNEP), manifiestan que a nivel mundial los suelos se encuentran en grave estado de degradación, siendo la erosión del suelo como el proceso que afecta al mayor número de hectáreas, representando más del 80% de toda la degradación. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), citado por Kappelle (2009), indica que la erosión del suelo se encuentra en su punto más grave desde hace 20 años y de acuerdo a un reciente estudio a mediados de la primera década del siglo XXI la degradación del suelo afecta a más de 1500 millones de personas.

En Perú, la erosión del suelo es uno de los problemas más serios de deterioro del medio ambiente, que afecta a gran parte del territorio nacional en diferentes grados de severidad, causados principalmente por factores naturales y humanos, trayendo como consecuencia reducción en la fertilidad de los suelos (perdidas en la productividad agrícola) y contaminación de masas de agua por sedimentos.

Según estudios realizados por INTECSA - AIC PROGETTI – CNR, en el año de 1993, en la Vertiente Hidrográfica del Lago Titicaca (lado peruano), indica que la erosión del suelo es uno de los problemas ambientales mas graves, y de más difícil solución que está afectando los suelos en una extensión de 33433 km², de los cuales 5303 km² presenta problemas de erosión ligera, 19366 km² presenta problemas de erosión moderado, 8386 km² presenta problemas de erosión severa y 82 km² presenta problemas de erosión muy severa, lo cual demuestra que la Vertiente Hidrográfica del Lago Titicaca (lado peruano) de la cual forma parte la cuenca del río Ilave, hace muchos años atrás presenta graves problemas de degradación de suelos, a raíz de este problema existente, surge la importancia de realizar la presente investigación, la cual permitirá contar con información actualizada de las zonas más susceptibles a la erosión hídrica a nivel de la cuenca del río Ilave, la misma que servirá como herramienta base para la intervención y toma de decisiones en materia de manejo y conservación de suelos.

Al concluir la presente investigación, me permitiré responder la siguiente interrogante:

Problema general

¿Cuál es la pérdida actual del recurso suelo por acción de la erosión hídrica en la cuenca del río Ilave?

1.2 Antecedentes

Quintanilla (2008), realizo la estimación de la pérdida de suelo en la cuenca del río Caine del departamento de Cochabamba, determinó utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés), de naturaleza empírica, es el método más empleado a nivel mundial, que utiliza una base de datos referidos a la lluvia, suelos, pendiente, uso-cobertura y prácticas de manejo. Los resultados de la pérdida de suelo promedio en tn/ha/año, determinada de acuerdo al modelo USLE, muestra un valor

máximo de 1945 tn/ha/año, en una mínima superficie de la cuenca, constituida principalmente por áreas altamente degradadas, por consiguiente una gran parte de la erosión representada por el 66% es fuerte a muy fuerte, por lo tanto la cuenca está sometida a un fuerte proceso erosivo que puede atribuirse a la característica geomorfológica y cobertura vegetal constituida principalmente por serranías empinadas y herbazales ralos.

Ancco (2006), realizó el modelamiento de la erosión hídrica en la microcuenca del río Coraraca, ubicada dentro de la cuenca del río Ilave, para ello utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) con un SIG, alcanzando los siguientes resultados: en un 33.92% de su superficie un riesgo de degradación por erosión hídrica muy alto (>200 tn/ha/año), los riesgos de degradación alto (50–200 tn/ha/año) cubren un 33.45% de la microcuenca, los riesgos de degradación moderados (10-50 tn/ha/año) ocupan una superficie de 6.15% y los riesgos de degradación ligera (<10 tn/ha/año), se ubican predominantemente en las partes bajas de la microcuenca ocupando una superficie de 26.47%.

Montes *et al.*, (2000), en la cuenca del río Santa Catarina del estado de Querétaro en México evaluaron el riesgo de erosión hídrica mediante la utilización del modelo USLE. Los factores incluidos fueron la erosividad (R), Erodabilidad (K), el efecto de la longitud y gradiente de la pendiente (LS), apoyados de SIG para la espacialización de las variables, mediante procesos como el de la distancia ponderada para R, la distribución de las unidades de suelo para K y modelos de elevación digital para LS. Los resultados para toda la cuenca en estudio muestran un gran porcentaje de la superficie con un alto riesgo de erosión, con índices muy superiores a los 80 tn/ha/año; este riesgo se localiza preferentemente en las zonas altas y de pendiente fuerte, también se observa que el riesgo es importante entre 40 a 80 tn/ha/año; en las zonas de transición (pié de monte) e inclusive en algunas partes bajas de la cuenca, los resultados obtenidos mostraron total concordancia con lo ocurrido en campo y sirvieron para la planeación de un programa de manejo y conservación del recurso suelo de la cuenca.

Mejía *et al.*, (2009), evaluaron la erosión actual del riesgo de erosión hídrica en la microcuenca Aguas Calientes, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y análisis espacial en un SIG, lo que facilitó estimar el riesgo de erosión actual. Se definieron 23 Unidades Homogéneas de Erosión (UHE) y se evaluó, cualitativa y

cuantitativamente, la erosión en cada una de ellas. De acuerdo con las condiciones actuales, en la microcuenca Aguas Calientes predomina la erosión ligera en un 55% de su superficie, con una pérdida anual inferior a 20 tn/ha/año; un 22.5% de la microcuenca muestra una erosión severa, con pérdidas de suelo que supera las 300 tn/ha/año; la erosión moderada por su parte, afecta el 22% de superficie de la microcuenca, con pérdidas de suelo que van de 20 a 100 tn/ha/año; y por último, sólo un 0,8% de la microcuenca está afectada por procesos de erosión fuerte (100-300 tn/ha/año). El valor promedio de erosión actual estimado para toda la microcuenca es del orden de 139 tn/ha/año, lo que indica que la erosión es fuerte, y que su ocurrencia está supeditada a los cambios en la cobertura vegetal.

Guanca (2010), aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) mediante técnicas de información geográfica (SIG), para determinar la erosión hídrica de los suelos en la cuenca del río Pilcomayo, resultando un valor máximo promedio de pérdida de suelo de 1050 tn/ha/año; del total de la cuenca el 94% de la superficie de la cuenca es de clase nula a ligera, 3% moderada, 2% alta y 0.36% de la superficie de clase muy alta. Se observa erosión mayor a 50 tn/ha/año, en pendientes mayores al 5%. Un 91% de las asociaciones de suelos presentan erosión actual nula a ligera, 4% moderada y 4% alta.

Alvarado (2002), realizó un diagnóstico de la erosión hídrica en el estado de Tlaxcala, donde encontró que el 90.70% del estado presenta problemas de erosión, en diferentes tipos, formas y grados, siendo la erosión hídrica la dominante y más degradante. La velocidad de la erosión hídrica es de 471.28 tn/ha/año como máxima y mínima de 1.77 tn/ha/año, el grado ligero es el que domina, ocupa una superficie de 1178.526 km² (29.02%).

Santacruz (2011), realizó la estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Cahoacán, localizada en la costa Chiapaneca, México, en la cual se presentan precipitaciones que van de 1675 mm hasta 2000 mm, estos valores de precipitación media anual son muy grandes en la parte alta de la cuenca, provoca valores de erosividad muy altos en la zona de montaña, la precipitación media anual disminuye en las zonas planas cercanas al área de costa. Los valores de erosión hídrica, determinados

mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, revelaron que las pérdidas de suelo van desde 3.9 tn/ha/año hasta valores de 8010.20 tn/ha/año.

Tejerina (2010), determino la erosión hídrica de los suelos dominantes de la alta cuenca del río Bermejo, mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos implementado en formato SIG, donde encontró valores de pérdida de suelos desde 9 tn/ha/año; en zonas con pendientes que van desde 0 a 5% y valores máximos de 437 tn/ha/año; presentándose en zonas con pendientes empinadas superiores a 15%

Torres *et al*, (2003), evaluaron la degradación de los suelos de la cuenca el Josefino, localizada en el municipio Jesús María, estado de Jalisco. Los escenarios se construyeron mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica. Los datos utilizados consistieron en cuatro años de información climática, uso de suelo y unidades de suelo, lo cual resultó en cinco Unidades Hidrológicas, mismas que sirvieron para la predicción de la erosión hídrica. Las metodologías utilizadas fueron: la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos por erosión hídrica y eólica, y FAO para degradación química, física y biológica. En los resultados, se observó que los principales procesos de degradación de los suelos de la cuenca son la erosión hídrica y eólica, en valores clasificados entre altos y muy altos, que van de 107 a 200 tn/ha/año y afectan entre 35 y 81% del área total, respectivamente. La degradación física y química representan los menores grados de afectación que van de ligeras a moderadas.

Laura (2010), evaluó la erosión hídrica en la cuenca del río Juramento en la provincia de Salta, con la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y herramienta SIG (Sistema de Información Geográfica). Se utilizaron los SIG ArcGIS v.9.2 y Erdas Imagine v.9.1, como herramienta para el análisis y representación de la erosión. El estudio de erosión mostró que el 34% del área de estudio presenta problemas de erosión alta a muy alta, presentándose valores mínimos de 1 ton/ha/año hasta valores máximos de 223 ton/ha/año.

López *et al*. (1998), evaluaron las pérdidas de suelo utilizando la ecuación de pérdidas de suelo revisada (RUSLE) junto a los SIG, para determinar la influencia del uso del suelo sobre la erosión en la cuenca del río Guadiana en Puerto Rico, encontraron 7 clases de uso del terreno: suelo desnudo (534 tn/ha/año), bosque de dosel abierto (26

tn/ha/año), agricultura (22 tn/ha/año), pastizales (17 tn/ha/año), urbano poco denso (15 tn/ha/año), bosque de dosel cerrado (7 tn/ha/año) y urbano denso (1 tn/ha/año). Lo cual permitió hacer diferentes simulaciones de uso del suelo que indican que reforestar el 5% de las áreas más afectadas, la erosión se disminuiría en un 20% y si se reforesta la cuenca por completo la erosión se disminuiría en 37%.

Hernández (2010), estimo la tasa de erosión hídrica, mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, integrando en un ambiente SIG cada uno de los factores que definen la USLE obtuvo una cartografía resultante en la que aparece reflejada la pérdida media de suelo, registrándose el valor más alto de pérdida de suelo por erosión hídrica, de acuerdo a las condiciones de pendiente pronunciada, alta precipitación y suelo poco desarrollado la tasa fue de 310.57 tn/ha/año, y el valor mínimo de la tasa de erosión fue de 0.018 tn/ha/año, localizado en un terreno con 0% de pendiente.

Pérez (2001), evaluó la degradación de los suelos por la erosión hídrica en el territorio Colombiano, a través de la elaboración de un modelo utilizando los sistemas de información geográfica-SIG, en la cual analizo los factores que gobiernan el proceso de erosión como son: la precipitación, el tipo de suelo, la pendiente y la vegetación, a partir de la metodología de la FAO, los resultados obtenidos a partir del análisis espacial muestran valores de pérdida de suelo que oscilan entre 1.66 y 426 tn/ha/año y son agrupados en intervalos ó clases de degradación, los cuales permitan localizar, de forma rápida y precisa, las zonas de máximo riesgo.

1.3 Justificación

Uno de los problemas ambientales más serios que se está presentando a nivel mundial es el estado de degradación de las tierras así mismo el Perú específicamente el altiplano de Puno está inmerso en este problema ambiental, la cuenca del río Ilave hace varios años atrás presente graves problemas de degradación de suelos, a consecuencia de los factores climáticos adversos junto con las condiciones geomorfológicas de relieves con pendientes fuertes y el sobrepastoreo en las partes altas, han llevado a acelerar los intensos procesos de erosión en la cuenca, lo que está generando pérdidas importantes de la capacidad productiva de los suelos y de áreas de pastoreo, la cual representa una serie amenaza para el abastecimiento de alimentos de primera necesidad, poniendo en riesgo el bienestar y la existencia de sus habitantes, por otro lado la erosión disminuye la vida útil de

las obras hidráulicas por la cantidad de sedimentos que acarrea el agua, eleva el lecho de los ríos; lo cual genera problemas de inundación en las partes bajas de la cuenca, produciendo muertes de seres humanos, daños a viviendas e infraestructuras, y pérdidas de tierras agrícolas.

Lo anterior muestra un problema ambiental y social que debe ser atendida para evitar mayores impactos y posiblemente daños irreversibles, ello justifica el desarrollo de la presente investigación, referido a la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Ilave utilizando técnicas de Teledetección y SIG, en vista de que la información sobre la distribución espacial actual de la erosión del suelos es un instrumento de gestión para la intervención por los gobiernos locales, regional y nacional en materia de manejo, conservación y restauración de las zonas afectadas por erosión.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Ilave, con la finalidad de obtener un instrumento de gestión para la planificación y conservación de la cuenca.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Obtener mapas digitales de cada una de las variables que afectan la susceptibilidad a la erosión, basado en el análisis de datos obtenidos por teledetección y la utilización del SIG.
- Estimar la pérdida actual del recurso suelo por acción de la erosión hídrica en la cuenca del río Ilave a través del modelo USLE.
- Comparar los grados de susceptibilidad a la erosión hídrica actual por subcuencas.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Cuenca hidrográfica

Según Vásquez (2000), indica que la cuenca hidrográfica es el área natural o unidad de territorio, delimitada por una divisoria topográfica (*divortium aquarum*), que capta la precipitación y drena el agua de escorrentía hasta un colector común, denominado río principal. Moreno y Renner (2007), indican que es el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, las cuales confluyen en un curso mayor, que a su vez, puede desembocar a un río principal, en un depósito natural de agua, en un pantano o directamente al mar.

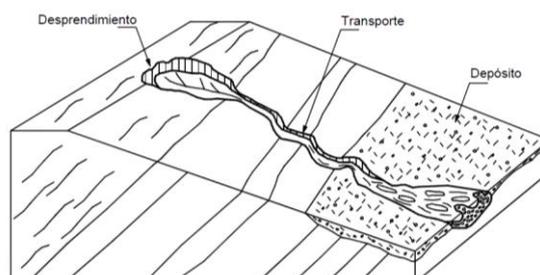
2.2 Erosión de suelos

Según Hill *et al.* (1998), explican que la erosión es el resultado de las interacciones entre las características climáticas y las intervenciones humanas que llevan al desequilibrio ecológico. Hoy en día, las prácticas inadecuadas del uso del suelo (la extensión de los pastos, la colección de leña, quemadas incontroladas) son la fundamental causa de la fuerte degradación. Los impactos socioeconómicos son los aceleradores de los procesos de erosión por disturbios de las interacciones complejas del crecimiento de la planta, formación de los suelos y procesos de erosión. Los indicadores físicos más importantes de la degradación están relacionados a la destrucción del suelo y de la vegetación.

2.2.1 Procesos de la erosión del suelo

Según Morgan (2005), menciona que la erosión del suelo es un proceso de dos fases consistentes en el desprendimiento de partículas individuales de la masa del suelo y su transporte por los agentes erosivos, como las corrientes de agua y el viento. Cuando la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce una tercera fase: su deposición. Hellin (2004), explica que la erosión hídrica es la pérdida progresiva de los componentes del suelo como consecuencia de la dispersión de sus agregados, los cuales son arrastrados por el agua hasta lugares más bajos, contribuyendo a la degradación del suelo y a la pérdida de su fertilidad, siendo una amenaza para la productividad agrícola. Razones que han llevado a que numerosos investigadores muestren

un considerable interés por el desarrollo de tecnologías o métodos para la conservación de los suelos. Suarez (2001), manifiesta que la erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento.



Fuente: Suárez (2001)

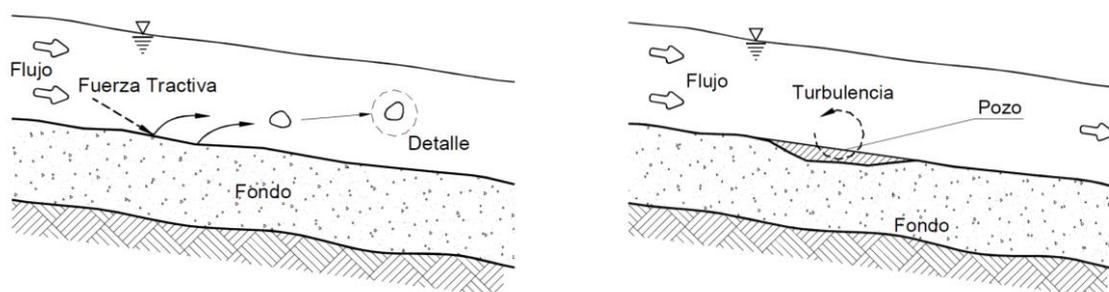
Figura 2.1: Proceso de erosión

2.2.2 Mecánica de la erosión del suelo

Según Suarez (2001), La mecánica de la erosión incluye tres procesos básicos:

1. Desprendimiento de las partículas
2. Transporte de las partículas desprendidas
3. Depósito o sedimentación.

Las fuerzas que actúan o fuerzas tractivas dependen de la velocidad del agua, la turbulencia, los caudales y la forma y rugosidad del canal y la resistencia del suelo a la fuerza tractiva depende de la estructura y las interacciones físico – químicas entre las partículas de suelo. El control de erosión está dirigido a disminuir la fuerza tractiva y/o aumentar la resistencia del suelo a la erosión.

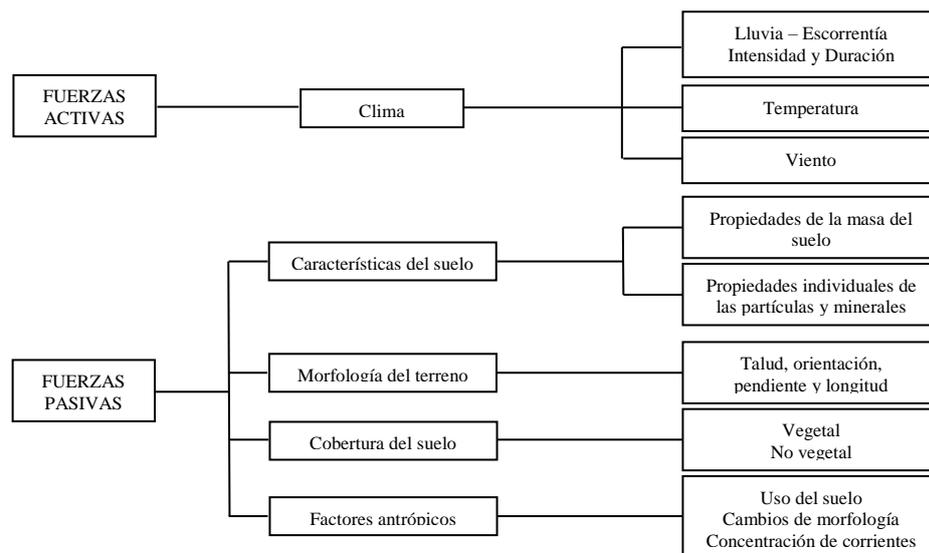


Fuente: Suárez (2001)

Figura 2.2: Desprendimiento y arrastre de partículas

2.2.3 Factores que influyen en la erosión

La Organización Meteorológica Mundial, OMM (2006), manifiesta que la degradación de las tierras intervienen dos sistemas complejos conectados entre sí: el ecosistema natural, y el sistema social humano. Las fuerzas de la naturaleza, mediante el desgaste periódico causado por fenómenos climáticos extremos y persistentes, y el uso y abuso por los seres humanos de los ecosistemas sensibles y vulnerables de las tierras secas. Por otro lado Greenland y Lal (1975), indican que la erosión es causada por una combinación de factores: condiciones del clima, la topografía de los terrenos, la cobertura vegetal, las características propias del suelo y la actividad humana. Suarez (2001), explica que la fuerza tractiva del agua y del viento en movimiento son las principales fuerzas que generan erosión superficial y la fuerza de gravedad es la principal fuerza que produce la erosión en masa. La susceptibilidad a la erosión depende del clima, las características del suelo, la morfología del terreno, la cobertura del suelo, y la intervención antrópica.



Fuente: Suárez (2001)

Figura 2.3: Factores que afectan la susceptibilidad a la erosión

2.2.4 Tipos de erosión hídrica

Según Cubero (1996), Se pueden identificar cinco tipos principales de erosión hídrica:

2.2.4.1 Erosión por salpicadura

Las gotas de lluvia al impactar en los agregados del suelo los disgregan desplazando sus partículas a distancias cortas (máxima 2m). Esta erosión es un factor

importante en el desprendimiento de las partículas del suelo, no así en su desplazamiento. Al mismo tiempo este impacto de las gotas produce una rotura de las partículas, dejando expuestas y en la superficie en las más finas.

2.2.4.2 Erosión laminar

Esta forma de erosión ocurre en terrenos con pendientes uniformes y suaves cuando la cantidad de agua excede a la capacidad de infiltración de los suelos y forma una película delgada de agua. La erosión laminar separa las partículas del suelo desprendidas por las gotas de lluvia, dejando en su lugar las partículas más gruesas y llevándose consigo las más pequeñas, las cuales en mayor grado determinan la fertilidad de los suelos.

2.2.4.3 Erosión en surcos

La superficie de los terrenos de cultivo casi siempre es irregular presentando depresiones y elevaciones. El agua de lluvia se concentra en las pequeñas depresiones formando corrientes. Estas acumulaciones de agua de escorrentía arrastran y transportan las partículas del suelo formando pequeñas zanjas o surcos. La erosión en surcos adquiere una mayor gravedad cuando caen aguaceros intensos en suelos desprovistos de vegetación y con alta susceptibilidad al transporte por el agua de escorrentía, especialmente en terrenos recién labrados.

2.2.4.4 Erosión en cárcavas

Lluvia tras lluvia, las pequeñas zanjas o surcos se van ampliando con el movimiento de la escorrentía. Este tipo de erosión se produce cuando existe una mayor concentración en el escurrimiento debido a las irregularidades del terreno que permiten la conjunción de varios surcos. Las profundas incisiones creadas en el terreno impiden su nivelación con instrumentos de labranza ordinarios.

2.2.4.5 Movimientos en masa

Se reúnen en este tipo de erosión aquellos casos en donde se desplazan masas considerables de suelo y roca sobre distancias relativamente cortas, bajo la acción de la gravedad y en mayor o menor grado de la cantidad de agua. Los movimientos en masa tienen la particularidad de ser mucho más evidentes, espectaculares y rápidos. Sus causas y consecuencias no son siempre fácilmente detectables, tampoco su prevención. La recuperación de tierras degradadas por deslizamientos es muy difícil y costosa.

2.2.5 Niveles aceptables de erosión

Según Núñez (2001), define al nivel aceptable de erosión como la máxima cantidad de suelo que se puede perder por erosión de una parcela, sin sufrir degradación excesiva, a pesar de que se explote agrícolamente en forma continua. Según Hudson, citado por Núñez (2001), estima que los niveles o límites tolerables están en función del proceso de formación de suelos, para una región específica. Por esa razón, si el proceso de formación de suelos es de 25 mm de grosor en 30 años, el nivel tolerable de pérdida sería de 12.5 tn/ha/año. Por su parte, Gómez, citado por Núñez (2001), indica que los grados de erosión natural no deben exceder 1.0 tn/ha/año, y mantenerse entre los valores de 1 a 10 tn/ha/año. En el siguiente cuadro se presenta las tasas erosivas de pérdida de suelos y los grados de erosión.

Cuadro 2.1: Niveles de pérdida de suelos

Perdidas de suelo tolerables	
Pérdidas tn/ha/año	Grado de erosión hídrica
< 5	Erosión baja
5 - 25	Erosión moderada
25 - 50	Erosión media
50 - 100	Erosión alta
100 - 200	Erosión muy alta
> 200	Erosión crítica

Fuente: Ramos (2001)

2.3 Modelo de Estimación de la Erosión Hídrica

2.3.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE “Universal Soil Loss Equation”

Es un método desarrollado por Wischmeier y Smith (1978), para determinar la pérdida media anual de suelo. Esta representada por una serie de variables reconocidas en el fenómeno de la erosión hídrica.

Quizás por ser una simple ecuación de regresión, ha resultado ser un modelo práctico y accesible que ha sido utilizado a diferentes escalas en el mundo entero. Su uso es particularmente recomendado para:

- Predecir la pérdida media anual de suelos en una parcela concreta, con un uso y ordenación determinados.
- Servir de guía en la selección de las medidas de conservación de un terreno determinado. Para ello, es preciso conocer la tolerancia de pérdidas de suelo del terreno, lo que a su vez permitirá efectuar la ordenación agroecológica del espacio considerado.
- Estimar la reducción en las pérdidas del suelo que pueden obtenerse con distintas alternativas de cultivo y/o manejo.
- Definir cuál de las prácticas de conservación incluidas en el factor P es la más adecuada para el terreno.

La fórmula que la define es:

$$A=R*K*LS*C*P$$

Donde:

A = es la pérdida de suelo por unidad de superficie, que se obtiene por el producto del resto de los factores (tn/ha/año).

R = índice de erosividad de las lluvias (MJ.mm/ha.h).

K = factor erosionabilidad del suelo, es erosión estándar en tonelada por hectárea por unidad de erosividad R, es una medida de la susceptibilidad inherente de las partículas del suelo a la erosión; (tn.ha.h/ha.MJ.mm).

LS= factor topográfico, producto de los factores, longitud y grado de la pendiente (adimensional).

C = factor cultivo y manejo, la relación entre las pérdidas de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y las pérdidas correspondientes para ese suelo sin cultivo (adimensional).

P = factor prácticas de conservación del suelo, la relación entre las pérdidas de suelo con cultivo a nivel, en fajas y en terrazas, y las pérdidas de suelo correspondientes a un cultivo en surcos según la pendiente (adimensional).

Los términos RKLS, establecen la influencia de los factores físicos del lugar, poco modificables por el hombre. Representan la pérdida de suelo que ocurriría en ese sitio si todo el año el suelo estuviese desnudo; por esa razón a este producto parcial se lo denomina erosión potencial (EP).

El producto de (RKLS) por los valores de C y P permite estimar la erosión actual (EA). Estos valores dependen del porcentaje de cobertura natural y del manejo que cada productor haga de su campo. Para diferentes manejos corresponden diferentes valores de C y P; estos valores se encuentran tabulados.

2.3.1.1 Índice de erosión pluvial – R

Representa la capacidad potencial de las lluvias para generar erosión y es función de las características físicas de las mismas (intensidad, duración, velocidad y tamaño de las gotas). Se define como el producto de la energía cinética (E) de un aguacero y su máxima intensidad en un intervalo de 30 minutos (I). El factor R resulta de promediar totales anuales de E*I para un período de por lo menos 20 años.

El método de Wischmeier y Smith (1978), se basa en el análisis de fajas pluviográficas para una serie de por lo menos 20 años. A los fines prácticos, la ausencia de esta información en las estaciones meteorológicas limita la aplicación de esta metodología y generó la necesidad de encontrar métodos alternativos del factor R.

Según Mendía *et al.* (1978), citado por Mármol (2006), indica que existen distintas fórmulas para el cálculo del factor R.

- Según Roose (1975)

$$R = 1.73 * 0.5 * P$$

Donde: P = Precipitación media anual

- Según Morgan (1974) (para lugares de alta precipitación)

$$R = I_{30} (9.28P - 8.838) / 1000$$

Donde: $I_{30} = 75 \text{ mm/h}$: Valor recomendado por Weischmeier y Smith (1978)

P = Precipitación media anual

- Según Foster et al. (1981)

$$R = 0.276P * I_{30} / 100$$

Donde:

$I_{30} = 75mm/h$: Valor recomendado por Weischmeier y Smith (1978)

- Arnoldus (1978) basado en trabajos de Fournier (1960). Es un método práctico que utiliza una fórmula obtenida por regresión lineal en la cual correlacionó valores conocidos de R con las lluvias medias anuales.

$$R = a * \left(\sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P} \right) + b$$

Donde:

R = es el factor de erosividad de las lluvias

a y b = constantes que consideran las condiciones climáticas locales

$(\sum p^2 / P)$ = es el Índice Modificado de Fournier o Índice FAO. Donde p^2 es la precipitación media mensual y P es la precipitación media anual. Considera no solamente el mes de mayor precipitación sino también el resto de los meses.

Este índice fue utilizado por la FAO en la elaboración del mapa universal de degradación de suelos. Las principales ventajas que muestra son el empleo de datos meteorológicos simples y una buena correlación con valores medidos del factor R. Esta ecuación se probó en diferentes regiones del mundo obteniéndose en general un alto grado de correlación (0,89).

2.3.1.2 Índice de erosionabilidad del suelo – K

Representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado. Algunos se erosionan más rápidamente que otros aún cuando las pendientes, lluvia, cobertura y prácticas de manejo sean las mismas, debido a las propiedades intrínsecas del suelo (Villanueva *et al.* 2004).

Para su cálculo existen dos fórmulas: primera y segunda aproximación. La primera utiliza la textura y materia orgánica del suelo; la segunda, más exacta, considera también estructura y permeabilidad. Todos estos datos se refieren a los 20 cm superficiales del suelo, excepto la permeabilidad que es para todo el perfil.

Formula de 1° Aproximación:

$$77.4K = 2.1 * 10^4 * (\%L + \%A) * (100 - \%a)^{1.14} * (12 - \%MO)$$

Formula de 2° Aproximación:

$$100K = 1.292 \left[2.1 * 10^{-4} * (M)^{1.14} * (12 - \%a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \right]$$

Donde:

M , factor representativo de la textura. Se calcula como el producto del porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0.002-0.1 mm. De diámetro, expresado en %, por el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0.002-2 mm., de diámetro, expresado también en %, o lo que es igual, a 100 menos el % de arcilla de la muestra.

$$M = [100 - \% \text{ arcilla}] \cdot [\% (\text{limo} + \text{arena muy fina})]$$

a , % de materia orgánica

b , número correspondiente a la estructura del suelo según la siguiente codificación:

1 – grano muy fino (<1mm)

2 – grano fino (1-2 mm)

3 – grano medio (2-5mm) y gránulo grueso (5- 10mm)

4 – grano liso, prismático, columnar y muy grueso (>10mm)

c , clase de permeabilidad del perfil, según la siguiente codificación del *USDA-Soil Survey Manual*:

1 – rápida a muy rápida

2 – medianamente rápida

3 – moderada

4 – moderadamente lenta

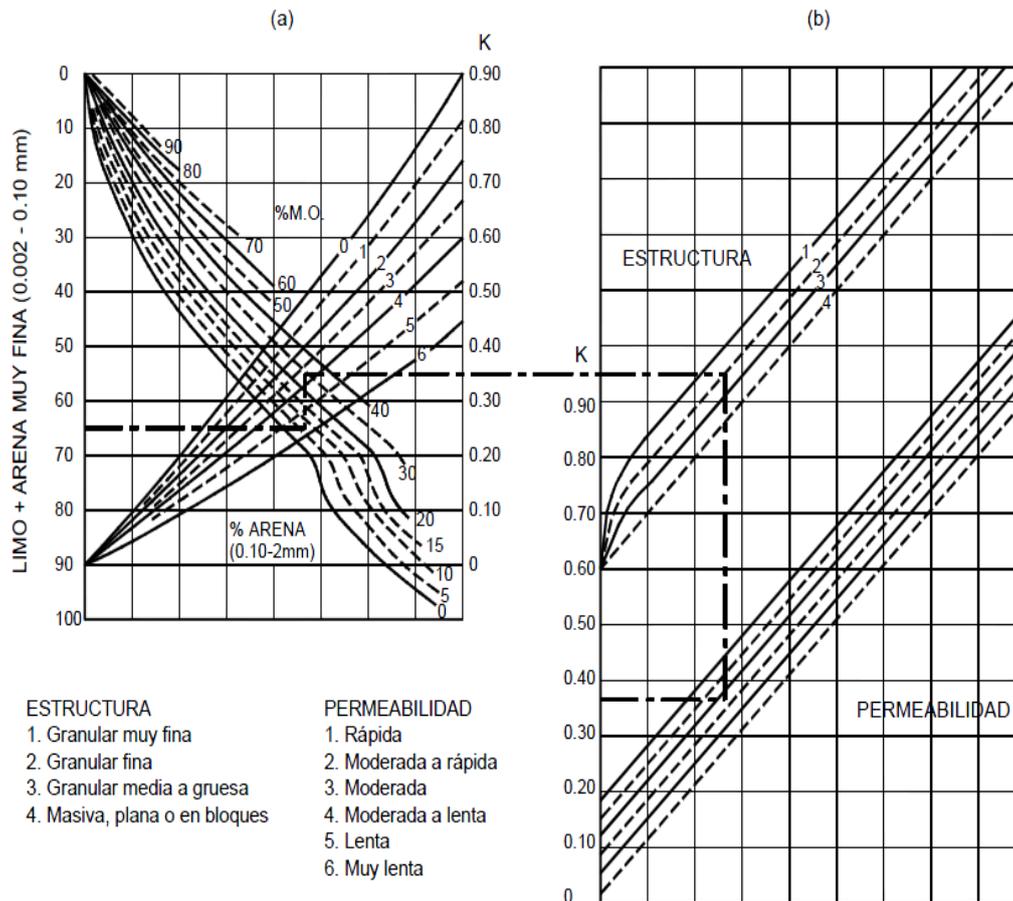
5 – lenta

6 – muy lenta

Los valores de la textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15 – 20 cm, superiores del suelo y los de permeabilidad a todo su perfil. Los valores más elevados calculados para K son de 0.92 y corresponden a suelos en que la fracción limo más arena

muy fina, representa virtualmente la totalidad de la muestra y es nulo el contenido de materia orgánica.

Posteriormente, Wischmeier *et al.* (1971), establecieron un nomograma para el cálculo de este factor, en el que se incluyen los parámetros anteriores (figura 2.4).



Fuente: Wischmeier *et al.* (1971)

Figura 2.4: Abaco para la determinación gráfica del índice de erosionabilidad del suelo - K

2.3.1.3 Factores topográficos L y S

Los factores L y S han sido evaluados por separado, pero en la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo se los consideran en conjunto como factor topográfico, representando así el efecto del relieve sobre la pérdida de suelo. Mediante análisis estadísticos diversos autores obtuvieron fórmulas que utilizan la longitud y el grado de la pendiente; la fórmula original de Wischmeier utiliza estos parámetros para el cálculo de los factores (Aguilo *et al.*, 1984).

$$LS = (\lambda / 22.13)^m * (s / 0.09)^{1/3}$$

Donde;

LS = factor topográfico

λ = longitud de la pendiente (m)

s = grado de la pendiente (%)

m = constante que está influenciada por la pendiente:

Pendiente < 1%; m= 0.2

Pendiente 1 – 3%; m= 0.3

Pendiente 3 – 5%; m= 0.4

Pendiente 5 – 20%; m= 0.5

Pendiente > 20%; m= 0.6

2.3.1.4 Factor cobertura vegetal del suelo

Representa o miden el grado de protección ejercida por los cultivos y la vegetación natural en el proceso de erosión. Los valores que pueden tomar, varían en función de la clase y calidad de estas coberturas, oscilando desde un mínimo 0,003 para coberturas densas y 0.45 para coberturas sin vegetación. Se obtiene a través del cuadro 2.2, que han sido elaboradas por distintos autores:

Cuadro 2.2: Valores de C para cobertura vegetal

Tipo y altura de la cobertura	Porcentaje de cubrimiento del suelo					
	Coeficiente C					
	0	20	40	60	80	95-100
Cobertura de pastos bajos	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
Cobertura de pastos y hierbas (0.5m)	0.36	0.17	0.09	0.038	0.012	0.003
Arbustos (2m)	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
Árboles (4m)	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003

Fuente: Suárez (2001)

2.3.1.5 Factores de prácticas de conservación - P

Se ha considerado como una variable independiente y, por lo tanto, no incluido en el factor C, cuando se trata de las prácticas siguientes: cultivo a nivel, cultivo por fajas y terrazas. Otras prácticas conservacionistas como rotación con cultivos herbáceos, tratamientos fertilizantes, cubiertas artificiales, etc., se consideran dentro de los trabajos de cultivo y por tanto, su influencia en las pérdidas de suelo se incluye dentro del factor C. El factor P varía según la pendiente y sus valores pueden obtenerse de tablas (Suárez 2001).

Cuadro 2.3: Factor P de prácticas de conservación

Pendiente %	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Terrazas
Factor P			
1 - 2	0.6	0.3	0.12
3 - 8	0.5	0.25	0.1
9 - 12	0.6	0.3	0.12
13 - 16	0.7	0.35	0.14
17 - 20	0.8	0.4	0.16
21 - 25	0.9	0.45	0.18

Fuente: Suárez (2001)

2.4 Teledetección

Por Teledetección entendemos, de modo genérico, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. Sin embargo, de un modo más restringido, y en el ámbito de las ciencias de la tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde los satélites artificiales. Chuvieco (1996). Por otro lado Guzmán (2007), explica que la teledetección es una técnica a través de la cual se obtiene información de un objeto sin tener un contacto directo con él, esto es posible gracias a la relación sensor – cobertura, la cual se expresa a través de la llamada radiación electromagnética. Esta relación se puede presentar en tres formas; emisión, reflexión, y emisión-reflexión, donde el flujo de energía que se produce por alguna de estas formas va a estar en función de la transmisión de energía térmica y conductividad espectral propia de cada elemento en la naturaleza.

2.4.1 Características de los datos de Teledetección

Romero (2006), menciona que el conjunto de los datos adquiridos mediante procedimientos de teledetección de aviones o naves espaciales comprenden siempre tres tipos de información:

- Una información espacial que representa la organización en el espacio físico de los elementos que constituyen la imagen.
- Una información espectral que caracteriza y puede conducir al conocimiento de la naturaleza de la superficie terrestre.
- Una información temporal que permite la detección de los cambios operados en la superficie de la Tierra con el transcurso del tiempo.

2.4.2 Aplicaciones de la teledetección

Según Iturrate (1998), La teledetección se ha aplicado con bastante éxito y sobre todo, con la certeza de que será una tecnología importantísima a corto plazo, en áreas y aplicaciones como:

a) Meteorología

- Análisis de masas nubosas y su evolución
- Modelización climática a diferentes escalas
- Predicción de desastres naturales de origen climático

b) Agricultura y bosques

- Discriminación de tipos de vegetación: tipos de cultivos, tipos de maderas...
- Determinación del vigor de la vegetación
- Determinación del rango de interpretabilidad y biomasa
- Medición de extensión de cultivos y maderas por especies
- Clasificación de usos del suelo

c) Cartografía y planeamiento urbanístico

- Cartografía y actualización de mapas
- Categorización de la capacidad de la tierra
- Separación de categorías urbana y rural
- Planificación regional
- Cartografía de redes de transporte
- Cartografía de límites tierra - agua
- Cartografía de fracturas

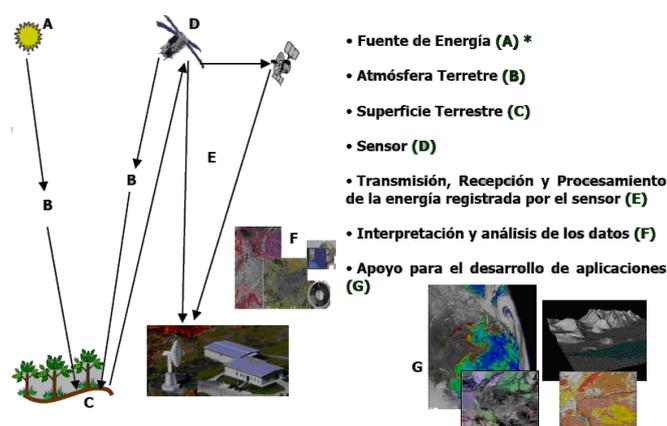
d) Geología

- Reconocimiento de tipos de roca
- Cartografía de unidades geológicas principales
- Revisión de mapas geológicos
- Delineación de rocas y suelos no consolidados
- Cartografía de intrusiones ígneas
- Cartografía de depósitos de superficie volcánica reciente

- Cartografía de terrenos
 - Búsqueda de guías de superficie para mineralización
 - Determinación de estructuras regionales
 - Cartografías lineales
- e) Recursos hidrográficos**
- Determinación de límites, áreas y volúmenes de superficies acuáticas
 - Cartografía de inundaciones
 - Determinación del área y límites de zonas nevadas
 - Medida de rasgos glaciales
 - Medida de modelos de sedimentación y turbidez
 - Determinación de la profundidad del agua
 - Delineación de campos irrigados
 - Inventario de lagos
 - Detección de zonas de alteraciones hidrotermales
- f) Oceanografía y recursos marítimos**
- Detección de organismos marinos vivos
 - Determinación de modelos de turbidez y circulación
 - Cartografía térmica de la superficie del mar
 - Cartografía de cambios de orillas
 - Cartografía de orillas y áreas superficiales
 - Cartografía de hielos para navegación
 - Estudio de mareas y olas
- g) Medio ambiente**
- Control de superficies mineras
 - Cartografía y control de polución de aguas
 - Detección de polución del aire y sus efectos
 - Determinación de efectos de desastres naturales
 - Control medioambiental de actividades humanas
 - Seguimiento de incendios forestales y sus efectos
 - Estimación de modelos de escorrentía y erosión

2.4.3 Mecanismo para la obtención de datos de satélite

Chuvieco (2002), menciona que los elementos involucrados en la obtención de los datos satelitales son: fuente de energía, objeto y sensor. En consecuencia, la energía electromagnética es el elemento que interrelaciona al objeto y sensor, siendo las más importante, aquella producida por la reflexión, que se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta; aunque también, existen otras energías que provienen de los propios objetos de la tierra (energía emitida) o provenientes de un determinado sensor, como los sensores de radar, que emiten y recogen el flujo energético.



Fuente: Goyo (2007)

Figura 2.5: Proceso de la teledetección

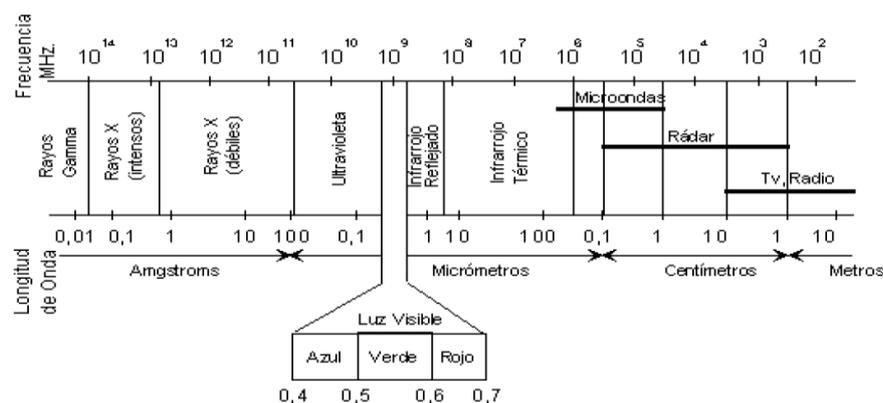
2.4.4 Radiación electromagnética

El principio físico de la teledetección espacial, radica, en la interacción de la radiación electromagnética entre la superficie de la tierra y el sensor remoto; y es definida como aquella energía que se mueve a través del espacio armónicamente en componentes eléctrico y magnético, los mismos que se encuentran perpendiculares entre sí. El flujo viaja a velocidad de la luz, en forma de ondas y compuesta por una sucesión de unidades discretas de energía denominados fotones o cuantos. Chuvieco (1996).

2.4.5 Espectro electromagnético

Chuvieco (1996), explica que las características del flujo energético se describe también por sus propiedades expresadas, por su longitud de onda y frecuencia, cuyos valores identifican las diferentes radiaciones electromagnéticas que rodean nuestro medio y que agrupadas de manera continua y ordenada forma el espectro electromagnético (figura 2.6). Por otro lado Godoy (2005), indica que el espectro electromagnético se refiere a la representación de los diferentes tipos de energía de radiación y sus correspondientes

longitudes de onda. Hay usualmente 6 subdivisiones (ondas de radio, infrarroja, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gama) de el espectro electromagnético; para efectos de la teledetección es preciso destacar una serie de bandas que son las más utilizadas en las actuales tecnologías; estas son el Espectro Visible (0.4 a 0.7 μm) Infrarrojo Próximo (0.7 a 1.3 μm) Infrarrojo Medio (1.3 a 8 μm) Infrarrojo Lejano o Térmico (8 a 14 μm) y las Micro Ondas (a partir de 1 mm). Estas bandas serán tratadas en el siguiente punto.



Fuente: Chuvieco (1996)

Figura 2.6: Espectro electromagnético

2.4.6 Bandas espectrales

Chuvieco (1996), explica que los diversos rangos de longitud de onda, que puede ser divididos o separados en el espectro electromagnético, reciben el nombre de región espectral o bandas espectrales, rangos que son útiles para identificar las características y propiedades físicas de cualquier tipo de material que existe en la superficie de la tierra. En la teledetección las bandas espectrales de mayor uso son:

2.4.6.1 Espectro visible

Chuvieco (2002), comprende longitudes de onda entre los 0.4 y 0.7 μm y recibe su nombre, por ser la única radiación electromagnética perceptible por el ojo humano; dividiéndose en la tres bandas elementales: azul (0.4 - 0.5 μm), verde (0.5 - 0.6 μm) y rojo (0.6 - 0.7 μm) y acompañadas por una gama de tonalidades coloreadas.

2.4.6.2 El infrarrojo

Chuvieco (2002), forma parte del espectro electromagnético cuyo rango oscila entre los 0.7 hasta los 14 μm , dividiéndose a la vez en: el infrarrojo próximo, el infrarrojo medio y el infrarrojo termal.

2.4.6.3 Infrarrojo próximo

Chuvieco (2002), abarca longitudes de onda entre 0.7 - 1.3 μm y se lo aplica principalmente, para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

2.4.6.4 Infrarrojo medio

Chuvieco (2002), abarca longitudes de onda entre 1.3 - 8 μm y se utiliza para estimar contenido de humedad en la vegetación y detectar focos de elevada temperatura.

2.4.6.5 Infrarrojo lejano o térmico

Chuvieco (2002), abarca longitudes de onda entre 8 - 14 μm , que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

2.4.7 Microondas

Chuvieco (2002), son radiaciones electromagnéticas, cuyas longitudes de onda son mayores al milímetro (mm) y resulta de gran interés por ser transparentes ante la cubierta nubosa y a las gotas de agua.

2.5 Sensores espaciales

Vargas (1992), manifiesta que el sensor es un elemento fundamental en el sistema de teledetección. Su misión es la de registrar la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la tierra. Generalmente se encuentra instalados en aviones o satélites, cuyo propósito es el de obtener información sobre las propiedades del objeto, sin entrar en contacto directo con ellos



Fuente: European Space Agency (2000)

Figura 2.7: Sensores espaciales

2.5.1 El Satélite Landsat

Rodríguez (2005), Indica que el programa landsat es actualmente administrado por la NASA (Nacional Aeronautics and Space Administration) por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y por la USGS (United States Geological Survey). Este programa empezó sus investigaciones experimentales sobre los recursos naturales terrestres en 1962 con la contribución de algunas agencias federales de los Estados Unidos con el nombre de Programa Satelital ERTS (Earth Resource Technology Satellite). El éxito del programa se debe a factores como la combinación de sensores con bandas espectrales destinadas a la observación de la tierra, resolución espacial funcional y su gran cobertura en orbitas casi polares sincronizadas con el sol. Por otro lado Fernández y Herrero (2001), manifiesta que este sensor es el más empleado en aplicaciones agrícolas, forestales, usos de suelo, hidrológica, recursos costeros y monitorización medioambiental. Sobre todo está ligado a estudios territoriales en los que el parámetro fundamental es el medio ambiente. Sus principales características de la plataforma Landsat: resolución temporal, resolución espacial y resolución espectral.

Cuadro 2.4: Características de las imágenes satelitales landsat 5 TM

LANDSAT 5 TM	
Dimensiones de la escena	185 km x 185 km
Resolución espacial	30 m x 30 m
Resolución temporal	16 días
Resolución espectral (μm)	TM1: 0,45 - 0,52 (Azul) TM2: 0,52 - 0,60 (Verde) TM3: 0,63 - 0,69 (Rojo) TM4: 0,76 - 0,90 (IRC) TM5: 1,55 - 1,75 (IRM) TM7: 2,10 - 2,35 (IRM) TM6: 10,10 - 12,5 (IRT)

Fuente: Chuvieco 1990

2.5.2 Bandas de imágenes del visible al infrarrojo medio

Smith (2001), explica las principales aplicaciones de cada banda de las imágenes del sensor thematic landsat 5 TM, muchas combinaciones de color son también posibles con estas seis bandas de imagen.

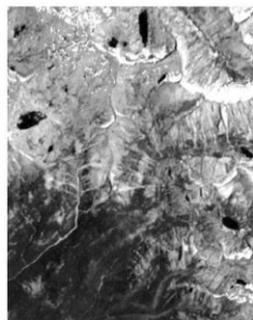


Figura 2.8: Azul (TM 1): provee máxima penetración en cuerpos de agua poco profundos.

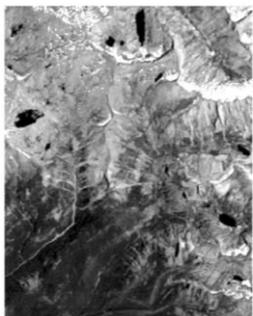


Figura 2.9: Verde (TM 2): Incluye el punto más alto de la luz visible de la vegetación verde, de modo que ayuda a valorar el vigor de las plantas y diferenciar vegetación verde y amarillenta.

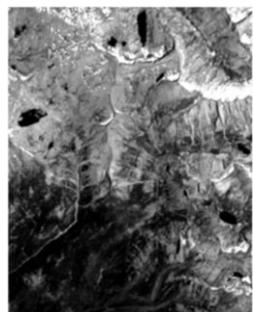


Figura 2.10: Rojo (TM 3): Debido a la fuerte absorción de la clorofila, la vegetación verde aparece más oscura que en otras bandas de luz visible. La intensidad de esta absorción puede ser usada para diferenciar diferentes tipos de plantas. La banda roja es también importante para determinar el color del suelo, y para identificar rojizas, rocas manchadas con hierro que son asociadas frecuentemente con depósitos de oro.

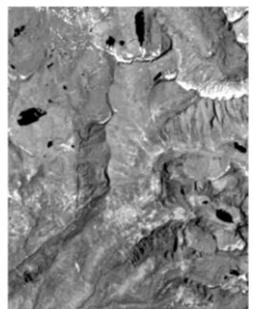


Figura 2.11: Infrarrojo Cercano (TM 4): La vegetación verde es mucho más brillante que en cualquiera de las bandas del visible. Un canal de irrigación es también muy evidente debido a la fuerte absorción por el agua y el contraste con campos vegetados más brillantes.

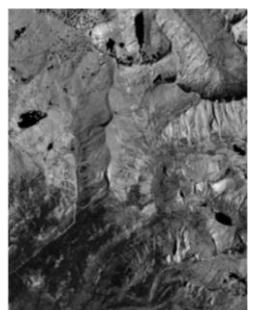


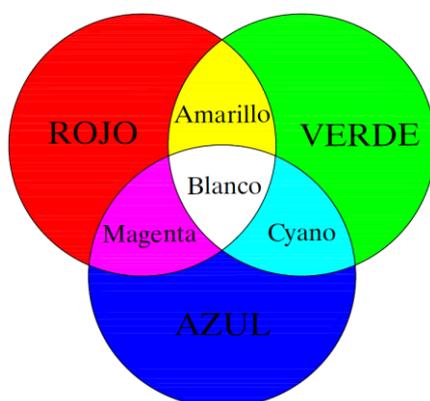
Figura 2.12: Infrarrojo Medio, 1.55 a 1.75 μm (TM 5): Absorbida fuertemente por el agua, hielo y nieve, así es útil para diferenciar nubes y nieve. Es sensible al contenido de humedad del suelo, los campos irrigados aparecen en tonos más oscuros.



Figura 2.13: Infrarrojo Medio, 2.08 a 2.35 μm (TM 7): Similar a la banda TM 5, pero incluye un elemento de absorción encontrado en minerales de arcilla; materiales con abundante arcilla aparecen más oscuros que en la banda TM 5. Útil para identificar suelos arcillosos y zonas alteradas ricas en arcilla que están comúnmente asociadas con depósitos minerales rentables.

2.5.3 Combinaciones con las bandas del sensor landsat

Según Fernández y Herrero (2001), explican que la combinación de bandas espectrales se lleva a cabo con el objeto de obtener una imagen FALSO COLOR, es decir, la aplicación de un color primario (rojo, verde, azul) a cada banda de la imagen.



Fuente: Fernández y Herreno (2001)

Figura 2.14: Colores básicos para la combinación

2.5.3.1 Combinación en color natural: RGB 321 bandas 3-2-1

Fernández y Herrero (2001), Manifiestan que es la combinación más próxima a la percepción de la tierra con nuestros ojos desde el espacio, de ahí el nombre de color verdadero. Las bandas visibles dan respuesta a la luz que ha penetrado más profundamente, y por tanto sirven para discriminar el agua poco profunda y sirven para distinguir aguas turbias, corrientes, batimetría y zonas con sedimentos.

- El azul oscuro indica aguas profundas
- El azul claro indica aguas de media profundidad
- La vegetación se muestra en tonalidades verdes
- El suelo aparece en tonos marrones y tostados
- El suelo desnudo y la roca aparecen en tonos amarillentos y plateados



Fuente: Smith (2001)

Figura 2.15: Combinación en color natural Rojo (TM 3)=R, Verde (TM 2)=G, Azul (TM 1)=B,

2.5.3.2 Combinaciones en falso color RGB

Fernández y Herrero (2001), indican que se pueden utilizar cualquier combinación entre bandas, seleccionando tres a tres cada una de las bandas. A continuación se muestra una relación de las combinaciones mas empleadas con indicación del tipo de ámbito habitual donde se emplean:

Cuadro 2.5: Combinaciones en falso color RGB

Combinación	Tipo de Estudio	Combinación	Tipo de Estudio
357	Erosión de Suelos	247	Clasificación de Cubiertas
354	Erosión de Suelos	245	Clasificación de Cubiertas
347	Sectores Ambientales	752	Geología
234	Sectores Ambientales	754	Geología
157	Clasificación de Cubiertas	753	Geología
257	Clasificación de Cubiertas	135	Geología
145	Clasificación de Cubiertas	354	Clasificación de Suelos
742	Usos de suelo	432	Clasificación de cultivos

Fuente: Fernández y Herreno (2001)

Por otro lado Moreira (2003), manifiesta que durante mucho tiempo, la utilización de imágenes del sensor TM del satélite Landsat ha tenido gran importancia en aplicaciones agrícolas, forestales y recursos naturales en general, debido a la distribución estratégica de sus bandas en el visible, infrarrojo próximo e infrarrojo medio del espectro electromagnético. La vegetación contenida en estos alvos tiene su mayor respuesta espectral en la banda TM4 (infrarrojo próximo). Así mismo, la segunda mayor respuesta espectral es dada en la región del infrarrojo medio que corresponde a la banda TM5 del

Landsat, y finalmente la menor respuesta espectral de la vegetación está dada en la región del visible correspondiente al espectro rojo, banda TM3 del Landsat. Esta clásica combinación de RGB 453 es la más utilizada en el mundo entero para estudios aplicados a los recursos naturales por tener una mayor contrastación de las respuestas espectrales, permitiendo la mayor variabilidad de respuestas de estos alvos, que se manifiestan visualmente.



Fuente: Smith (2001)

Figura 2.16: Combinación en falso color RGB, Infrarrojo Cercano (TM 4) = R, Rojo (TM 3) = G, Verde (TM 2) = B: Simula los colores de una foto infrarrojo color. La vegetación verde sana aparece roja, el pasto amarillento aparece azul verde, y los suelos agrícolas típicos aparecen azul-verde a café. La nieve es blanca, y el agua más profunda aparece negra. Los materiales rocosos aparecen típicamente sombreados de gris o café



Fuente: Smith (2001)

Figura 2.17: Combinación en falso color RGB, Infrarrojo Medio (TM 7) = R, Infrarrojo Cercano (TM 4) = G, Verde (TM 2) = B: La vegetación verde sana aparece verde brillante. El pasto amarillento y suelos agrícolas típicos aparecen entre rosado a magenta. La nieve es celeste claro, y el agua más profunda negra. Los materiales rocosos típicamente aparecen en matices de café, gris, rosado, y rojo.

2.5.4 Técnicas de tratamiento digital de la imagen

Montesinos (1990), manifiesta que el tratamiento digital es el conjunto de transformaciones numéricas realizadas sobre la matriz original para obtener representaciones más adecuadas de la imagen, según las aplicaciones. Mediante el tratamiento digital se pretende extraer la información contenida en los datos aportados por las imágenes de satélite tomadas por los sensores.

2.5.4.1 Correcciones radiométricas

Sobrino *et al.*, (2000), indica que estas correcciones permite eliminar los problemas radiométricos derivados de un mal funcionamiento del sensor, el efecto de la inclinación del satélite o de la posición del sol, o incluso el estado de la atmósfera, de tal forma que las medidas tomadas por el satélite sean comparables entre si, a un cuando se hayan realizado en condiciones muy diversas. Chuvieco (2002), manifiesta que son técnicas que modifican los niveles digitales (ND) originales, con el objetivo de medir la respuesta espectral de cualquier objeto de la superficie terrestre en la imagen con una recepción ideal. La conversión de ND almacenados en una imagen original a variables físicos es un paso previo que resulta de gran utilidad en múltiples fases de la interpretación de imágenes, ya que permite trabajar con variables físicas de significado estándar, comparables en un mismo sensor a lo largo del tiempo, entre distintos sensores y entre la teledetección espacial y otros métodos de detección de energía electromagnética.

2.5.4.2 Corrección geométrica

Usualmente la información obtenida de sensores remotos presenta errores geométricos de origen sistemático, aquellos que pueden ser corregidos utilizando la información desde la plataforma y conociendo la distorsión interna del sensor, y no sistemático, aquellos que no pueden ser corregidos con una precisión aceptable sin un número suficiente de puntos de control terrestre. Entre las causas de errores geométricos de origen sistemático se puede mencionar la velocidad de la plataforma y la rotación de la tierra. Por otro lado, las distorsiones de origen no sistemático incluyen los errores producto de la altitud y posición del sensor (Bernstein, 1983; citado por Jensen, 1996).

La mayoría de la información de sensores remotos comerciales entrega los datos con los errores sistemáticos previamente corregidos, permaneciendo los errores no sistemáticos en la imagen. Para corregir estos errores se puede recurrir a dos

procedimientos comunes, estos son la rectificación imagen a imagen, y la rectificación imagen a mapa (Jensen, 1996).

2.5.4.3 Mejoramiento espectral

Jensen (1996), son aquellas técnicas que permiten mejorar la disposición de los datos satelitales para su análisis cuantitativo.

a. Índice de Vegetación.

Para estudiar la cobertura vegetal de una zona mediante imágenes de satélites, se han desarrollado diversas técnicas que permiten tener datos cualitativos y cuantitativos del estado de la vegetación. Los índices de vegetación son técnicas que transforman las imágenes originales reduciendo directamente en cada pixel el número de sus bandas a un solo dato de información. Básicamente estos índices se fundamentan en el fuerte contraste existente entre la reflectancia expresada en rango de valores de menor a mayor. En las plantas con actividad fotosintética, las moléculas de clorofila responsables de esta función absorben la luz roja, por lo tanto reflejan elementos como nubes, nieve, agua, zonas de suelo sin cobertura y rocas, mientras que las células de las hojas en un estado de turgencia normal reflejan la mayor parte de la radiación infrarroja que reciben (Yaguë, et al. 1999 citado por Chuvieco, 1996).

Entonces, una de las transformaciones aplicadas al estudio de vegetación, es el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). La combinación de las bandas infrarroja cercana (4) y roja (3) para el sensor TM es utilizada para la construcción del NDVI. Este resultado permite visualizar a través de los valores de niveles digitales una discriminación más clara de la vegetación. Existe un rango de valores que es la respuesta de la magnitud espectral que se obtiene del NDVI este oscila entre (-1) y (+1); encontrándose para cubiertas vegetales valores en torno a 0.2. Sin embargo los valores positivos que se muestran en la imagen indican menor reflectancia correspondiendo a zonas de vegetación. Mientras que los valores negativos, generados por una mayor reflectancia más en el rojo que en el infrarrojo pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo sin cobertura y rocas (Chuvieco, 1996).

La fórmula para poder calcular el índice NDVI para el satélite Landsat TM es el siguiente:

$$NDVI = \frac{Banda4 - Banda3}{Banda4 + Banda3}$$

Donde: Banda4 = infrarrojo cercano

Banda3 = rojo visible

2.5.4.4 Clasificación digital de la imagen

Rullan (2002), explica que el propósito es reemplazar el análisis visual de los datos de la imagen con técnicas cuantitativas para automatizar la identificación de las características de la escena, lo que implica un análisis multiespectral de los datos de la imagen y la aplicación de reglas basadas estadísticamente para la determinación de la identificación de la cobertura de terreno de cada píxel en la imagen. El proceso de clasificación que se basa únicamente en reglas de decisión a partir de las radianzas espectrales es llamado Patrón de Reconocimiento Espectral, el cual puede ser supervisado o no supervisado. En contraste, se llamará Patrón de Reconocimiento Espacial al proceso de clasificación que basa sus reglas de decisión en formas geométricas, tamaños y patrones presentes en los datos de la imagen. En ambos casos el intento de procesar la clasificación es categorizar todos los píxeles de una imagen digital dentro de varias clases de cobertura de terreno, o “temas”. Estos datos categorizados podrán entonces ser utilizados para producir mapas temáticos (TM) de la cobertura presente en una imagen, y/o producir una suma de estadísticos sobre las áreas cubiertas por cada tipo de cobertura.

b. Clasificación no supervisada

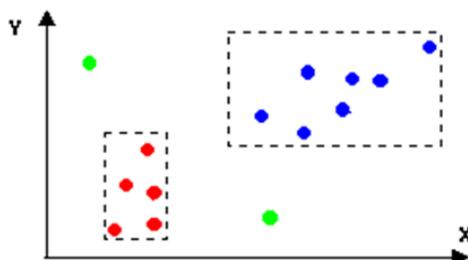
Rullan (2002), explica que es un procedimiento por el cual los píxeles de una imagen son asignados a clases espectrales sin que el operador tenga conocimiento de la naturaleza de dichas clases. Los algoritmos que se utilizan son clusters o agrupamientos. Estos procedimientos sirven para determinar el número y localización de las clases espectrales en las que se pueden dividir los datos digitales. El operador puede identificar a posteriori la naturaleza de las clases, con ayuda de mapas o campañas de campo. La clasificación no supervisada permite conocer la distribución de las clases espectrales en una imagen, antes de realizar un análisis más detallado por medio de una clasificación supervisada.

c. Clasificación supervisada

Rullan (2002), indica que es aquella en la que el operador especifica el número de clases a diferenciar y las características estadísticas de cada clase. Sin duda es el procedimiento más utilizado en análisis cuantitativo de datos de teledetección. Los diversos algoritmos que se utilizan están basados en que cada clase espectral puede ser descrita por un modelo de distribución probabilística en el espacio multiespectral. Yébenez y Giner (2000), indica que este método de entrenamiento requiere un cierto conocimiento de la zona de estudio que permite delimitar sobre la imagen unas zonas o áreas representativas de las distintas categorías que se pretenden discriminar. Estas áreas se conocen como *training fields* (áreas de entrenamiento) ya que sirven para entrenar al ordenador para que pueda reconocer las distintas categorías. A partir de estas áreas el ordenador calcula diversos parámetros estadísticos de los ND que definen cada clase, para luego clasificar el resto de píxeles en una categoría determinada atendiendo a sus ND. Resulta adecuado seleccionar varias áreas de entrenamiento por clase para reflejar correctamente su variabilidad en la zona de estudio. En cuanto a la cantidad de píxeles se recomienda que las áreas de entrenamiento tengan un tamaño de al menos el número de bandas espectrales a utilizar por 10 (Chuvienco 1996). Este proceso se puede llevar a cabo utilizando los métodos que a continuación se describen.

- **Método del paralelepípedo**

Es el método que menos cantidad de información requiere a partir de las muestras. Se fija un área de dominio para cada clase, según sus valores máximo y mínimo aunque también se pueden establecer otros límites en función de la centralidad y dispersión de los valores. Esa área tendrá la forma geométrica de un paralelepípedo, que definirá las regiones en el espacio n-dimensional. Un píxel pertenece a una clase si entra dentro del paralelepípedo que la clase define. Si no entra dentro de ninguna clase, queda sin clasificar (Iturrate 1998).



Fuente: Iturrate (1998)

Figura 2.18: Método de clasificación del paralelepípedo

Es un método rápido y simple. Viene bien como primera aproximación. Como desventaja, puede producir píxeles sin clasificar y paralelepípedos superpuestos.

- **Método de distancia mínima.**

Se incluye el píxel en aquella categoría que minimiza la distancia entre el píxel y el centroide de la clase. El centroide de una clase es un vector, cuyas componentes son las medias aritméticas de los valores de muestra de los píxeles de esa clase en cada banda. Se emplea la distancia euclidiana (Iturrate 1998).

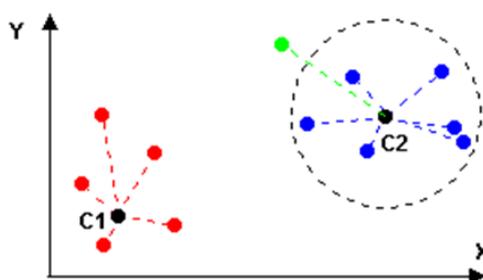
$$d_{ai} = \sqrt{\sum_{k=0}^n (X_{ak} - \bar{X}_{ki})^2}$$

Donde:

d_{ai} = distancia del píxel 'a' a la clase 'i'

X_{ak} = componente 'k' del píxel 'a'

\bar{X}_{ki} = componente k de la media de los píxeles de la clase i



Fuente: Iturrate (1998)

Figura 2.19: Método de clasificación de mínima distancia

Se puede indicar un umbral para cada clase, indicando la máxima distancia permitida para asignar la pertenencia a esa clase. Así podría parametrizar distintas distancias máximas para distintas clases, en función del grado de concentración que presentan los píxeles.

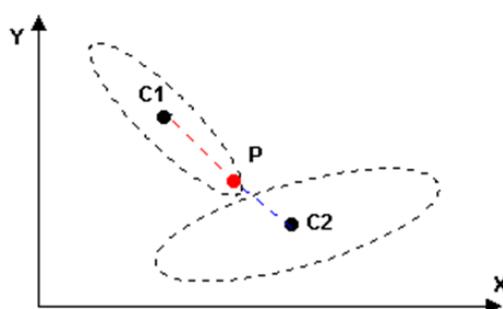
También es un método rápido. Pero presenta la desventaja de que no tiene en cuenta la variabilidad entre clases (la nube de puntos con forma elipsoidal).

- **Método de Distancia de Mahalanobis**

Asume previamente que los histogramas de las clases tienen distribuciones normales. La forma geométrica de la nube de puntos que representa al conjunto de píxeles

pertenecientes a una clase puede ser descrita por un elipsoide. Dicha forma de elipsoide depende directamente de la covarianza entre las distintas variables. La localización, forma y tamaño de las elipses reflejan la media, varianzas y covarianzas de los datos, y esta idea se puede trasladar fácilmente a n-dimensiones (Iturrate 1998).

La distancia de Mahalanobis tiene en cuenta la variabilidad de clases. Por ejemplo clasificando áreas urbanas puede haber píxeles correctamente clasificados más lejos de la media que en una clase de agua, donde los valores están todos más agrupados (menor varianza). El siguiente gráfico expresa este fenómeno:



Fuente: Iturrate (1998)

Figura 2.20: Método de distancia de mahalanobis

Si se hubiera clasificado por mínima distancia, el punto P hubiera sido asignado a la clase C2 ya que es la que más cerca está en términos de distancia euclídea. Pero por la naturaleza intrínseca de la correlación que existe entre los píxeles de cada clase, vemos que a quien en realidad pertenece es a la clase C1. Este hecho es el que tiene en cuenta la distancia de Mahalanobis.

La fórmula para calcular dicha distancia es:

$$d_i = \sqrt{(x - \bar{x}_i)^T * S_i^{-1} * (x - \bar{x}_i)}$$

Donde:

i = representa la clase 'i'

x = es el vector de muestras del píxel que se quiere medir la distancia

\bar{x}_i = es el vector de medias de los píxeles de la clase i

S_i = es la matriz de varianza-covarianza de los valores de los píxeles de la clase i

- **Método de máxima probabilidad**

Este método considera que los valores de reflectancia de cada categoría se ajustan a una distribución normal, lo cual permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. Con ello se puede calcular la probabilidad de que un determinado píxel pertenezca a una categoría; el cálculo se realiza para todas las categorías definidas y el píxel se clasifica en la clase a la cual tenga más probabilidad de pertenecer.

Este clasificador es el más complejo y, por lo tanto, el que mayor volumen de cálculo requiere, pero es el más confiable ya que se ajusta fielmente a la distribución original de los datos (Yébenez y Giner 2000).

Para calcular la probabilidad asociada a un cierto ND se necesita la media y la desviación típica de cada categoría. En el caso de trabajar con una sola banda la probabilidad se calcula de la siguiente forma:

$$p(x / A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2}} e^{\left\{-\frac{(ND_x - \overline{ND}_A)^2}{2\sigma_A^2}\right\}}$$

Donde:

$p(x/A)$ = probabilidad de que un cierto píxel x (definido por ND_x) pertenezca a la clase A

\overline{ND}_A = media de la clase A

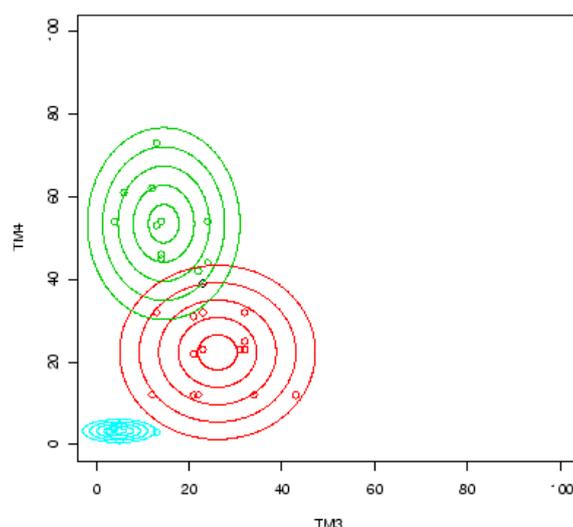
σ_A^2 = varianza de la clase A

Una vez determinada la probabilidad para todas las categorías el píxel será asignado a la clase A , sólo si:

$$p(x / A) \geq p(x / B)$$

$A \neq B$, con $B = 1, 2, 3, \dots, m$; m = número de categorías

Para el caso de dos bandas, los límites de las categorías tienen una forma elipsoidal (figura 2.21). Cada una de estas elipses es una línea de isoprobabilidad, es decir todos sus puntos tienen la misma probabilidad de pertenecer a la categoría asociada.



Fuente: Yébez y Giner (2000)

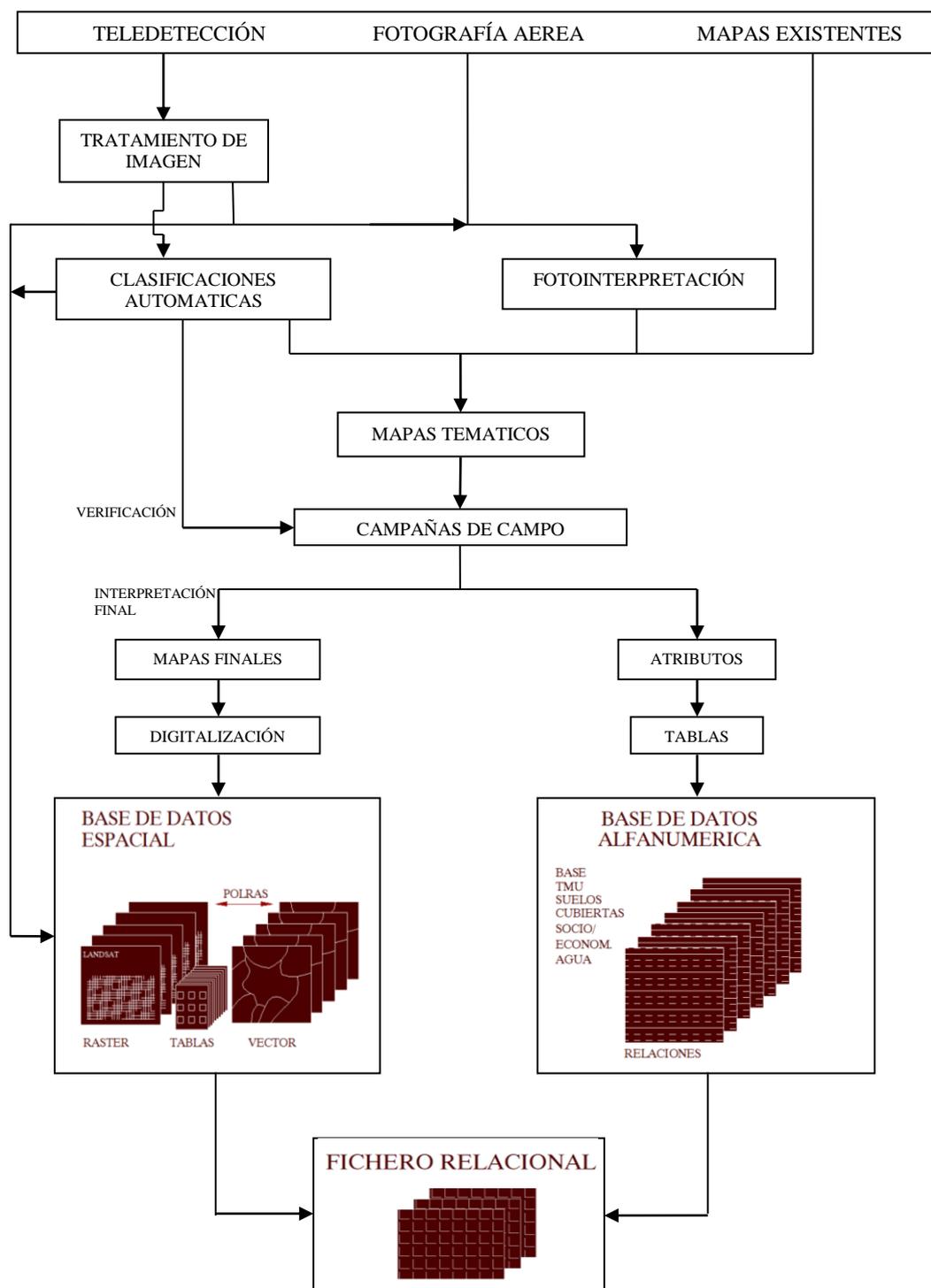
Figura 2.21: Extensión a dos bandas del algoritmo de máxima probabilidad

Con más de dos bandas resulta imposible representar gráficamente este criterio de clasificación y se debe extender la fórmula de la probabilidad. Una vez que el ordenador haya asignado los píxeles puede establecerse algún criterio que permita asignarlos a una clase sólo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Este criterio asume que las categorías presentan una distribución normal; sin embargo, la hipótesis de que los datos de reflectividad siguen una distribución normal no siempre se cumple y debería verificarse siempre.

2.6 Sistemas de información geográfica SIG

Según, Achuy (2006), indica que el sistema de información geográfica es una tecnología de manejo de información geográfica formada por equipos electrónicos (hardware) programados adecuadamente (software) que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con éstos siguiendo los criterios impuestos por el equipo científico (personal). Huxhold (1991), manifiesta que los SIG permiten el manejo de gran cantidad de información sujeta a variabilidad espacial. El manejo de esta gran cantidad de datos con metodologías convencionales, es un proceso laborioso, repetitivo y costoso. “Los SIG son sistemas de gestión de base de datos para la captura, almacenamiento, manipulación, análisis y salida de datos georreferenciados”. Burrough (1986), Define un GIS como “un poderoso conjunto de herramientas capaz de capturar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real para determinadas aplicaciones“. Un GIS debe ser entendido como una base de

datos que permite al usuario modelizar “escenarios”. Al introducir diferentes variables en el sistema, se pueden conocer las consecuencias de una acción antes de que ésta sea irreversible.



Fuente: Burrough (1986)

Figura 2.22: Entrada de datos en un GIS

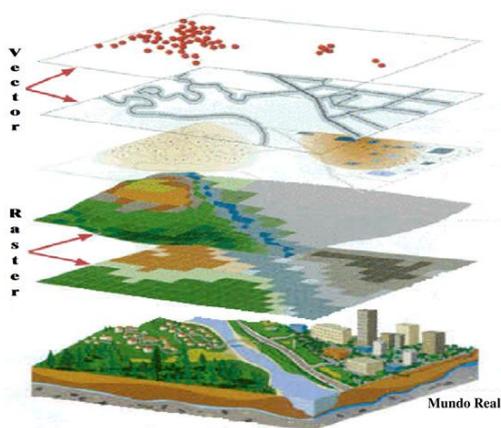
2.6.1 Modelo de datos espaciales en un SIG

a. Modelo vectorial

La estructura del vector de datos es una abstracción del mundo real donde los datos de posición se representan en forma de coordenadas. En los datos vectoriales, las unidades básicas de información espacial son puntos, líneas y polígonos. Cada una de estas unidades está compuesta simplemente como una serie de uno o más puntos de coordenadas. Skidmore (2002).

b. Modelo raster

La estructura ráster consiste en la representación de nuestro mundo real o la representación de este en una grilla compuesta de celdas (pixel). Esta serie de datos ráster, basado en celdas, está orientado para representar fenómenos tradicionalmente geográficos que varían continuamente en el espacio, como la elevación, inclinación o precipitación. Pero además pueden ser utilizadas para representar tipos de información menos tradicionales, tales como densidad de población, comportamiento del consumidor y otras características demográficas. Achuy (2006).



Fuente: Achuy (2006)

Figura 2.23: Modelo de datos raster y vectorial

2.6.2 Ventajas y Requerimientos de un SIG:

Según Núñez y García (2000), las principales ventajas y requerimientos de un SIG son los siguientes:

- Los SIG posibilitan la integración de fuentes diversas tales como elementos cartográficos, datos estadísticos, base de datos tradicionales, fotografías aéreas e imágenes satelitales.

- Posibilidad de una gran variedad de modelados cartográficos con una mínima inversión de tiempo y dinero.
- Los modelos conceptuales pueden ser probados rápidamente y repetidas veces facilitando su evaluación.
- Los análisis de modificaciones pueden ser ejecutados eficientemente.
- La adquisición, procesamiento, análisis y modelados y los procesos de tomas de decisiones son integrados en un contexto común de flujo de información
- Capacidad de manejar grandes y heterogéneas bases de datos referenciados espacialmente.
- Capacidad de las bases de datos para responder a preguntas respecto de la existencia, localización y propiedades de una amplia gama de objetos espaciales.
- Eficiencia en el manejo de preguntas y respuestas, de manera que el sistema sea lo más interactivo posible.
- Flexibilidad y adaptabilidad a las diferentes necesidades de múltiples usuarios.

2.7 Interpolación

Achuy (2006). Interpolación es un procedimiento matemático utilizado para predecir el valor de un atributo en una locación precisa a partir de valores del atributo obtenidos de puntos vecinos ubicados al interior de la misma región. A la predicción del valor de un atributo en lugares fuera de la región cubierta por las observaciones se le llama extrapolación. Se utiliza interpolación para transformar un número finito de observaciones, obtenidas en base a ubicaciones geográficas precisas, a un espacio continuo de manera que el patrón espacial presentado por las observaciones puntuales pueda ser comparado con los patrones espaciales de otras variables bajo consideración.

La interpolación es necesaria:

- Cuando la superficie rasterizada (GRID) tiene una resolución que es diferente de la resolución pedida.
- Cuando una superficie continúa es representada por un modelo que es diferente al necesitado.
- Cuando los datos no cubren toda la región de interés de estudio

2.7.1 Clasificación de los métodos de interpolación

2.7.1.1 Métodos de interpolación globales

a. Método Kriging

Achuy (2006), indica que el método geo-estadístico o kriging, describe la correlación tanto espacial como temporal que existe entre los valores de un atributo. Tradicionalmente se le ha utilizado en las llamadas geo-ciencias (geofísica, hidrogeología, etc.), sin embargo, sus principios se aplican cada vez más en una amplia variedad de campos científicos como pesqueras, silvicultura, ingeniería civil, procesamiento de imágenes, cartografía, meteorología, etc.

En la estadística clásica, se manejan variables independientes, donde se asume cero continuidad (correlación) entre los datos. La Geo-estadística por su parte, asume lo contrario, señalando que los datos están correlacionados y que esta continuidad se puede medir para puntos, bloques o volúmenes. Por lo tanto, en esta disciplina, se utiliza el concepto de variable regional que describe fenómenos, atributos con una distribución geográfica y con una cierta continuidad espacial.

Kriging es el método de cálculo de una variable regional en un punto, al interior de una superficie o dentro de un volumen usando un criterio de minimización de la estimación de la varianza. Para ello se resuelve un conjunto de ecuaciones utilizando la información presente en el variograma y las distancias relativas entre los datos y la posición del punto (o bloque/volumen) donde el valor interpolado es pedido. Estas ecuaciones contienen la covarianza entre el punto a ser estimado y los datos y las covarianzas entre los datos mismos. Kriging es un método de interpolación exacto en el sentido que su estimación en un punto de control coincide con el valor observado.

b. Interpolación por Método Kriging

Achuy (2006), explica que el interpolador de KRIGING, utiliza en la estimación las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado, por lo que su uso implica un análisis previo de la información, con el objeto de definir o extraer de esta información inicial un modelo que represente su continuidad espacial.

Este método de interpolación asume que la distancia o la dirección entre puntos de la muestra reflejan una correlación espacial que puede ser usada para explicar la variación en la superficie. Kriging encaja una función matemática a un número especificado de puntos, o todos los puntos dentro de un radio especificado, determinando el valor de salida para cada posición. Kriging es un proceso de multipaso; esto incluye el análisis exploratorio estadístico de los datos, variograma del modelamiento, la creación de la superficie, y (opcionalmente) la exploración de una superficie de discrepancia.

Esta función es apropiada cuando se sabe que hay una distancia espacialmente correlacionada o la tendencia direccional en los datos. A menudo es usado en la ciencia de suelo y la geología.

2.7.1.2 Métodos de interpolación locales

a. Interpolación IDW (Gravitacional o Inverso de la Distancia)

Achuy (2006), manifiesta que cada punto de la muestra ejerce una influencia sobre el punto a determinar y disminuye en función de la distancia. Así cada punto vecino contará con un "peso" en la determinación de la cota del punto a interpolar, que será mayor cuanto más cerca se encuentre, siguiendo el principio de correlación espacial.

b. Interpolación por Método Spline

Achuy (2006), explica que el método Spline estima valores usando una función matemática que reduce al mínimo la curvatura de la superficial total, dando como resultado una superficie lisa que pasa exactamente a través de los puntos muestreados. Este método es el mejor para con cuidado variar superficies como la elevación, alturas de superficie del agua, o concentraciones de contaminación. Hay dos métodos Spline: Regularized y tensión (Regularizado y Tensión)

Regularized: El método Regularizado crea una superficie suave, de manera gradual cambiando la superficie con los valores que pueden estar fuera de la gama de datos de la muestra.

Tensión: El método de Tensión suaviza la rigidez de la superficie según el carácter del fenómeno modelado. Esto crea la superficie lisa con valores estrechamente obligados por la gama de datos de la muestra.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

3.1.1 Cuenca del río Ilave

El área de estudio, comprende la cuenca del río Ilave presentada en la figura 3.1, la misma que se encuentra en la región Puno y comprende las provincias de Chucuito, el Collao y Puno, abarca los distritos de Huacullani, Juli, Capazo, Mazocruz, Conduriri, Ilave, Acora, Platería, Chucuito, Laraqueri, Puno y San Antonio. Geográficamente está localizada en la sierra sur del Perú, entre las coordenadas UTM siguientes:

Cuadro 3.1: Coordenadas geográficas de la cuenca del río Ilave

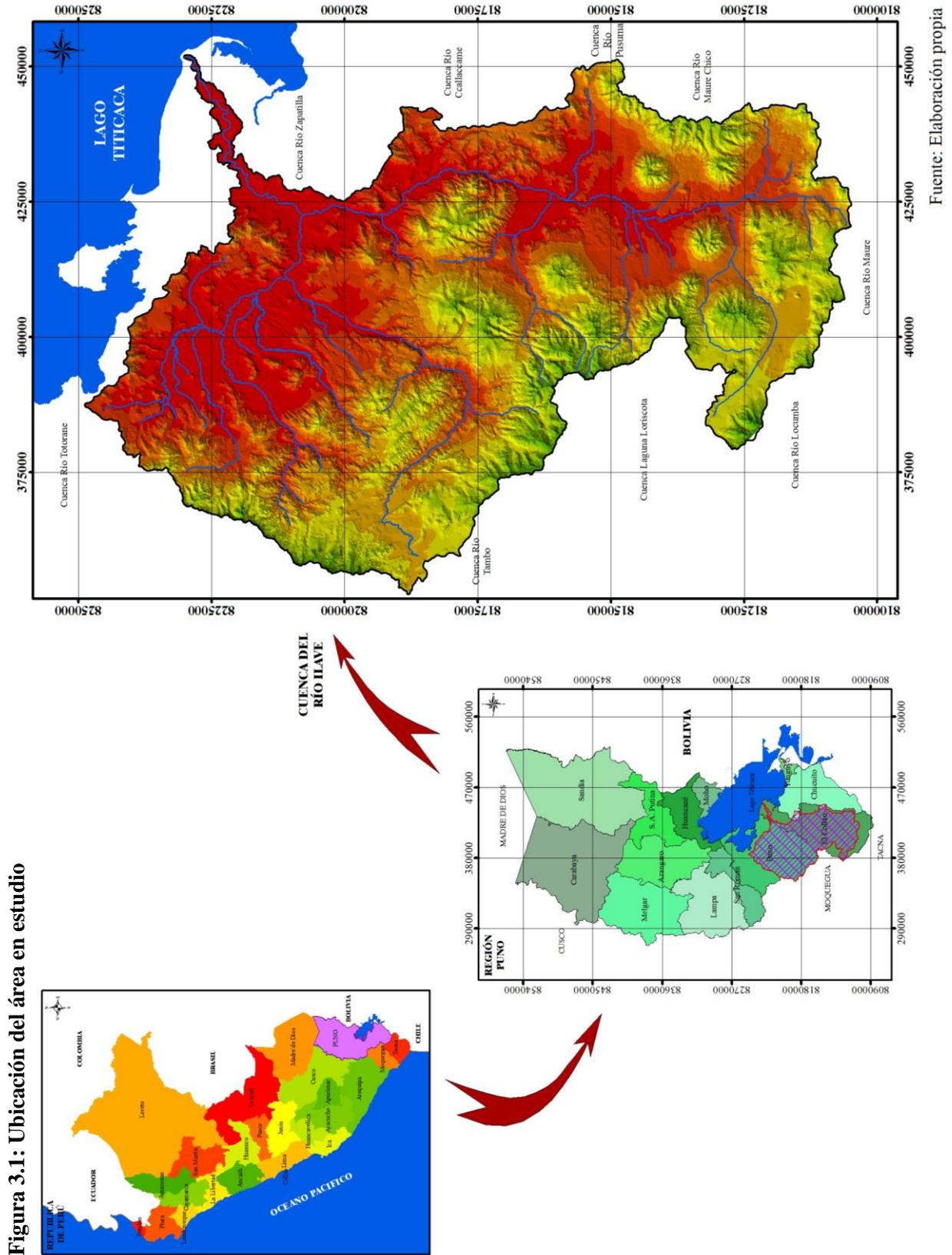
	Este	Norte
Mínimo	352,354.02	8'104,843,88
Máximo	452,136.92	8'248,766,35

Fuente: Elaboración propia

Hidrográficamente se encuentra ubicada en la vertiente del Lago Titicaca, la misma que pertenece al Sistema Hídrico Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopo y Lago Solar de Copaisa (T.D.P.S.). Limita por el este con el Lago Titicaca y con las cuencas de los ríos Zapatilla, Pusuma y Mauri Chico, por el oeste con la cuenca del río Tambo y laguna Loriscota, por el norte con la cuenca del río Illpa y la zona Circunlacustre del Lago Titicaca y por el sur con la cuenca del río Maure.

La cuenca abarca una superficie total de 7837.20 Km², desde las nacientes hasta la confluencia con el lago Titicaca, presenta dos ejes principales de drenaje, como son los ríos Huenque y Aguas Calientes, que se unen para formar el río Ilave, el curso principal de la cuenca del río Ilave, nace desde el río Coypa Coypa - Chichillapi - río Llusta Baja - río Huenque - río Ilave - hasta la desembocadura al Lago Titicaca. La longitud del cauce principal es de 211.00 Km y tiene una pendiente media de 0.40%.

La altitud máxima en la cuenca del río Ilave es de 5588 msnm., y la mínima es de 3815.16 msnm.



3.2 Materiales y Equipos

3.2.1 Materiales y equipos de campo

- Sistema de Posicionamiento Global – GPS
- Cámara Digital
- Cuaderno de Campo
- Tablero
- Motocicleta
- Wincha de 50 mt y otros

3.2.2 Materiales y equipos de gabinete

- 01 Computadora Corel i5
- 01 Impresora a color
- 01 Escáner
- Papel bond A-4 (80 gramos)
- Software Erdas Imagine v.9.2 (Tratamiento digital de imágenes)
- Software ArcGIS v.9.3 (Generación de cartografía)
- Software Auto CAD LAND 2010 (Generación de cartografía)
- Microsoft Office 2010 (Word y Excel)
- Calculadora y otros

3.2.3 Información cartográfica e imágenes de satélite

3.2.3.1 Cartografía

- Se utilizara cartas nacionales del Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.) de la zona, a escala 1.100,000 con el siguiente detalle:

Cuadro 3.2: Cartas nacionales (IGN)

Hoja Catastral	Numero	Hoja Catastral	Numero
Puno	32 - V	Mazocruz	34 - X
Acora	32 - X	Huallire	34 - V
Pichacani	33 - V	Pizacoma	34 - Y
Ilave	33 -X	Tarata	35 - V
Juli	33 - Y	Río Maure	35 - X

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.2 Imágenes landsat 5 TM

Se utilizara imágenes satelitales del sensor Landsat 5 TM, proporcionados por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE – Brasil), estas imágenes están compuestas por diferentes bandas espectrales (ver anexo 4 y 5), que son útiles para estudios de cobertura terrestre: vegetación, suelos, forestación, nieve, agua, etc., a continuación se detallan las imágenes a utilizar:

Cuadro 3.3: Imágenes satelitales landsat 5 TM

Imagen	Sensor	Resolución Espacial	Escena	Fecha de la Imagen	Localización
Landsat	TM	30mt x 30mt	02 - 71	27/08/2011	Puno - Perú
Landsat	TM	30mt x 30mt	02 - 72	27/08/2011	Puno - Perú

Fuente: Elaboración propia

3.2.3.3 Datos de elevación digital SRTM

El mapa de elevación digital (DEM) proviene de la Misión Topográfica de Radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mision). Esta misión fue diseñada para recoger datos tri-dimensionales de la superficie terrestre y lo integran: la “ National Aeronautics and space Administración” (NASA), la “National Geospatial-Intelligence Agency” de los Estados Unidos (NGA), el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y las agencias espaciales de Alemania (DLR) e Italia (ASI) y está dirigida por el Laboratorio de propulsión a Chorro (Jet propulsión Laboratory-JPL) de la NASA, bajo la dirección del programa de Ciencias Terrestres de la NASA.

La misión recolecto con éxito la información del 80% de la superficie de la tierra, entre las latitudes 60° Norte y 56° Sur y los tienen disponible para el público en dos formas: 1 arc-seg (\approx 30m) para EEUU y 3 arc-seg (\approx 90m) para las regiones comprendidas entre las latitudes 60°N y 56°S. Para la presente investigación se utilizara dos (02) modelos de elevación digital que a continuación se detallan:

Cuadro 3.4: Modelos de elevación digital

SRTM	Resolución Espacial	Latitud		Longitud	
		Mín	Máx	Mín	Máx
22_16	90mt x 90mt	20 - S	15 - S	75 - W	70 - W
23_16	90mt x 90mt	20 - S	15 - S	70 - W	65 - W

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Precipitación

Los datos de precipitación que se utilizara en la presente investigación serán del estudio de “Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del Río Ilave” realizado el año 2009 por la Administración Local de Agua Ilave, esta información ha sido analizada. Los datos fueron reunidos de varias fuentes: SENAMHI, Pelt y Pet-Tacna; un total de 17 estaciones, de los cuales 6 se encuentran ubicados dentro de la cuenca y 11 en cuencas vecinas a la cuenca del río Ilave, las mismas se detallan en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.5: Estaciones meteorológicas

Nº	Estación	Tipo	Ubicación Política			Ubicación Geográfica		Altitud (msnm)	Propietario
			Dpto.	Provincia	Distrito	UTM (mt)			
						Este	Norte		
1	Capazo	CO	Puno	El Collao	Capazo	421787,57	8099529,66	4530	Senamhi
2	Vilacota	CO	Tacna	Tarata	Tarata	388211,12	8107052,51	4390	Senamhi
3	Coypa Coypa	PLU	Puno	El Collao	Mazocruz	400658,10	8118364,42	4450	Pet Tacna
4	Chichillapi	PLU	Puno	El Collao	Mazocruz	421905,43	8129518,26	4050	Pet Tacna
5	Mazocruz	CO	Puno	El Collao	Mazocruz	424737,79	8149061,24	4003	Senamhi
6	Pizacoma	CO	Puno	Chucuito	Pizacoma	460750,24	8130693,26	4060	Senamhi
7	Chilligua	PLU	Puno	Chucuito	Juli	428524,93	8171169,36	3960	Senamhi
8	Yorohoco	CO	Puno	Chucuito	Huacullani	465801,14	8168538,55	3845	Pelt
9	Pocoaque	CO	Puno	Chucuito	Pomata	469565,64	8188978,33	3850	Pelt
10	Juli	CO	Puno	Chucuito	Juli	450842,53	8208468,60	3812	Senamhi
11	Ilave	CO	Puno	El Collao	Ilave	431019,57	8221195,27	3880	Senamhi
12	Rincón de la Cruz	CO	Puno	Puno	Acora	413241,13	8231937,13	3835	Senamhi
13	Laraqueri	CO	Puno	Puno	Laraqueri	385967,18	8213657,74	3900	Senamhi
14	Puno	CP	Puno	Puno	Puno	391617,70	8250022,65	3820	Senamhi
15	Mañazo	CO	Puno	Puno	Mañazo	355407,10	8252723,44	3920	Senamhi
16	Pampa Umalzo	CO	Moquegua	Mariscal Nieto	Moquegua	348358,99	8133726,09	4601	Senamhi
17	Ichuña	CO	Moquegua	Mariscal Nieto	Sánchez Cerro	334032,85	8215771,11	3800	Senamhi

Fuente: ALA Ilave, Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del Río Ilave, 2009

La distribución de las estaciones en el área de estudio se muestra en la primera figura 3.2 y en la segunda se presenta el polígono de Thiessen que delimita las áreas de influencia de cada estación en toda la cuenca.

3.2.5 Suelos

La información de suelos que se utilizara para la presente tesis será del estudio de investigación denominado “Propuesta de zonificación agroecológica y de sistemas agropecuarios en la cuenca de los ríos Ilave - Huenque (Puno, Perú)”, desarrollado el año 2002, información que fue elaborado en base a información de estudios realizados por la ONERN (1984) e INRENA (1996).

3.3 Metodología

La metodología seguida en la presente investigación se esquematiza en una serie de pasos descritos en la figura 3.3.

3.3.1 Fase preliminar

3.3.1.1 Recopilación de la información básica

La primera actividad realizada fue la de recopilar datos relacionados con los procesos físicos de interés, considerando que en la cuenca del río Ilave se han realizado distintos estudios que contienen información que puede ser utilizada como base para el estudio. La información recopilada de estudios realizados en la cuenca y otras fuentes, fue la siguiente; información climática, suelos, imágenes satelitales del sensor Landsat TM 5 de resolución espacial de 30*30 mt, modelos de elevación digital DEM (SRTM) de resolución espacial de $\approx 90*90$ mt y cartas nacionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:100,000.

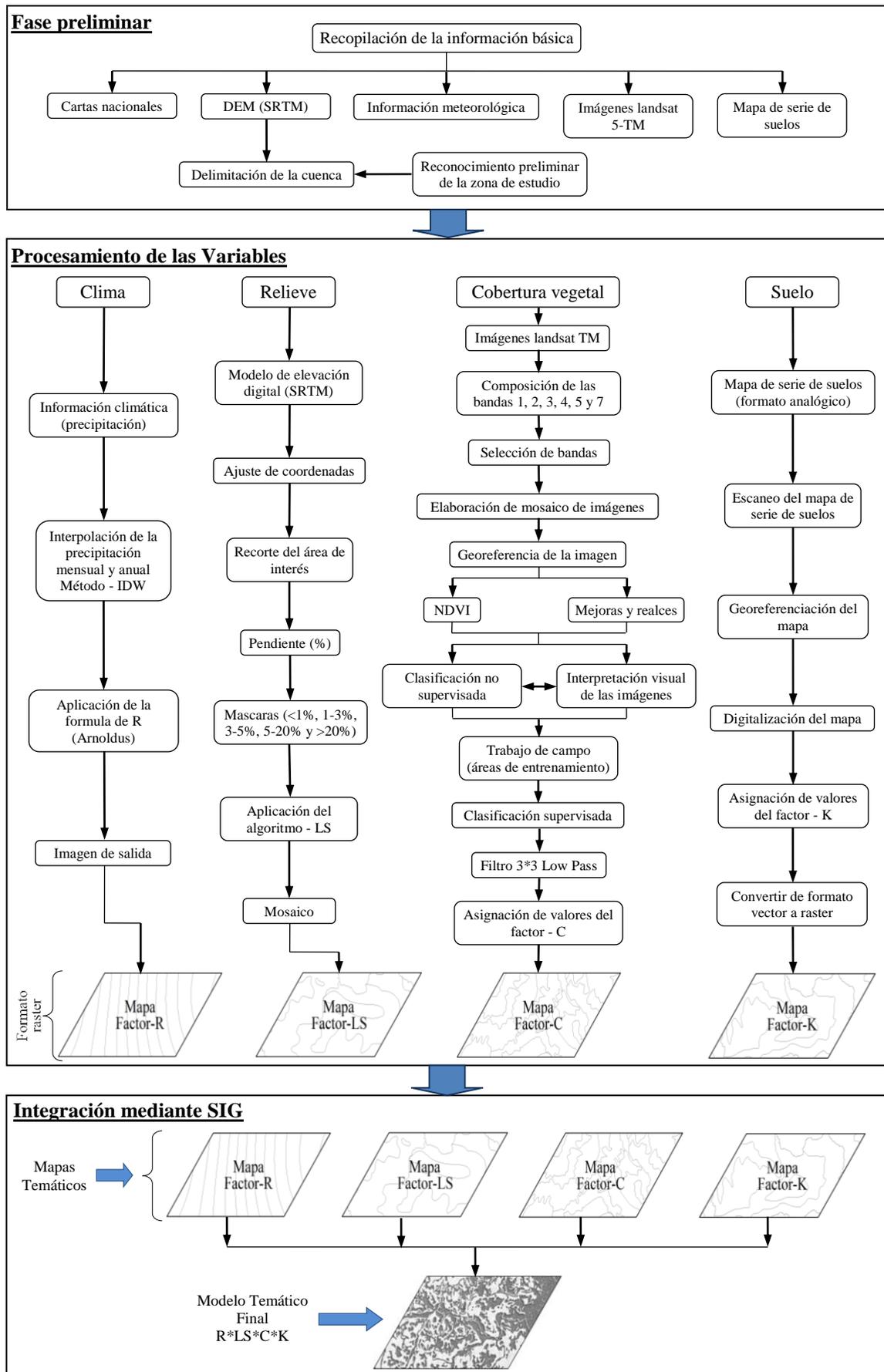
3.3.1.2 Delimitación hidrográfica de la cuenca

Como paso preliminar para la delimitación hidrográfica de la cuenca del río Ilave, se construyo un mosaico de los modelos de elevación digital provenientes de la Misión Topográfica de Radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mision), en vista de que el área de estudio abarca dos (02) escenas, seguidamente la metodología que se desarrollo fue la siguiente:

a. Generación de mapa de dirección de flujo

Antes de la generación del mapa de dirección de flujo se ubican las depresiones, en el mapa de modelo de elevación digital, para luego rellenarlas. Para la creación del mapa flow direction se realizaron los siguientes pasos:

Figura 3.3: Diagrama de la metodología desarrollada



Fuente: elaboración propia

1. Identificación de las depresiones en el mapa DEM.
2. Llenado (Fill) de depresiones en el mapa DEM.
3. Creación del mapa de Dirección de Flujo

b. Generación de mapa de flujo acumulado

La capa de acumulación de flujo es la que permite visualizar la distribución de la red de drenaje. Las celdas que tienen los mayores valores de acumulación definen dicha red. Para la obtención del mapa de flujo acumulado se genero el mapa con la herramienta de hidrología y luego se realizo una reclasificación de este para visualizar la red de drenaje.

Se utilizo la Herramienta “Flow Accumulation” del ArcToolbox, para calcular en cada una de las celdas del grid, el flujo acumulado sobre la misma, es decir, el número de celdas que vierten a ella. La capa de “Flow Accumulation” es la que permite visualizar la distribución de la red de drenaje. Las celdas que tienen los mayores valores de acumulación definen dicha red.

c. Generación de mapa redes hidrográficas

Para la generación de la red hidrográfica es necesario ejecutar la siguiente metodología:

- **Generación de la red hidrográfica en formato raster**

Para la generación del mapa de la red hidrográfica de la cuenca del río Ilave se utilizo el mapa de Acumulación de flujo, porque este es el que permite visualizar la red de drenaje, pero para ello fue necesario que todos los valores menores a las 350,000 celdas acumuladas, no fueran consideradas (No Data).

- **Obtención de tramos independientes de la cuenca del río Ilave**

Para la obtención de los tramos independientes de los ríos tributarios de la cuenca del río Ilave se utilizo la red hidrográfica en formato raster, este mapa es necesario para la generación de todas las subcuencas.

- **Clasificación de la red de drenaje**

Para obtener el orden de la red de drenaje se utilizo el método de Strahler para generar el orden de la cuenca. Por lo que el orden de la Cuenca del río Ilave es de orden 7

según el método, este método fue llevado a cabo con la herramienta de hidrología de ArcGis 9.3.

- **Conversión de red de drenaje en formato raster a formato vectorial**

Se convierte la imagen raster a un formato vectorial con extensión shp

d. Determinación de subcuencas

Para la generación de subcuencas con las áreas de drenaje de mayor importancia se siguió la siguiente metodología:

- **Generación de puntos para definir las microcuencas**

La generación de estos puntos consiste en la digitalización de ellos a partir del cual se delimitaran las subcuencas.

- **Ajuste de puntos**

Ajustar los puntos digitalizados a las celdas cercanas que tienen el mayor valor de acumulación de flujo.

- **Generar las subcuencas utilizando la herramienta “Watershed”**

Con esta se generan las subcuencas de toda la Cuenca del río Ilave, (figura 3.4).

3.3.1.3 Reconocimiento preliminar de la zona de estudio

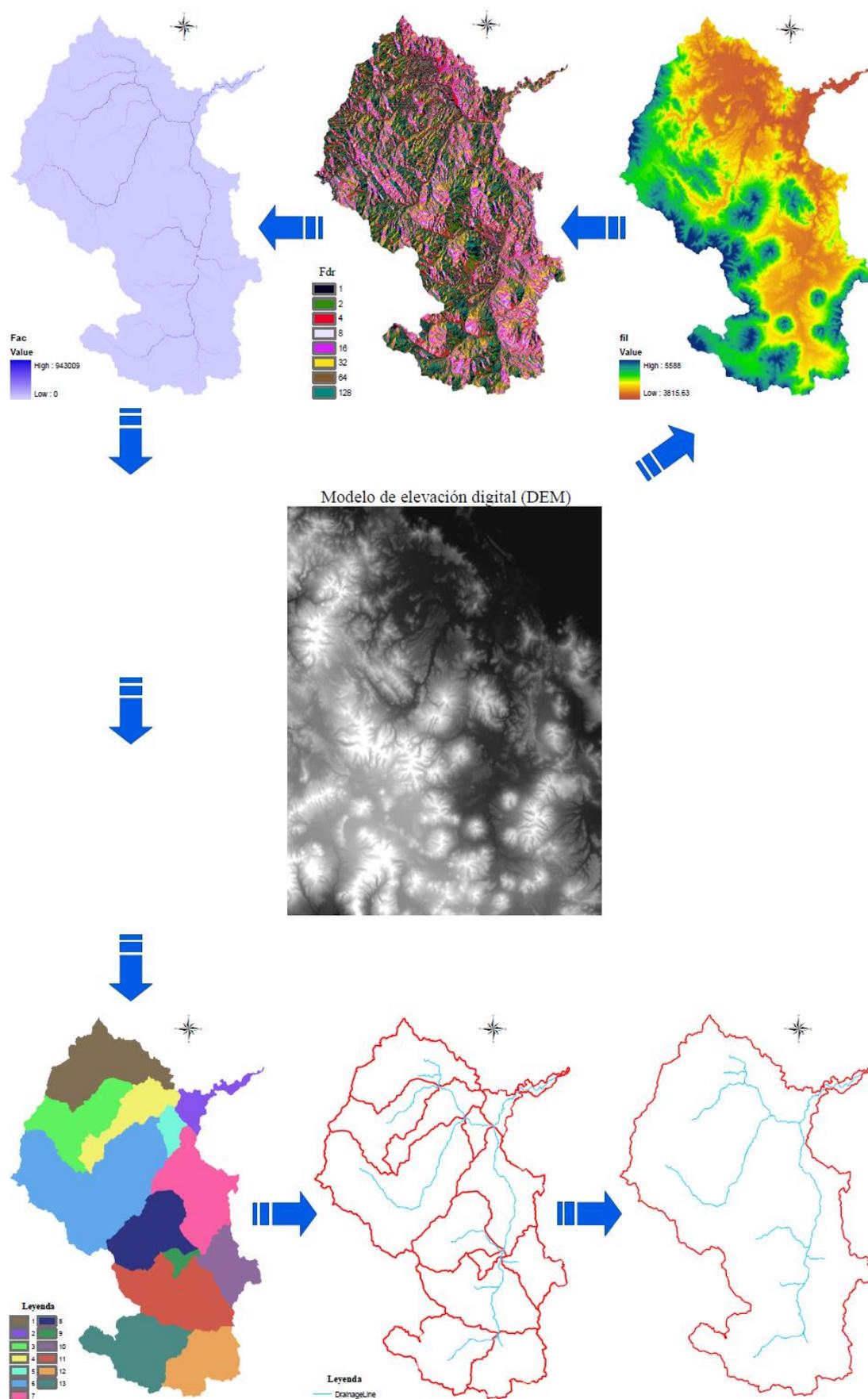
En esta fase se ha realizado el reconocimiento in situ de la mayor parte del área de estudio; se observó el estado en que se encuentran las diferentes zonas, principalmente en cuanto a cobertura vegetal, topografía del terreno y las zonas con problemas de erosión hídrica.

3.3.2 Procesamiento de las variables

Para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Ilave, se ha utilizado el modelo USLE (Ecuación Universal de la Perdida de Suelo), la cual es muy utilizada en diferentes partes del mundo, dada la facilidad de su aplicación.

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

Figura 3.4: Delimitación de la cuenca hidrográfica del río Ilave a partir del DEM



Fuente: Elaboración propia

Donde:

A = es la pérdida de suelo por unidad de superficie, que se obtiene por el producto del resto de los factores (tn/ha/año).

R = capacidad erosiva de las lluvias (MJ.mm/ha.h)

K = erosionabilidad de los suelos (tn.ha.h/ha.MJ.mm).

L = factor que mide el efecto de la longitud de la pendiente (adimensional)

S = factor que mide el efecto de la inclinación de la pendiente (adimensional)

C = factor que mide el efecto de la cobertura o clase de cultivo y su manejo (adimensional)

P = factor de prácticas de control de la erosión (adimensional)

3.3.2.1 Factor “R” erosividad de las lluvias:

Para obtener este factor se utilizó información de precipitaciones medias mensuales y anuales de 17 estaciones meteorológicas (figura 3.2), de registros correspondientes al periodo de 1960-2007, para lo cual se siguió los siguientes pasos:

- Se realizó la modelación espacial de la precipitación mensual y anual con una interpolación a partir de datos puntuales de las estaciones pluviométricas, el método de interpolación usado fue el IDW (Peso Inverso de la Distancia), a través del ArcGIS v.9.3.
- Seguidamente con la herramienta “Model Maker” del software Erdas Imagine v.9.2, se realizó el siguiente algoritmo (figura 3.4), con el cual se obtuvo la capa temática erosividad de las precipitaciones

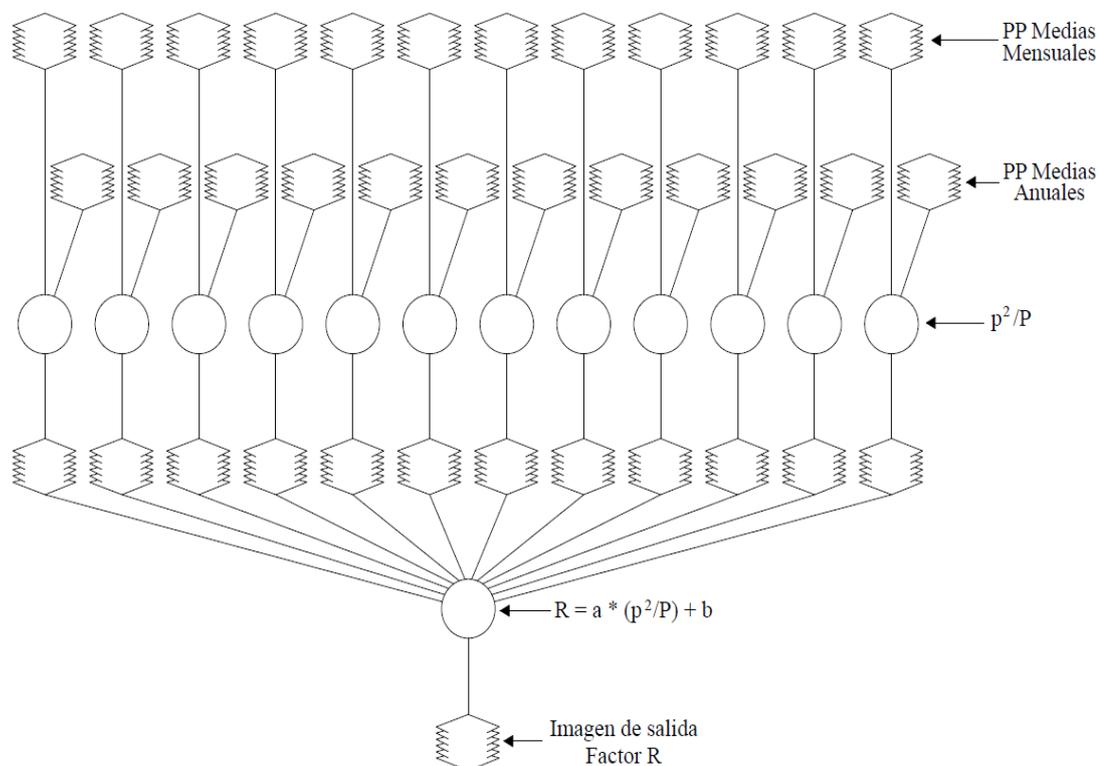
$$R = a * \left(\sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P} \right) + b$$

Donde:

R = es el factor de erosividad de las lluvias

a y b = constantes que consideran las condiciones climáticas locales. Para las regiones con precipitaciones mayores a 200 mm anuales se adoptó las constantes climáticas de USA a = 4,17 y b = -152.

$(\Sigma p^2 / P)$ = es el Índice Modificado de Fournier o Índice FAO. Donde p^2 es la precipitación media mensual y P es la precipitación media anual. Considera no solamente el mes de mayor precipitación sino también el resto de los meses.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5: Modelo espacial para obtener el mapa de factor de erosividad

3.3.2.2 Factor “LS”, topografía

Para la obtención del factor LS, se partió del Modelo Digital de Elevación DEM (SRTM).

- Como primer paso se ajustó el sistema de coordenadas geográficas a UTM, mediante la herramienta “project raster” del programa ArcGIS v.9.3, seguidamente se recortó el área de interés mediante la herramienta “extract by mask” con el fin de acelerar el procesamiento.
- Con la herramienta “slope”, a partir del DEM recortado se obtuvo un raster con las pendientes expresadas en porcentajes.

- Luego a través de mascarar se separaron zonas con rangos de pendientes: menor a 1%, 1-3%, 3-5%, 5-20% y mayor a 20%. Como resultado se obtuvo una capa temática raster por clases de pendientes.
- Se aplicó el siguiente algoritmo a través del modelo obtenido por Erdas Imagine v.9.2, mediante la herramienta “Model Maker” (Figura 3.5), teniendo en cuenta las pendientes y los valores de m correspondientes (cuadro 3.6).

$$LS = (\lambda / 22.13)^m * (s / 0.09)^{1/3}$$

Donde

LS = representa el factor topográfico,

λ = longitud de la pendiente,

S = es el gradiente

m = está influenciado por la pendiente (cuadro 3.6).

Cuadro 3.6: Valores de Pendiente (%) y m

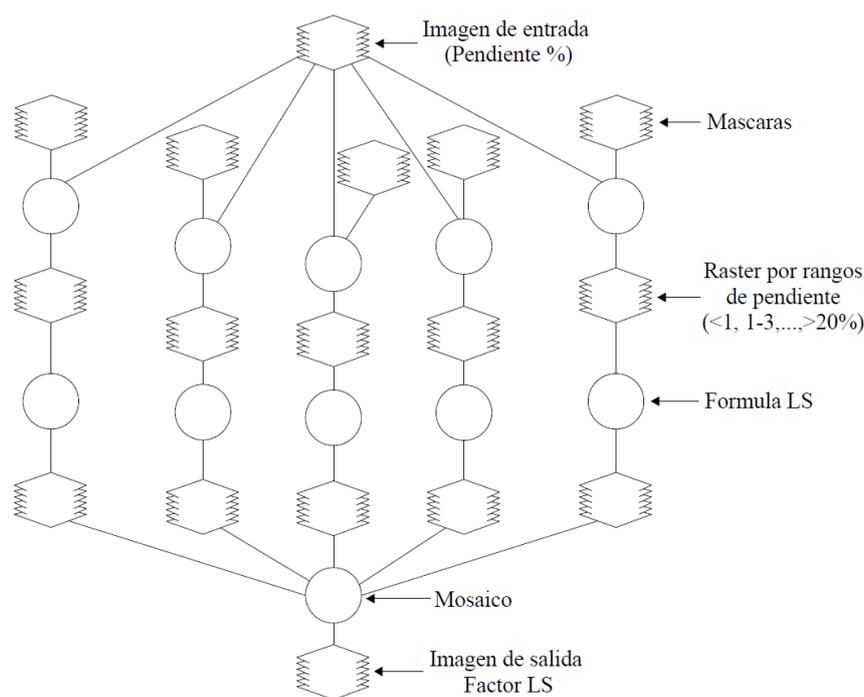
Pendiente %	m
< 1%	0.2
1 - 3%	0.3
3 - 5%	0.4
5 - 20%	0.5
> 20%	0.6

Fuente: Aguilo *et al.*, 1984

- Como resultado final se realizó un mosaico del factor LS para toda la cuenca.

El factor S se determinó mediante el raster con las pendientes expresadas en porcentajes y L se mantuvo constante en todos los casos (122 metros); Este valor es propuesto por Foster *et al.*, 1996 citado por Kyoung *et al.*, 2005, quienes experimentalmente determinaron que es la mínima longitud en la cual empieza haber escurrimiento y depositación.

La siguiente figura resume el modelo generado mediante la herramienta Model Maker de Erdas Imagine v.9.2:



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6: Modelo espacial para obtener el mapa del factor topográfico LS

3.3.2.3 Factor “C”, cobertura vegetal

El factor C de cobertura vegetal indica la protección que la cobertura vegetal presta al suelo al interceptar las gotas de lluvia y amortiguar su energía de impacto disminuyendo el efecto erosivo. Para la determinación del mapa de cobertura vegetal de la cuenca del río Ilave se obtuvo a partir del análisis de imágenes satelitales Landsat TM 5 de la zona, con resolución espacial de 30 mt, tomada el 27 de agosto del año 2011. La metodología seguida fue la siguiente:

- Se realizó la composición de las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de las dos escenas Landsat 2-71 y 2-72, utilizando el Software ERDAS Imagine v.9.2, mediante la extensión; interpreter /utilies / layer stack.
- A través del método de Factor del Índice Óptimo (OIF), se realizó la selección de bandas. El OIF indica la mejor combinación de tres bandas en una combinación RGB y se basa en la valoración de la suma de desviaciones estándar de tres bandas individuales y de la suma de coeficientes de correlación de estas tres bandas, el análisis se realizó para seis combinaciones referidas a clasificación de coberturas (RGB: 453, 157, 257, 145, 247 y 245). Se calculó mediante la siguiente expresión:

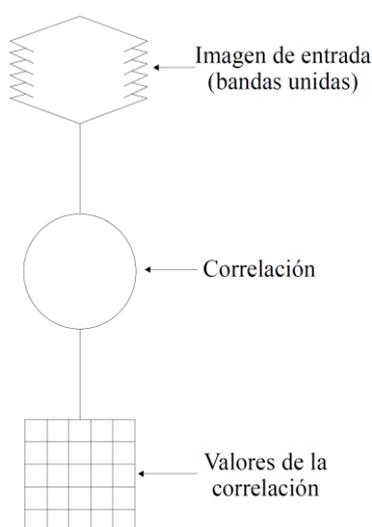
$$OIF = \frac{\sum_{k=1,3} s_k}{\sum_{j=1,3} |r_j|}$$

Donde:

s_k = desviación típica de cada una de las tres bandas

r_j = coeficiente de correlación entre cada par de esas mismas bandas.

El coeficiente de correlación se obtuvo mediante la aplicación del programa Erdas Imágenes v.9.2, mediante la herramienta “Model Maker”, se genero el modelo que se presenta en la siguiente figura:



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7: Modelo espacial para obtener los coeficientes de correlación

- Seguidamente se procede a realizar el mosaico de las imágenes combinadas, en vista de que el área de la cuenca del río Ilave supera el área cubierta por una sola imagen, este procedimiento se realizó con el Software ERDAS Imagine v.9.2, mediante la extensión; data prep /mosaico imagen.

- Paso siguiente se realizó la corrección geométrica o georreferenciación de la imagen (mosaico de imágenes), con el fin de situar correctamente cada uno de los puntos de las imágenes en sus coordenadas geográficas y puedan ser superpuestas al momento de realizar la integración del modelo final de erosión, la cual se realizó mediante el software ArcGIS v.9.3, mediante la extensión Georeferencing, por medio de una distribución de

puntos claves o puntos de control de manera homogénea en la cartografía de referencia y en la imagen a georeferenciar, para este caso a partir de la cartografía base del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:100,000 proyección UTM zona 19S, datum WGS-84, se georreferenciaron las imágenes que vienen originalmente con coordenadas y proyección diferente a las de la zona de estudio, se utilizó el tema de hidrografía fluvial que son fácilmente identificables en la cartografía de referencia y en las imágenes, se ubicaron 30 puntos de control en cada imagen, distribuidos adecuadamente (intersecciones de los ríos). Una vez identificados dichos puntos en la imagen y en la cartografía de referencia, se comprobó la bondad del ajuste de los puntos de control elegidos, exigiendo que el error cuadrático medio se situara en valores inferiores al tamaño del píxel, esto es, 30 metros, de esta manera, se ha obtenido georeferenciar la imagen en el sistema de proyección UTM zona 19S y datum correspondiente a WGS-84.

- Fue necesario realizar mejoras y realces en la imagen satelital para el aspecto visual y su calidad, para de esta manera obtener clasificaciones más precisas, es así que se realizó ajuste de brillo y contraste.

- Antes de realizar la clasificación, para tener una mejor idea para aplicar las áreas de entrenamiento para la clasificación, se obtuvo el NDVI de la imagen, que es el índice de vegetación de diferencia normalizada el cual facilita enormemente la discriminación entre suelos descubiertos y suelos con vegetación, como también brinda información sobre el vigor vegetal de una zona determinada.

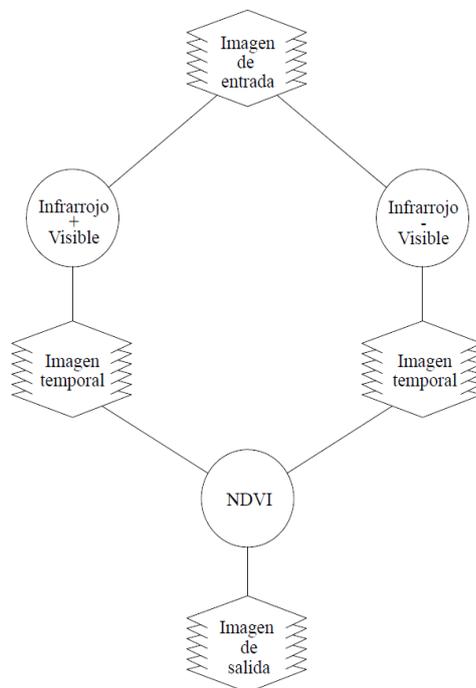
Se creó un algoritmo en el módulo Model Maker de Erdas Imagine v.9.2., para generar el NDVI y que se presenta en la figura 3.7.

$$NDVI = \frac{Banda4 - Banda3}{Banda4 + Banda3}$$

Donde: Banda4 = infrarrojo cercano
 Banda3 = rojo visible

Esta fórmula permite obtener una imagen de tipo raster con valores que van desde -1 a +1. El color negro con valores cercanos al cero, representa al suelo con actividad

fotosintética nula o lo que significa que carece de vegetación alguna, el color gris que va de 0 a 0.5 representa a suelos con actividad fotosintética media; los de color blanco tienen valores cercanos al 1 y representan al suelo con alta actividad fotosintética como en los cultivos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.8: Algoritmo del índice de vegetación de diferencia normalizada – NDVI

- Al obtener los valores de NDVI que permite diferenciar de mejor manera los distintos cambios de cobertura vegetal en la imagen, se procedió a realizar una preclasificación de la imagen consistente en efectuar una clasificación no supervisada y una interpretación visual a fin de identificar zonas espectralmente homogéneas en las imágenes, con el objeto de facilitar la localización de las parcelas de entrenamiento. La clasificación no supervisada se realizó mediante el software ERDAS Imagine v.9.2, mediante el uso del algoritmo ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), este algoritmo utiliza el método de la distancia espectral mínima para formar las clases, se hicieron varios ensayos para decidir el número óptimo de las clases (clusters), en la imagen de la combinación RGB que resultó tener el más alto Factor del Índice Óptimo (OIF).

- Con el resultado de la preclasificación se obtuvo información previa para utilizar en el reconocimiento de la zona en campo, es así que el paso siguiente fue realizar visitas a

campo para identificar los diferentes tipos de cubierta vegetal, se han tomado fotografías de las áreas más representativas para el mejor reconocimiento y dicha información se relevo conjuntamente con su posición geográfica utilizando el sistema de posicionamiento global satelital (GPS), lo que permite determinar su ubicación aproximada (± 100 m) en la imagen.

- Con el conocimiento previo de la zona de estudio se procedió a mejorar la preclasificación de la cubierta vegetal mediante la aplicación de una clasificación supervisada utilizando el clasificador de máxima probabilidad (ERDAS Imagine v.9.2), donde fue posible delimitar sobre la imagen áreas de entrenamiento, que son píxeles que corresponden a patrones representativos de clases previamente ubicadas, reconocidas o corregidas en campo y que el computador procederá a calcular sus estadísticas en cada una de las bandas que tenga la imagen, completando y logrando una clasificación mejorada.

- Finalmente a esta clasificación se le aplicó un filtro de 3x3 Low Pass con el fin de reducir el efecto de “sal y pimienta” de la clasificación, es decir, para eliminar píxeles aislados que se encuentran rodeados por píxeles de otra clase, se optó por este filtro ya que conservaba al máximo la forma de las distintas coberturas.

- Obtenido el raster con diferentes clases de porcentaje de cobertura, se asignaron valores de C de acuerdo al tipo y porcentaje de cobertura según el cuadro 2.2.

3.3.2.4 Factor “K”, erosionabilidad del suelo

El factor K de erosionabilidad del suelo representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado. Se obtiene a partir de una ecuación de regresión que relaciona K con parámetros que determinan algunas propiedades físicas del suelo como son: textura, materia orgánica, estructura y permeabilidad. La información de suelos inicialmente se ha recopilado en formato analógico (mapa en papel), lo cual fue necesario transformarlo a formato digital, de forma que pueda ser almacenada y visualizada en un ordenador, para lo cual se realizaron los siguientes pasos:

- Escaneo del mapa se suelos
- Georeferenciación del mapa
- Digitalización vectorial de las diferentes series de suelo utilizando ArcGIS v.9.3

- Asignación de los valores del factor K, empleando el nomograma de Weischmeier *et al.* (1971).
- Finalmente con la herramienta “Polygon to Raster” del mismo programa se transformó el vector en imagen raster, con una resolución espacial de 30 m.

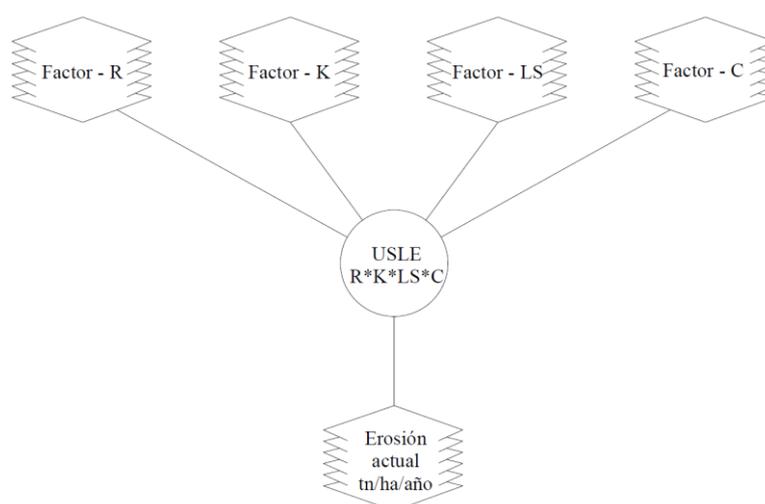
3.3.2.5 Factor “P”, prácticas de conservación de suelos

Debido a que en la zona de estudio no se realiza practicas de conservación de suelos en extensiones considerables el factor P, para la presente investigación se ha considerado un valor de $P=1$; lo que no representa ninguna influencia en el uso de la tierra.

3.3.3 Integración de los factores

El cálculo de la erosión hídrica actual se basó en la aplicación del modelo USLE, para poder llevar a cabo esta operación fue necesario contar con la información distribuida espacialmente de cada una de las variables que intervienen en el cálculo, en este caso los índices o factores de erosividad de las precipitaciones (R), erodabilidad del suelo (k), longitud y grado de la pendiente (LS) y cobertura del suelo (C), ya cuantificados y en formato raster, se combinan multiplicándose píxel a píxel.

La Figura 3.8, resume el modelo aplicado para la obtención del mapa de erosión hídrica actual de la cuenca del río Ilave.



Fuente: elaboración propia

Figura 3.9: Modelo espacial para evaluar la erosión hídrica

Para clasificar los mapas de erosión actual por clases o grados de erosión se realizó utilizando el cuadro 2.1.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procesamiento de las variables

4.1.1 Factor “R” erosividad de las lluvias:

En el anexo 3, se presentan los mapas de precipitación media mensual para la cuenca del río Ilave, en los cuales se pueden observar la distribución espacial de la precipitación. El período de lluvias de mayor magnitud comienza a partir del mes de diciembre y se prolonga hasta marzo, siendo en el mes de enero que se registra la más alta precipitación seguida por el mes de febrero. Las precipitaciones de enero oscilan entre 126.8 mm a 181.43 mm, y en febrero de 93.7 mm a 160.8 mm, en los meses de diciembre y marzo se nota una reducción de lluvia (ver anexo 2).

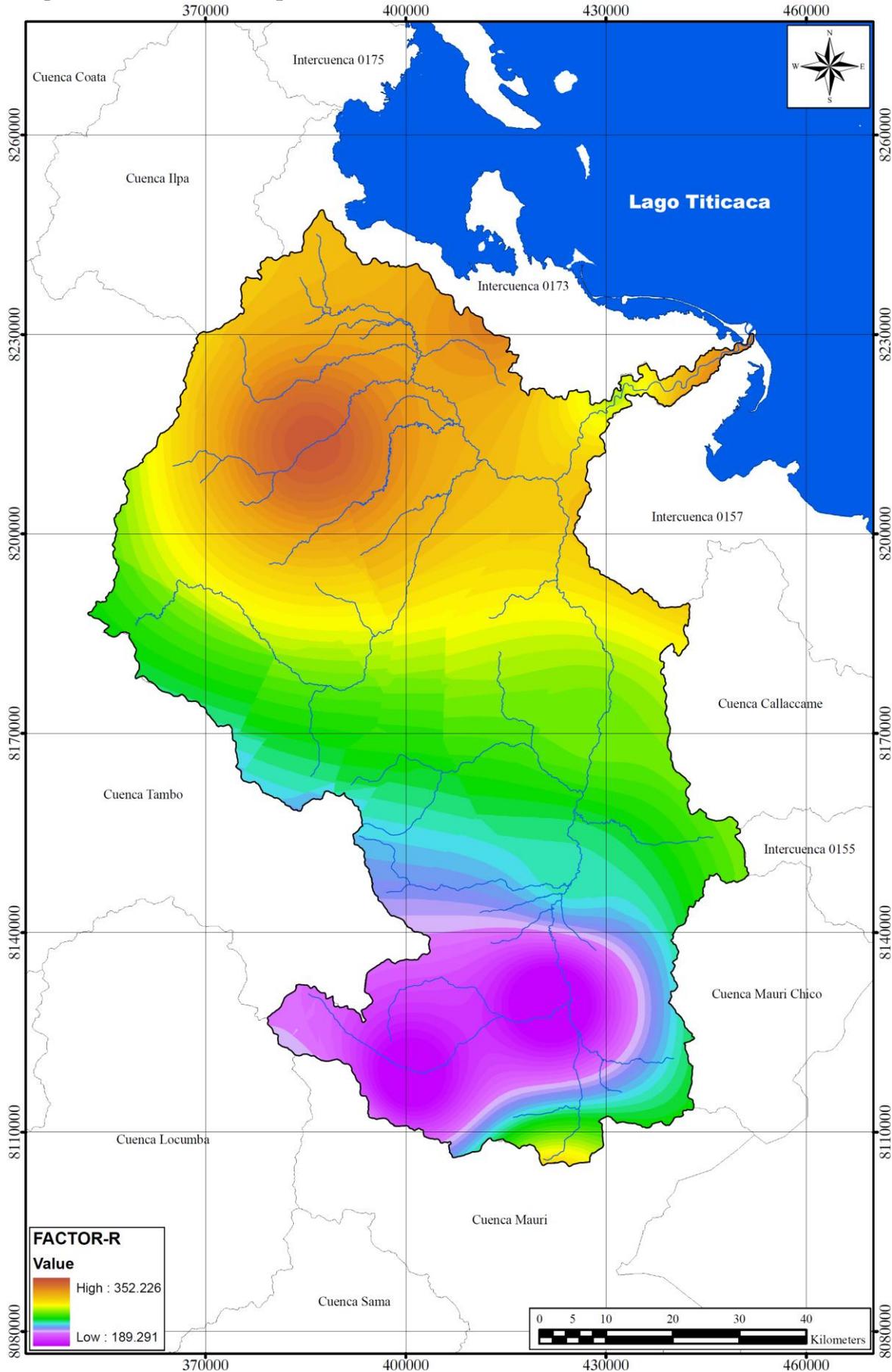
El período seco (invierno), comprende los meses de mayo a agosto, siendo el mes de julio el más bajo seguido del mes de junio. Las precipitaciones en este periodo están entre 0.5 mm a 15.70 mm (ver anexo 2).

Se observa que en los meses de abril y setiembre a noviembre, meses de transición entre el período lluvioso y el seco, se tienen valores de precipitación para el mes de abril de 16.18 mm a 53.62 mm, y de setiembre a noviembre oscilan entre 3.2 mm a 58.90 mm (ver anexo 2).

Los valores más altos de precipitación se registran en el entorno del lago Titicaca, en la parte baja y norte de la cuenca. Esta particularidad es a consecuencia de la alta radiación, vientos generalmente más fuertes lo que origina una intensa evaporación del lago, favoreciendo la formación de masas nubosas que precipitan en el mismo lago o en zonas cercanas.

En la figura 4.1, se presenta la distribución espacial de la erosividad de las lluvias en la cuenca del río Ilave, obtenido a través del método de Arnoldus, donde se observa que los valores de la erosividad en la cuenca varían de 189.29 a 352.23 MJ.mm/ha.h. La capacidad erosiva de las lluvias es mayor en la parte baja y norte de la cuenca; y los menores valores de erosividad se registran en la parte sur de la cuenca. Según el plano de distribución espacial de la erosividad de las lluvias en la cuenca del río Ilave, muestra que la erosividad disminuye de norte a sur.

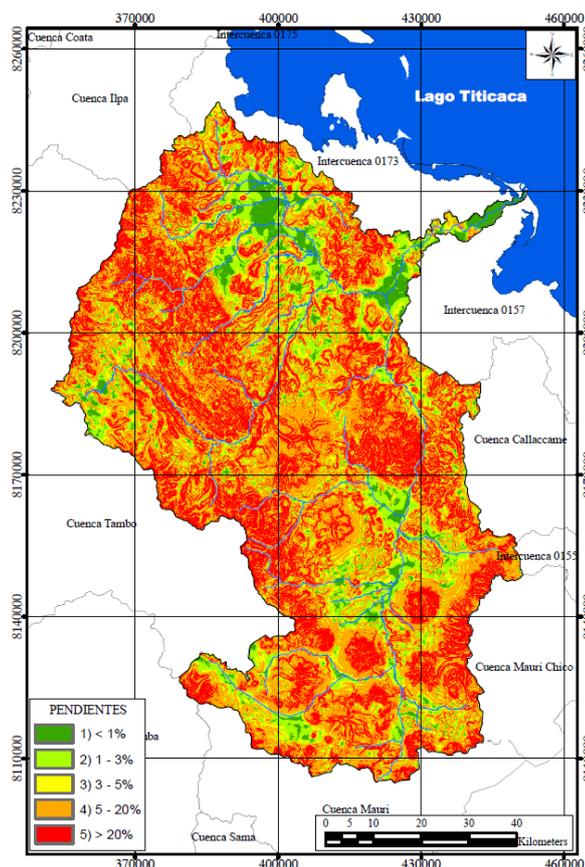
Figura 4.1: Distribución espacial de la erosividad de las lluvias (Factor – R)



4.1.2 Factor “LS”, topografía

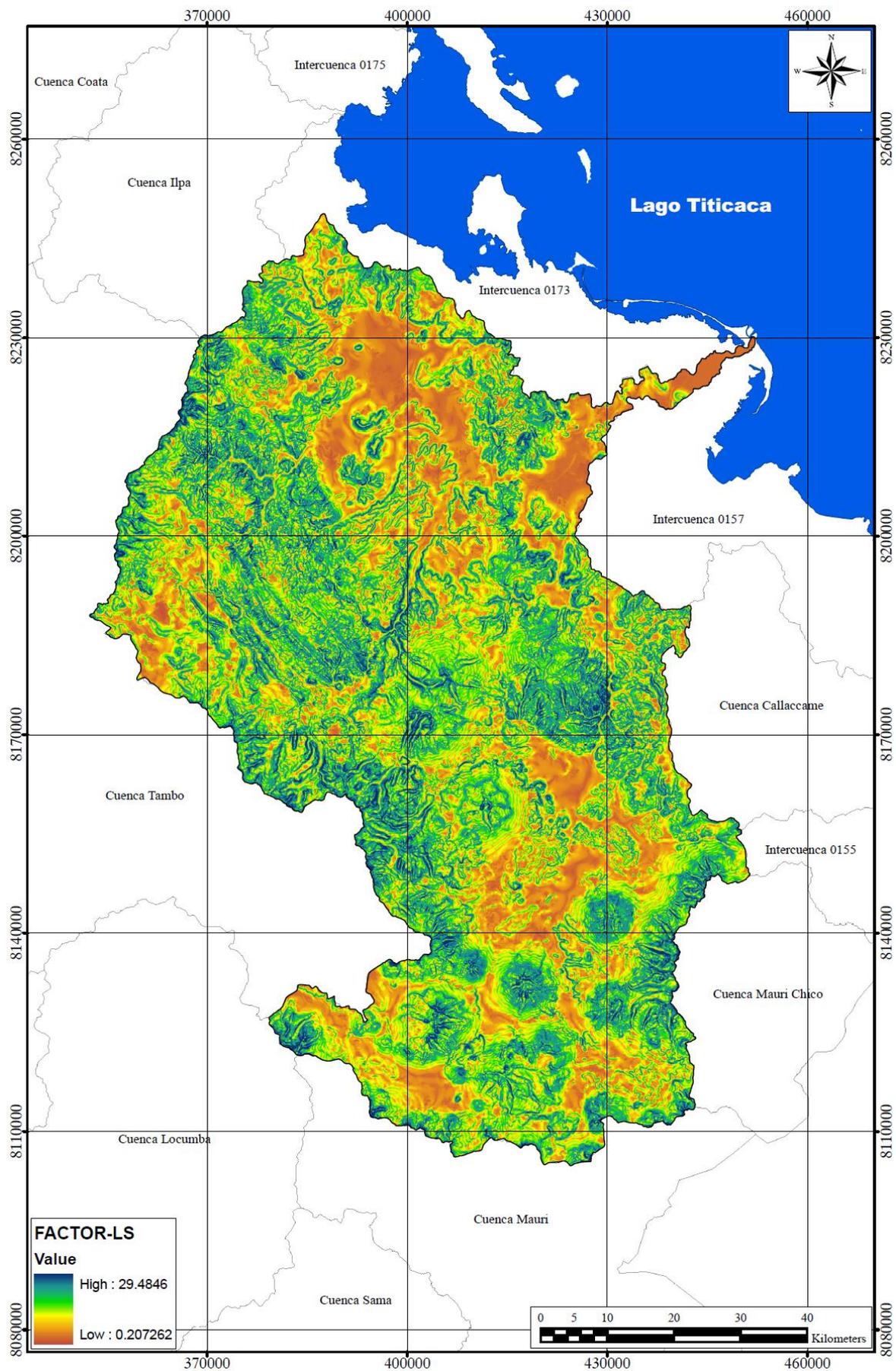
La pendiente es una de las variables que influye en la mayor o menor erosión hídrica de los suelos, en la figura 4.2, se muestra la distribución de pendientes en la cuenca del río Ilave clasificado de acuerdo al cuadro 3.6; siendo la que mas predomina el rango de pendientes entre 5 a 20% que abarca un área de 3066.92 km², seguido de las pendientes mayores a 20%, con un área de 2491.41 km², rango entre 1 a 3% con un área de 1065.98 km², rango entre 3 a 5% con un área de 740.18 km² y por ultimo esta las pendientes menores a 1% que abarca un área de 472.71 km². Según estos resultados alrededor del 32% del área de estudio la pendiente es más del 20%, que van desde inclinada a muy inclinada, por lo que se puede indicar que la pendiente tiene una alta influencia en la erosión del suelo, el resto del área de estudio se encuentra en terrenos con menos de 20% de pendiente.

Figura 4.2: Mapa de pendientes



En la figura 4.3, se presenta la distribución espacial del factor LS, que varía de 0.2072 a 29.4846, registrándose los valores más bajos en zonas de menor pendiente y los más altos en zonas más empinadas.

Figura 4.3: Distribución espacial del factor topográfico - LS



4.1.3 Factor “C”, cobertura vegetal

4.1.3.1 Composición de bandas

En la figura 4.4, se muestra el resultado de la composición de las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7, de las dos escenas Landsat TM 5 (2-71 y 2-72).

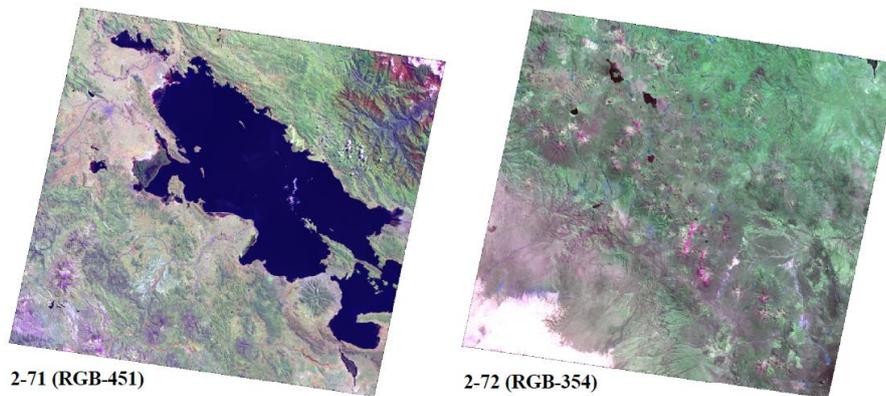


Figura 4.4: Representación de las bandas espectrales (banda 1, 2, 3, 4, 5 y 7) y composición en falso color (4/5/1 y 3/5/4)

4.1.3.2 Selección de bandas

La matriz de correlación entre las bandas y sus desviaciones estándar se presenta en los cuadros 4.1 y 4.2, de las dos escenas Landsat.

Cuadro 4.1: Matriz de correlación y desviaciones estándar de la imagen landsat: 2-71

Bandas	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	Std. Dev.
TM1	1						33.28
TM2	0.98	1					20.05
TM3	0.95	0.99	1				28.15
TM4	0.92	0.96	0.98	1			32.56
TM5	0.89	0.93	0.95	0.97	1		60.58
TM7	0.9	0.94	0.96	0.96	0.99	1	33.38

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.2: Matriz de correlación y desviaciones estándar de la imagen landsat: 2-72

Bandas	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	Std. Dev.
TM1	1						54.88
TM2	0.99	1					32.19
TM3	0.99	1.00	1				40.44
TM4	0.97	0.97	0.98	1			36.81
TM5	0.89	0.89	0.92	0.96	1		54.95
TM7	0.9	0.89	0.92	0.95	0.99	1	33.24

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos de correlación y las desviaciones se calcula el OIF. En los cuadros 4.3 y 4.4, se muestran los resultados para las 6 combinaciones de bandas analizadas todas referentes a clasificaciones de coberturas.

Cuadro 4.3: Resultados del factor de índice óptimo de la escena 2-71

Posición	Composición	OIF
1	157	45.79
2	145	45.37
3	453	41.81
4	257	39.89
5	245	39.52
6	247	30.12

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.4: Resultados del factor de índice óptimo de la escena 2-72

Posición	Composición	OIF
1	145	51.97
2	157	51.45
3	453	46.15
4	245	43.87
5	257	43.45
6	247	36.37

Fuente: Elaboración propia

El factor del índice óptimo (OIF) es un valor estadístico que se utiliza para seleccionar la combinación óptima de las tres bandas en una imagen de satélite con el que se desea crear una composición de color. La combinación óptima de las bandas de todas las posibles combinaciones de tres bandas es el que tiene la mayor cantidad de información (suma más alta de las desviaciones estándar), con la menor cantidad de duplicación (la más baja correlación entre los pares de bandas), en ese entender de acuerdo a los dos últimos cuadros se puede observar que la combinación 145 y 157 son los que tienen el más alto factor del índice óptimo, por lo cual se utilizara las bandas 145 para realizar las clasificaciones no supervisadas y supervisadas.

4.1.3.3 Mosaico de imágenes

En la figura 4.5, se muestra el resultado del mosaico de las dos escenas Landsat que abarca la cuenca del río Ilave.



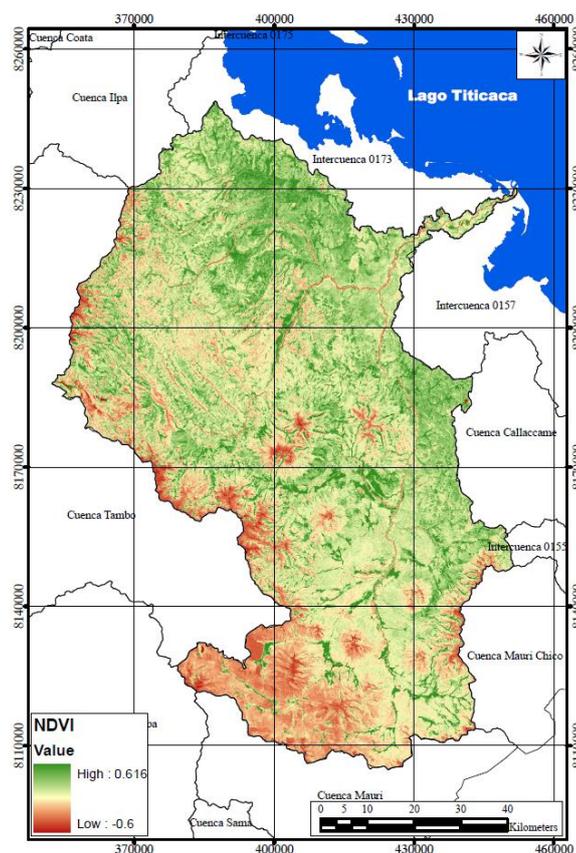
Figura 4.5: Mosaico de las escenas Landsat 2-71 y 2-72

4.1.3.4 Corrección geométrica

La corrección geométrica de la imagen (mosaico) se realizó con el ArcGIS v.9.3, a partir de cartografía del Instituto Geográfico Nacional (red hídrica), se marcaron 30 puntos de control de manera homogénea en la cartografía base y en la imagen, en este proceso se generó un error medio cuadrático inferior a un píxel cumpliendo con la condición, finalmente las imágenes quedaron georeferenciadas en el sistema de proyección UTM, zona 19S y datum geodésico WGS-84.

4.1.3.5 Índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI)

Con el propósito de mejorar la discriminación entre las coberturas de uso del suelo y resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto más pequeño, se aplicó el índice de vegetación de la diferencia normalizada. Los valores de NDVI de la cuenca del río Ilave fluctúan entre -0.6 a 0.62, lo cual indica que la densidad vegetal es heterogénea, con sectores que tienen una gran cobertura y otros que poseen una escasa cobertura o suelo desnudo. Los valores cercanos a 0.62 se encuentran en las partes bajas de la cuenca, en torno al lecho de los ríos, con respecto a sectores ubicados en laderas y cumbres de media y alta montaña poseen índices bajo 0, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 4.6: Índice de vegetación de diferencia normalizada

4.1.3.6 Mejoras y realces

En la figura 4.7, se presenta la imagen satelital que se aplico el ajuste de brillo y contraste, el cual hace que las características importantes de los datos sean más identificables, facilitando la interpretación visual de la imagen.

**Figura 4.7: Comparación del efecto de la modificación del contraste y brillo**

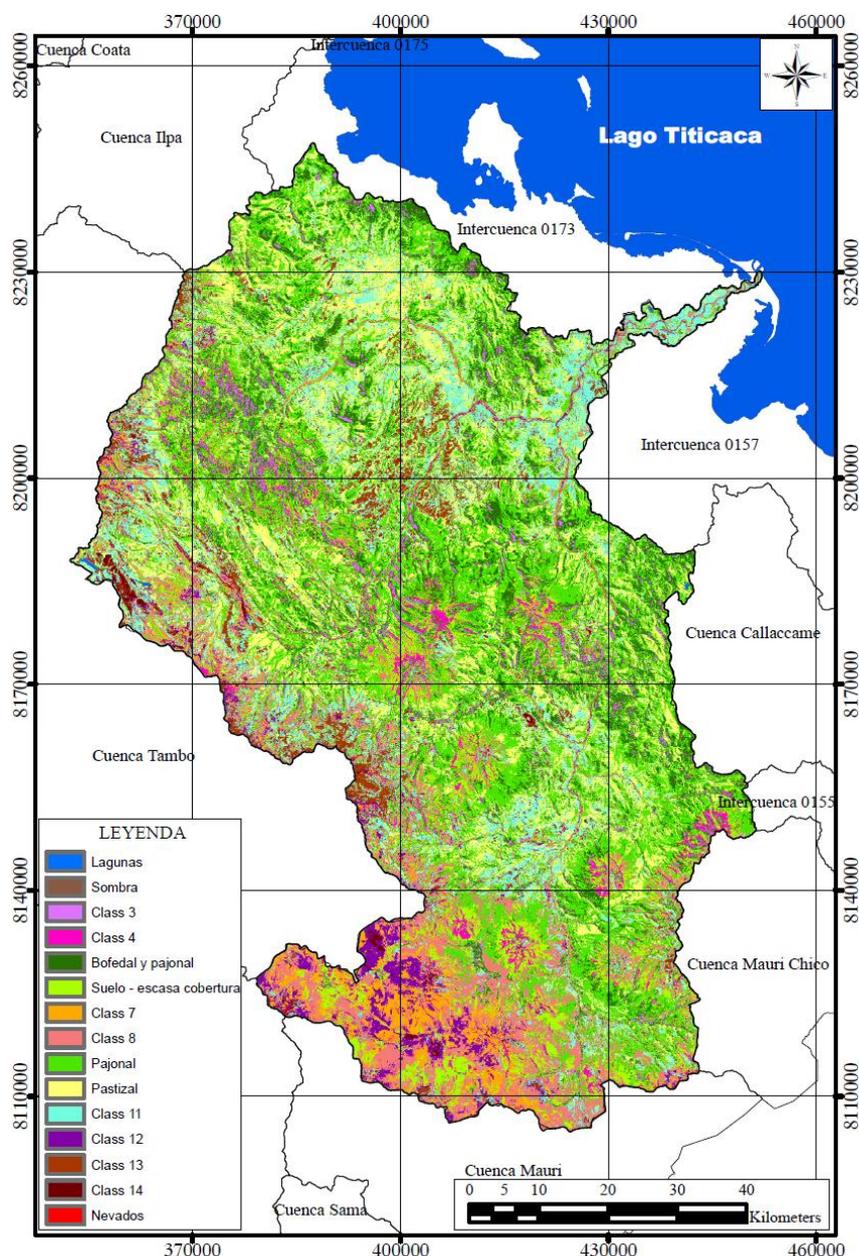
4.1.3.7 Clasificación no supervisada

El proceso de la clasificación no supervisada fue realizado aplicando el algoritmo Isodata del programa Erdas Imagine v.9.2, utilizando la combinación en falso color RGB 451, cuyas bandas resultaron tener el más alto valor de factor del índice óptimo.

En base a la clasificación Isodata, se ha obtenido 15 clases, con 10 iteraciones y 0.95 umbral de convergencia para la imagen analizada, la figura 4.8, muestra el resultado de la clasificación no supervisada.

La realización de esta clasificación genera algunos errores, especialmente en los bofedales y pajonales, además que no se pudo identificar la totalidad de las clases, sin embargo esta clasificación fue una herramienta importante al igual que la interpretación visual para continuar con la clasificación supervisada en vista de que facilito identificar las áreas de entrenamiento para el trabajo de campo.

Figura 4.8: Resultado de la clasificación no supervisada.



4.1.3.8 Clasificación supervisada

Producto del proceso de la clasificación supervisada con la regla de decisión de máxima probabilidad se obtuvo el mapa de cobertura vegetal que se observa en la figura 4.9. En el cuadro 4.5, se puede apreciar que el mayor porcentaje de la imagen corresponde a la clase de césped de puna (27.79%), siendo también importante la superficie ocupada por la clase pajonal (26.49%) y bofedales (12.35%). Esto supone que más de la mitad de la superficie total de la cuenca posee de una cubierta vegetal protectora frente a los agentes causantes de la erosión. Por otro lado, las zonas que carecen de una cubierta vegetal (preferentemente situadas en las zonas de alta montaña y en algunas laderas) tan sólo ocupan el 12% de la superficie total de la cuenca.

Cuadro 4.5: Superficie ocupada por los tipos de cubierta vegetal.

Nº	Clase	Área (km ²)	%
1	Bofedales	968.20	12.35
2	Césped de puna	2177.93	27.79
3	Herbazal de tundra	1643.36	20.97
4	Lagunas	16.70	0.21
5	Nevados	14.10	0.18
6	Pajonal	2076.43	26.49
7	Tierras altoandinas con vegetación escasa	544.74	6.95
8	Tierras altoandinas sin vegetación	395.74	5.05
TOTAL		7837.20	100

Fuente: Elaboración propia

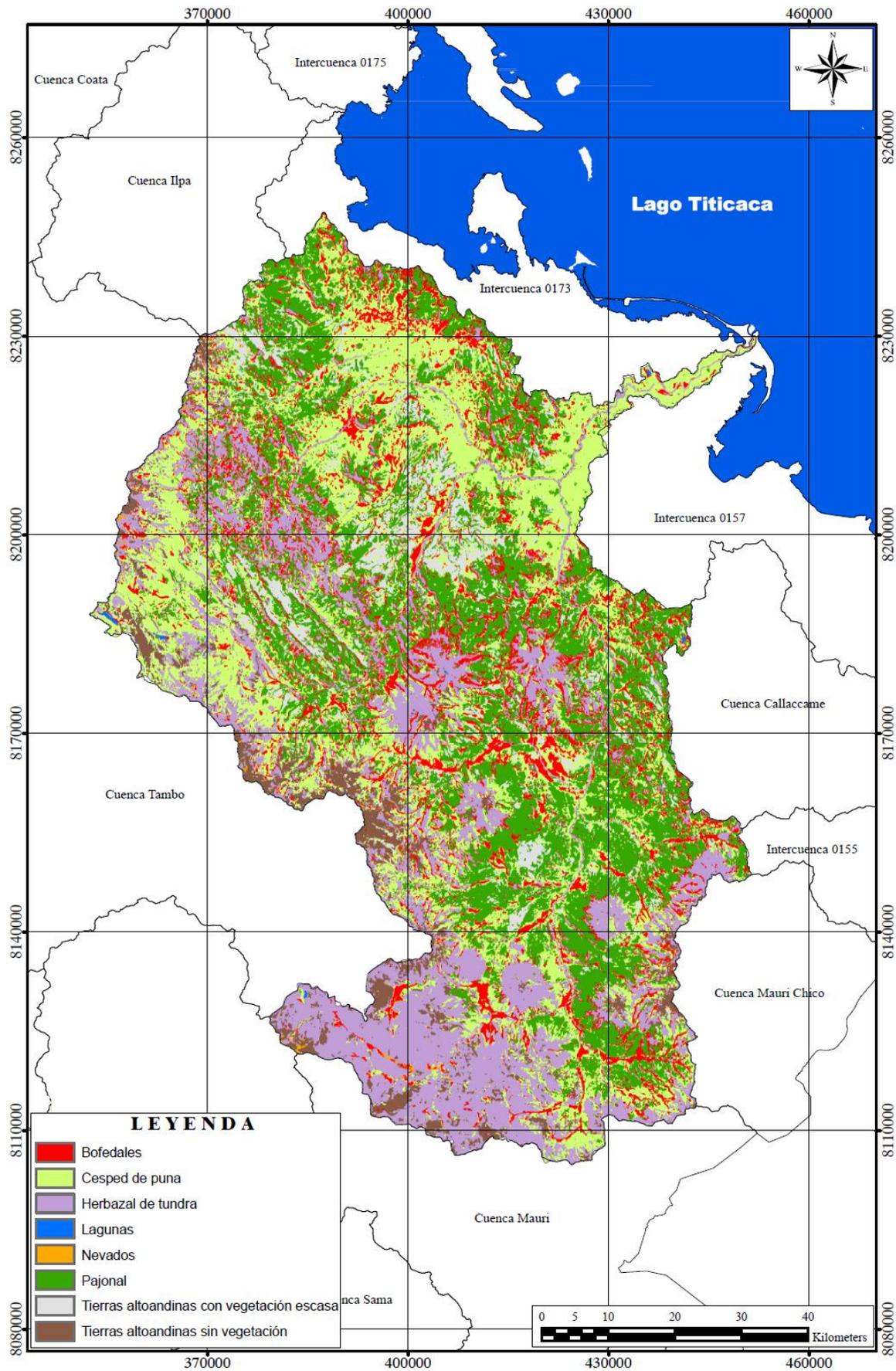
Los valores de C hallados en base al cuadro 2.2, van desde 0.003 a 0.42, correspondiendo los valores cercanos a 0.003 a zonas que presentan una densa cobertura y las áreas que presentaron índice bajo de protección (valores de C cercanos 0.42), se encuentran en las partes altas de la cuenca, esto se debe a la escasa vegetación y a que presentan mayores porcentajes de suelo desnudo, a los lugares con presencia de nevados y cuerpos de agua se les dio un valor de cero, lo que significa que no sufren ningún proceso de erosión. El cuadro 4.6, muestra los valores de C de todas las unidades estudiadas.

Cuadro 4.6: Valores del factor C

Clase	Valores C	Clase	Valores C
Bofedales	0.003	Nevados	0.0
Césped de puna	0.011	Pajonal	0.003
Herbazal de tundra	0.146	Tierras alto andinas con vegetación escasa	0.173
Lagunas	0.0	Tierras alto andinas sin vegetación	0.420

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9: Mapa de cobertura vegetal, Factor - C (Clasificación supervisada)



4.1.4 Factor “K”, erosionabilidad del suelo

Los suelos dentro de la cuenca del río Ilave elaborado en el estudio de investigación; propuesta de zonificación agroecológica y de sistemas agropecuarios en la cuenca de los ríos Ilave - Huenque, en base a información de estudios realizados por la ONERN (1984) e INRENA (1996), se muestra en el cuadro 4.7 y figura 4.10.

Cuadro 4.7: Características de las unidades de suelo en la cuenca del río Ilave

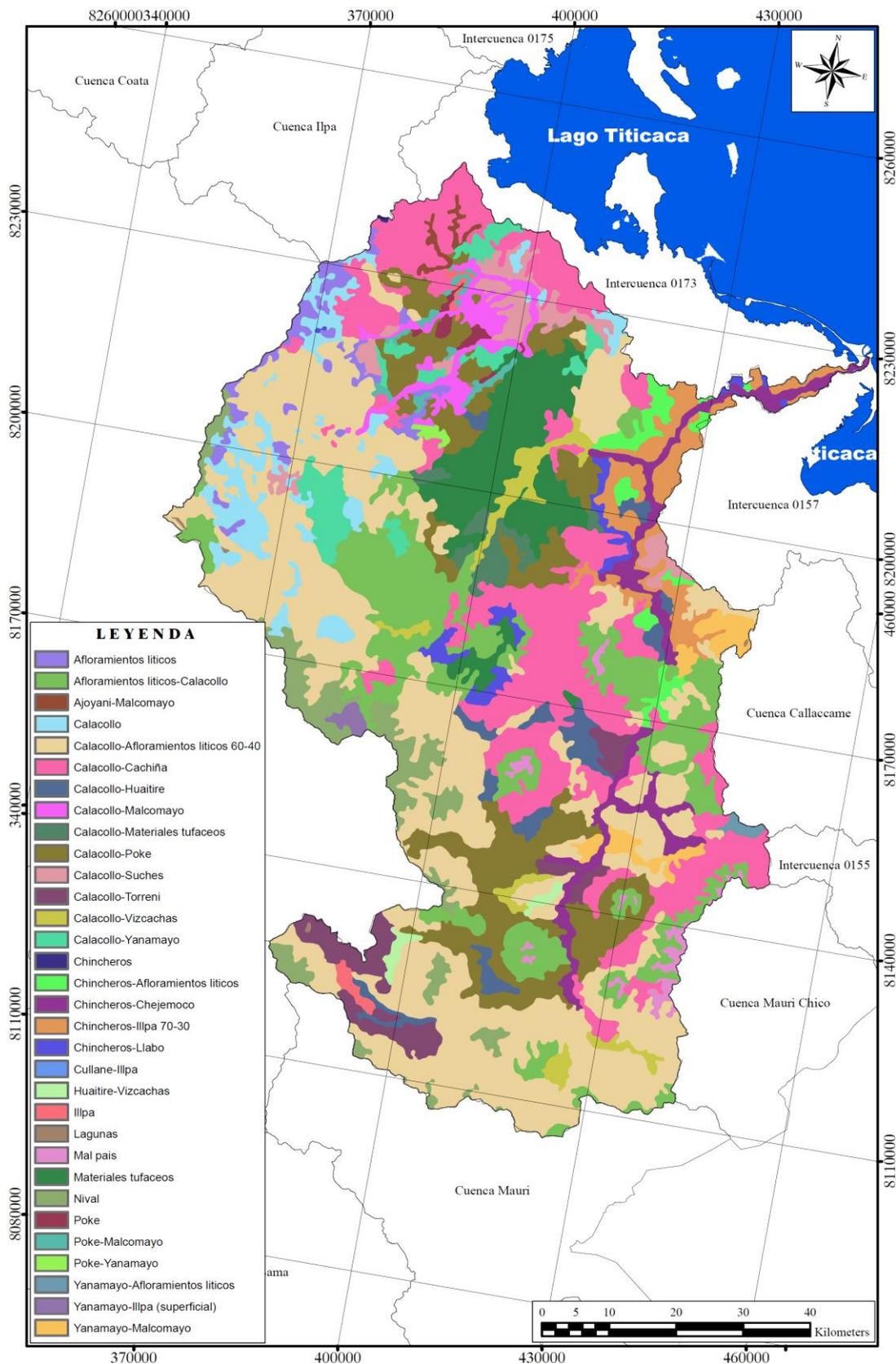
Nº	Unidad de suelos	Textura	Área (km2)	%
1	Afloramientos líticos	Moderadamente gruesa	235.88	3.010
2	Afloramientos líticos-calacollo	Moderadamente gruesa	847.29	10.811
3	Ajoyani-malcomayo	Media	21.61	0.276
4	Calacollo	Moderadamente gruesa	267.26	3.410
5	Calacollo-afloramientos líticos 60-40	Moderadamente gruesa	2186.22	27.895
6	Calacollo-cachiña	Media	1131.85	14.442
7	Calacollo-huaitire	Moderadamente gruesa	118.99	1.518
8	Calacollo-malcomayo	Media	93.80	1.197
9	calacollo-materiales tufaceos	Moderadamente gruesa	213.11	2.719
10	Calacollo-poke	Moderadamente gruesa	685.68	8.749
11	Calacollo-suches	Gruesa	29.22	0.373
12	Calacollo-torreni	Moderadamente gruesa	175.20	2.235
13	Calacollo-vizcachas	Moderadamente gruesa	116.19	1.483
14	Calacollo-yanamayo	Media	164.70	2.101
15	Chincheros	Moderadamente gruesa	1.18	0.015
16	Chincheros-afloramientos líticos	Moderadamente gruesa	95.43	1.218
17	Chincheros-chejemoco	Media	220.80	2.817
18	Chincheros-illpa 70-30	Media	221.14	2.822
19	Chincheros-llabo	Media	0.97	0.012
20	Cullane-illpa	Moderadamente fina	0.24	0.003
21	Huaitire-vizcachas	Moderadamente gruesa	25.07	0.320
22	Illpa	Moderadamente fina	24.39	0.311
23	Poke	Media	21.69	0.277
24	Poke-malcomayo	Media	35.53	0.453
25	Poke-yanamayo	Moderadamente fina	10.60	0.135
26	Yanacocha-illpa (superficial)	Fina	12.66	0.162
27	Yanamayo-afloramientos líticos	Moderadamente fina	17.07	0.218
28	Yanamayo-malcomayo	Media	123.53	1.576
29	Mal país	-	54.71	0.698
30	Materiales tufaceos	-	410.85	5.242
31	Nival	-	269.84	3.443
32	Lagunas	-	4.53	0.058
TOTAL			7837.20	100

Fuente: ONERN (1984) e INRENA (1996)

En la Figura 4.11, se muestra los valores de K para las asociaciones de suelo presentes en el área de estudio. El rango de valores de K oscila entre 0 a valores máximos cercanos a 0.413. En la cuenca del río Ilave los suelos no presentan un grado Alto de erodabilidad (valores de K mayores a 0.45), el 16.55% de los suelos presenta grado Bajo (valores de K entre 0.05 y 0.20) debido a la presencia de texturas finas o gruesas, los mismos ofrecen resistencia al desprendimiento de las partículas del suelo y escaso escurrimiento respectivamente, el 79.95% de los suelos presentan grado Moderado (valores

de K entre 0.20 y 0.45) lo que nos indica que son suelos francos, por lo tanto la erosión hídrica es moderada debido a que el escurrimiento también es moderado.

Figura 4.10: Serie de suelos de la cuenca del río Ilave



4.2 Erosión hídrica actual de la cuenca del río Ilave

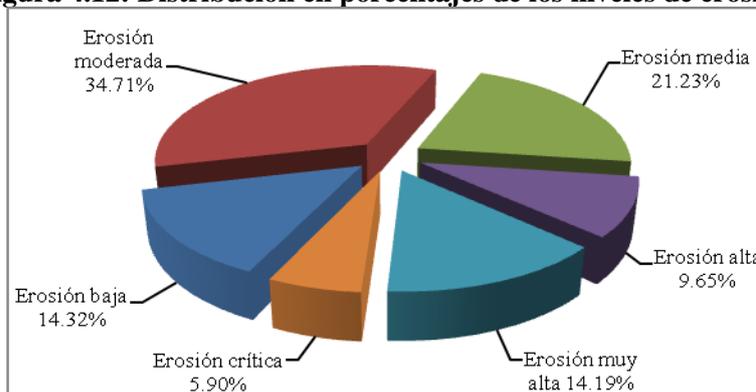
La figura 4.13, representa espacialmente los resultados estimados de la erosión hídrica actual de la cuenca del río Ilave. Sus valores porcentuales y en superficie se presentan en el cuadro 4.8 y figura 4.12.

Cuadro 4.8: Superficie con grados de erosión de la cuenca del río Ilave

Grado de erosión	Perdida (tn/ha/año)	Área (km ²)	%
Erosión baja	< 5	1121.98	14.32
Erosión moderada	5 - 25	2720.48	34.71
Erosión media	25 - 50	1663.38	21.23
Erosión alta	50 - 100	756.94	9.65
Erosión muy alta	100 - 200	1111.94	14.19
Erosión crítica	> 200	462.48	5.90
Total		7837.20	100

Fuente: Elaboración propia

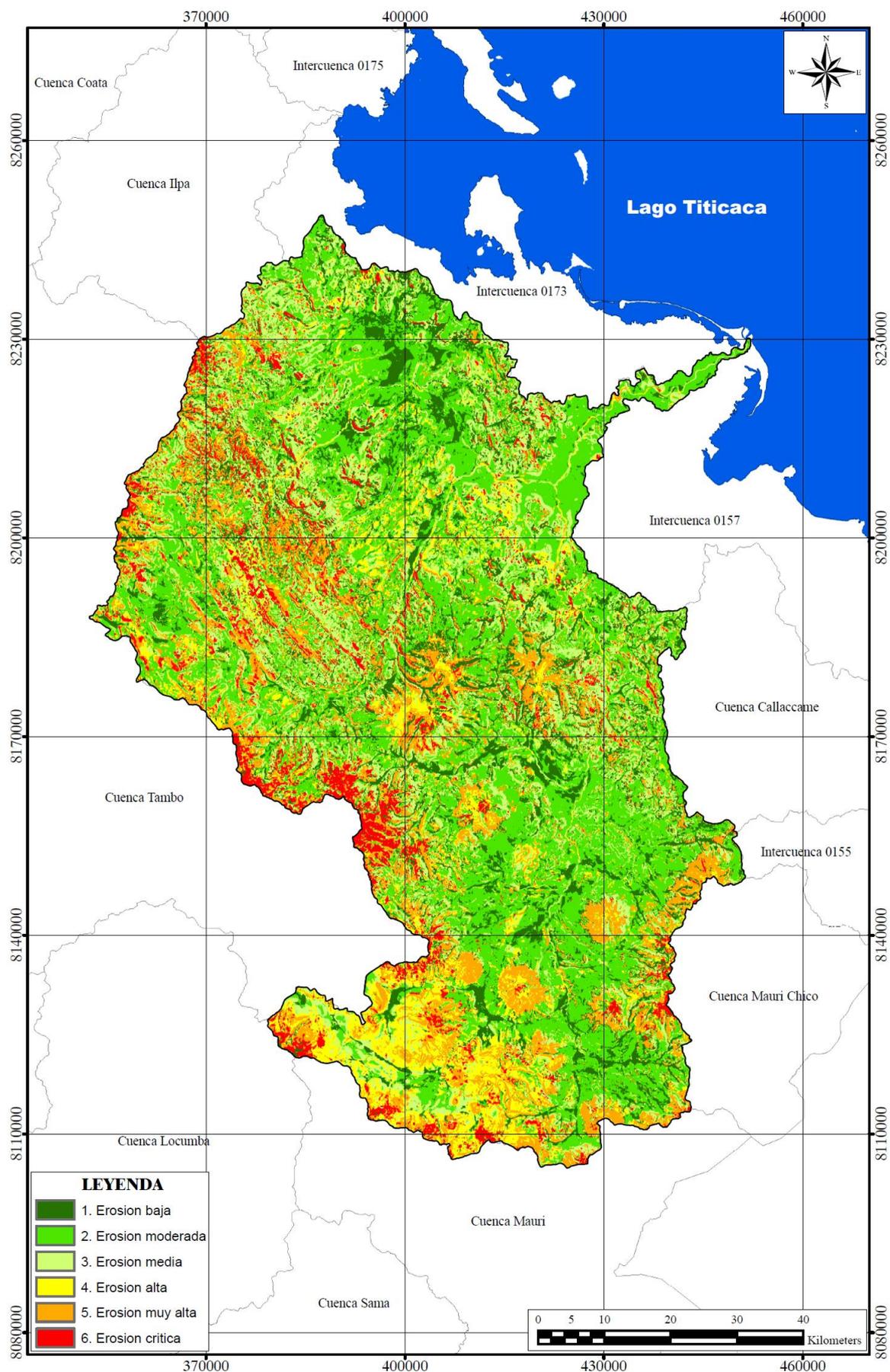
Figura 4.12: Distribución en porcentajes de los niveles de erosión



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos nos muestra que en la cuenca del río Ilave el mayor porcentaje de superficie corresponde a la clase de erosión moderada con un 34.71% que representa aproximadamente 2720.48 km², ubicándose predominantemente en las partes baja y media de la cuenca, mientras que el menor porcentaje de 5.90% corresponde a la clase de erosión crítica con un área de 462.48 km², distribuyéndose particularmente en las partes altas de la cuenca. Los resultados reflejan que hay una mayor pérdida de suelo en áreas con pendientes más inclinadas y con un menor grado de cobertura vegetal; por otro lado, los suelos con nula o mínima pérdida por erosión se encuentran en áreas con pendientes muy leves y/o con una muy buena cobertura vegetal.

Figura 4.13: Mapa de erosión actual de la cuenca del río Ilave



4.3 Erosión hídrica actual por subcuencas

En el cuadro 4.9 y figura 4.14, se presentan los resultados de la pérdida de suelos por subcuencas: Como se puede observar, las subcuencas correspondientes a Uncallane, Loripongo y Conduriri, son las subcuencas que presentan la mayor superficie con grados de erosión crítica (pérdidas de suelo mayores a 200 tn/ha/año), siendo la subcuenca Uncallane la que presenta la mayor superficie con 124.21 km², seguido de la subcuenca Loripongo con 59.42 km² y la subcuenca Conduriri con 52.12 km², por otro lado la subcuenca que posee la menor superficie con este grado de erosión es la subcuenca Medio Ilave con 0.50 km².

Respecto al grado de erosión muy alta, las subcuencas correspondientes a Uncallane, Alto Ilave y Medio Alto Ilave, son las subcuencas que presentan mayores áreas con este grado de erosión (pérdidas de suelo entre 100 a 200 tn/ha/año), siendo la subcuenca Uncallane la que presenta la mayor superficie con 268.21 km², seguido de la subcuenca Alto Ilave con 158.54 km² y la subcuenca Medio Alto Ilave con 131.21 km², por otro lado la subcuenca que posee la menor superficie con este grado de erosión es la subcuenca Bajo Ilave con 7.24 km².

Respecto al grado de erosión alta, las subcuencas Alto Ilave, Uncallane y Medio Alto Ilave, son las subcuencas que presentan mayores áreas con este grado de erosión (pérdidas de suelo entre 50 a 100 tn/ha/año), siendo la subcuenca Alto Ilave con 236.21 km² la que presenta la mayor superficie, seguido de la subcuenca Uncallane con 169.00 km² y la subcuenca Medio Alto Ilave con 65.50 km², mientras tanto la subcuenca que tiene la menor superficie con este grado de erosión es la subcuenca Bajo Ilave con 7.31 km².

Respecto al grado de erosión media, las subcuencas Uncallane, Alto Aguas Calientes y Medio Bajo Ilave, son las subcuencas que presentan mayores áreas con este grado de erosión (pérdidas de suelo entre 25 a 50 tn/ha/año), siendo la subcuenca Uncallane con 366.90 km² la que presenta la mayor superficie, seguido de la subcuenca Alto Aguas Calientes con 235.89 km² y la subcuenca Medio Bajo Ilave con 224.03 km², mientras tanto la subcuenca que tiene la menor superficie con este grado de erosión es la subcuenca Medio Ilave con 14.03 km².

Respecto al grado de erosión moderada, las subcuencas Uncallane, Medio Alto Ilave y Alto Aguas Calientes, son las subcuencas que presentan mayores áreas con este grado de erosión (pérdidas de suelo entre 5 a 25 tn/ha/año), siendo la subcuenca Uncallane con 570.43 km² la que presenta la mayor superficie, seguido de la subcuenca Medio Alto Ilave con 397.85 km² y la subcuenca Alto Aguas Calientes con 299.32 km², mientras tanto la subcuenca Medio Ilave tiene la menor superficie con este grado de erosión siendo de 39.47 km².

Con respecto al grado de erosión baja, las subcuencas Uncallane, Alto Aguas Calientes y Medio Bajo Ilave, son las que presentan mayores áreas con este grado de erosión (pérdidas de suelo menores a 5 tn/ha/año), siendo la subcuenca Uncallane con 209.56 km² la que presenta la mayor superficie, seguido de la subcuenca Alto Aguas Calientes con 146.17 km² y la subcuenca Medio Bajo Ilave con 7.131.86 km², mientras tanto la subcuenca que tiene la menor superficie con este grado de erosión es la subcuenca Medio Ilave con 7.41 km².

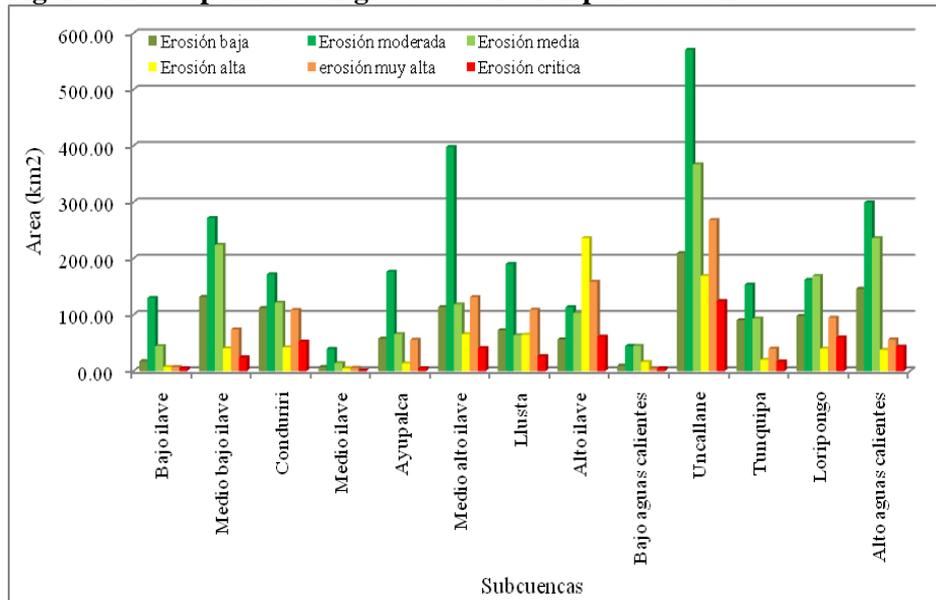
Sin embargo todas las subcuencas presentan extensiones considerables de erosión moderada y media que con el paso del tiempo llegara a pasar a grados de erosión alta y muy alta si no se toman las medidas preventivas a tiempo con una buena planificación en el uso del suelo.

Cuadro 4.9: Perdida de suelos en km² y porcentaje de las subcuencas

Subcuencas	Erosión baja		Erosión moderada		Erosión media		Erosión alta		Erosión muy alta		Erosión crítica		TOTAL (km ²)
	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	Área (km ²)	%	
Bajo ilave	17.69	8.4	129.95	61.55	44.33	21.00	7.31	3.46	7.24	3.43	4.62	2.19	211.12
Medio bajo ilave	131.86	17.2	271.90	35.49	224.03	29.24	40.35	5.27	73.75	9.63	24.24	3.16	766.12
Conduriri	111.81	18.4	171.93	28.28	121.34	19.96	42.37	6.97	108.37	17.83	52.12	8.57	607.94
Medio ilave	7.41	10.3	39.47	55.11	14.03	19.59	4.66	6.51	5.55	7.74	0.50	0.70	71.63
Ayupalca	57.73	15.5	176.25	47.23	65.47	17.55	13.62	3.65	55.44	14.86	4.67	1.25	373.17
Medio alto ilave	113.41	13.1	397.85	45.90	118.23	13.64	65.50	7.56	131.21	15.14	40.58	4.68	866.79
Llusta	72.63	13.8	190.22	36.16	63.37	12.05	64.44	12.25	108.91	20.70	26.54	5.04	526.11
Alto ilave	56.01	7.7	113.38	15.57	102.98	14.15	236.21	32.44	158.54	21.78	60.90	8.37	728.02
Bajo aguas calientes	9.81	7.9	44.52	35.85	44.74	36.03	15.99	12.87	4.45	3.58	4.69	3.77	124.19
Uncallane	209.56	12.3	570.43	33.39	366.90	21.48	169.00	9.89	268.21	15.70	124.21	7.27	1708.31
Tunquipa	90.35	21.8	153.34	37.08	93.06	22.50	20.08	4.85	39.81	9.63	16.91	4.09	413.55
Loripongo	97.54	15.7	161.92	26.02	169.00	27.16	39.83	6.40	94.60	15.20	59.42	9.55	622.32
Alto aguas calientes	146.17	17.9	299.32	36.60	235.89	28.84	37.58	4.59	55.88	6.83	43.07	5.27	817.93

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.14: Superficie con grados de erosión por subcuencas



Fuente: Elaboración propia

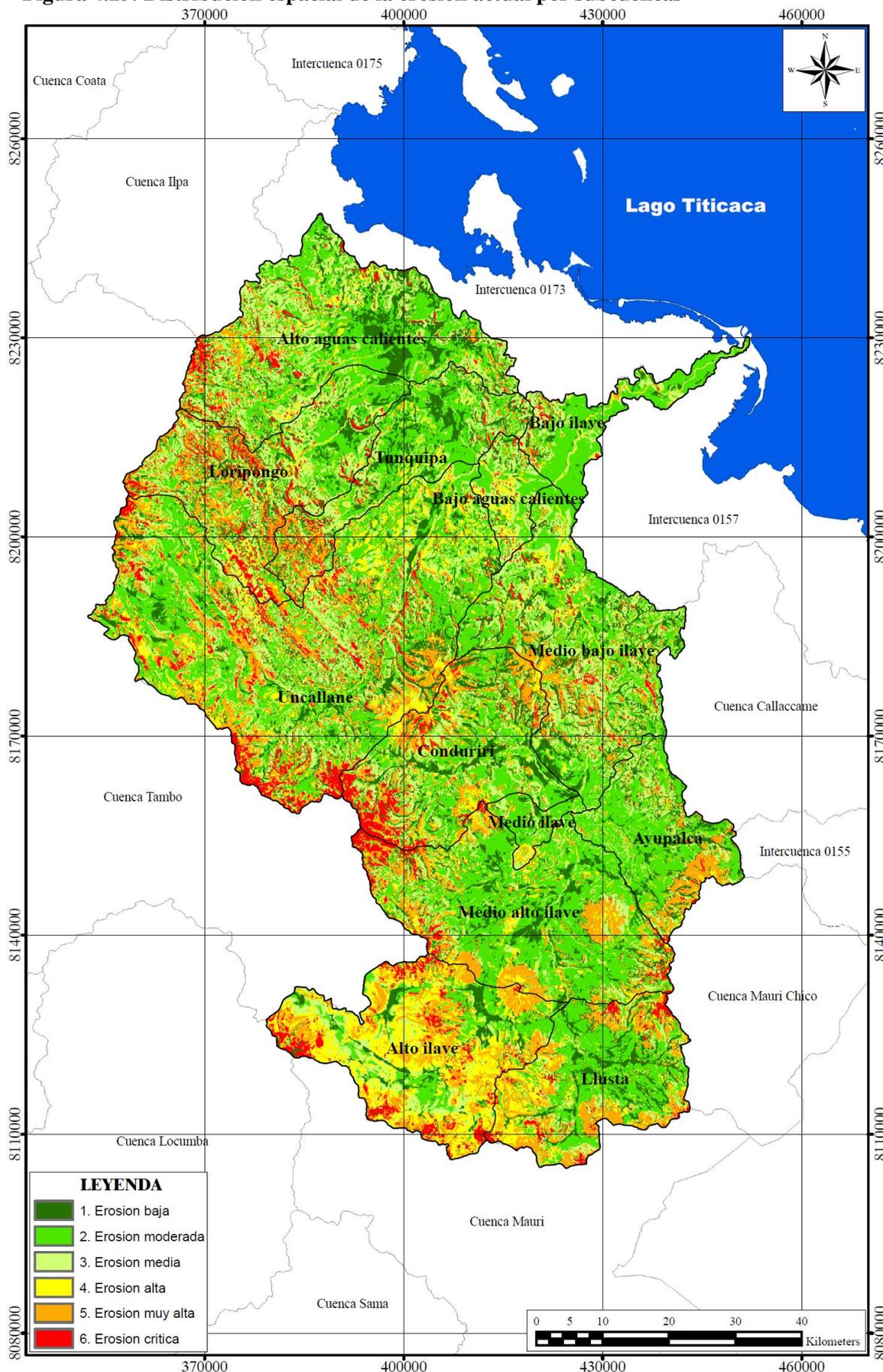
En la figura 4.15, se presenta la erosión actual (tn/ha/año) por subcuencas en la cual se puede observar claramente que los mayores grados de erosión (perdidas mayores a 50 tn/ha/año), se registran en las partes altas de las subcuencas donde existen características propicias a la erosión como pendientes mayores a 20% y suelos con nula o mínima presencia de cobertura vegetal.

Respecto al valor máximo y mínimo de pérdida de suelo encontrado en la cuenca del río Ilave para la situación actual es del orden de 612.78 tn/ha/año; como el valor más alto, ubicado en una mínima superficie de la cuenca y de 0.153 tn/ha/año; como el valor más bajo de la pérdida de suelo, los cuales en algunos casos es inferior en otros similar y en otros superiores a los reportados en la bibliografía consultada; por ejemplo, Quintanilla (2008), para la cuenca del río Caine del departamento de Cochabamba, reporta un valor máximo de pérdida de suelo de 1945 tn/ha/año. Ancco (2006), para la microcuenca del río Coraraca, ubicada dentro de la cuenca del río Ilave, encontró un 33.92% de la superficie con un riesgo de degradación por erosión hídrica muy alto (>200 tn/ha/año) y una superficie de 6.15% con riesgos de degradación ligera (<10 tn/ha/año). Por otro lado Montes *et al*, (2000), para la cuenca del río Santa Catarina del estado de Querétaro en México, halló en un gran porcentaje de la superficie un alto riesgo de erosión, con índices muy superiores a los 80 tn/ha/año. Mejía *et al*, (2009), en la microcuenca Aguas Calientes, Venezuela, manifiestan que la erosión que predomina es la erosión ligera en un 55% de su

superficie, con una pérdida anual inferior a 20 tn/ha/año y un 22.5% de la microcuenca muestra una erosión severa, con pérdidas de suelo que supera las 300 tn/ha/año. Guanca (2010), para la cuenca del río Pilcomayo, reporto un valor máximo promedio de pérdida de suelo de 1050 tn/ha/año. Alvarado (2002), para el estado de Tlaxcala, encontró que la velocidad de la erosión hídrica es de 471.28 tn/ha/año como máxima y mínima de 1.77 tn/ha/año. Santacruz (2011), para la cuenca del río Cahocacán, localizada en la costa Chiapaneca, México, encontró que las pérdidas de suelo van desde 3.9 tn/ha/año hasta valores de 8010.20 tn/ha/año. Tejerina (2010), encontró para la alta cuenca del río Bermejo, valores de pérdida de suelos desde 9 tn/ha/año; hasta valores máximos de 437 tn/ha/año. Torres *et al.* (2003), encontraron para la cuenca el Josefino, localizada en el municipio Jesús María, estado de Jalisco, valores clasificados entre altos y muy altos, que van de 107 a 200 tn/ha/año. Laura (2010), para la cuenca del río Juramento en la provincia de Salta, determino valores mínimos de 1 ton/ha/año hasta valores máximos de 223 ton/ha/año. López *et al.* (1998), para la cuenca río Guadiana en Puerto Rico, encontró pérdidas de suelos de 534 tn/ha/año en suelos desnudos. Pérez (2001), para el territorio Colombiano, reporto pérdidas de suelo que oscilan entre 1.66 y 426 tn/ha/año. Las diferencias observadas, se deben principalmente a las condiciones físicas y climáticas, las cuales no son similares a la cuenca estudiada (topografía, precipitación pluvial, suelos, uso y cobertura de suelo), lo que propicia que los resultados obtenidos en la presente investigación no sean del todo similares con los de la bibliografía revisada.

Por otro lado Rafaelli (2003), menciona que la estimación cuantitativa precisa de la pérdida de suelos por erosión hídrica de una cuenca, resulta pues, improbable en la práctica, a excepción de aquellos sitios en que se disponga información fehaciente para proceder al ajuste de la metodología, debido a la complejidad del proceso erosivo, a la cantidad de factores que influyen en el mismo y a la escala de los fenómenos en juego que involucran desde cuestiones tan puntuales como la cohesión de las partículas del suelo hasta parámetros de orden espacial, como la temperatura o las precipitaciones en la cuenca. Quisca (2011), señala que al hacer estudios de estimación de sedimentos se puede tener hasta 400% de error y si esta dentro de ese rango de error es bueno el estimativo. No obstante, la metodología utilizada dio resultados adecuados a los fines de caracterizar las zonas más susceptibles de presentar procesos de erosión hídrica y se constituye en una herramienta eficaz a la hora de evaluar alternativas de manejo y conservación de cuencas.

Figura 4.15: Distribución espacial de la erosión actual por subcuencas



V. CONCLUSIONES

- Los resultados alcanzados permiten obtener una visión general de manera cualitativa y cuantitativa de la variación espacial de los sectores más susceptibles a la erosión hídrica en la cuenca del río Ilave, constituyéndose en un instrumento de gestión fundamental a partir del cual se podrá realizar la planificación y conservación de la cuenca en materia del recurso suelo.
- El uso de información obtenido por teledetección y la utilización de los sistemas de información geográfica, se constituyen en herramientas básicas para la obtención y evaluación de las variables que afectan la erosión de los suelos, facilitando al analista la determinación adecuada de las variables, obviando las dificultades y complejidades propias del terreno, de manera eficaz, rápida y de menor costo.
- Los valores obtenidos a través del modelo USLE, muestran que la cuenca del río Ilave posee, en un 5.9% de su superficie un riesgo de degradación por erosión hídrica crítica (>200 tn/ha/año), los riesgos de degradación muy alta (100 – 200 tn/ha/año) cubren un 14.19% de la cuenca, los riesgos de degradación alta (50 - 100 tn/ha/año) ocupan una superficie de 9.65%, los riesgos de degradación media (25 - 50 tn/ha/año) ocupan una superficie de 21.23%, los riesgos de degradación moderada (5 – 25 tn/ha/año) ocupan una superficie de 34.71% y los riesgos de degradación baja (<5 tn/ha/año) cubren una superficie de 14.32%, lo cual muestra que el 70.26% de la cuenca presenta problemas de degradación baja, media y moderada la cual podría pasar a grados de erosión alta, muy alta y crítica si no se toman las medidas de mitigación a tiempo.
- Actualmente la subcuenca Uncallane es la que registra los mayores grados de pérdida de suelos seguido de las subcuencas Alto Ilave, Medio Alto Ilave, Conduriri, LLusta y Loripongo, el resto de subcuencas presentan menores grados de erosión. Las zonas más susceptibles a la erosión se registraron en las partes altas de las subcuencas por presentar pendientes que superan los 20% y escasa presencia de cobertura vegetal.

VI. RECOMENDACIONES

- Se debe dar especial atención a corto plazo a las subcuencas que presentan los mayores grados de erosión, priorizando las cabeceras de las subcuencas, las cuales presentan mayor susceptibilidad a la pérdidas de suelos.
- Con el fin de disminuir el efecto del factor topográfico (LS), se deben establecer barreras vivas, muertas y construir zanjas de infiltración en contra del sentido de la pendiente con el fin de disminuir la velocidad del agua de escorrentía y con ello su capacidad erosiva y de esta forma se implementen medidas que mitiguen y controlen el proceso erosivo, para poder asegurar el recurso suelo para las futuras generaciones.
- Se deben construir diques o barreras transversales en el interior de las cárcavas para disminuir la velocidad del agua y favorecer la sedimentación lo cual permitirá estabilizar la pendiente del lecho de las cárcavas.
- Concientizar a la población en general de la cuenca del río Ilave respecto al uso adecuado del suelo según su capacidad de uso mayor así como también en la construcción de obras de conservación de suelos (tales como las descritas en los puntos anteriores) y finalmente realizar un plan de manejo y conservación de suelos dentro de una visión integral.
- Es importante la continuidad de este tipo de investigaciones con miras a una mejor clasificación que conlleve a un óptimo uso y manejo del suelo, con la adopción de prácticas de conservación de suelos a partir de las necesidades de cada cuenca. El éxito de la conservación de cuencas no está asegurado si no se garantiza la actualización periódica de la información.
- Se recomienda realizar un estudio multitemporal de por los menos 15 a 20 años, de tal manera que se pueda identificar las zonas que presentan un incremento acelerado de la erosión de suelos, y de esta manera tomar acciones inmediatas de mitigación para controlar el problema ambiental.
- El modelo USLE permite estimar la distribución espacial de la pérdida de suelos y carece de capacidad de calcular la deposición a lo largo de las laderas o depresiones, razón por la cual se recomienda para posteriores investigaciones aplicar modelos como USPED, CREAMS y otros que consideran la deposición de sedimentos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achuy, J. 2006. Sistemas de Información Geográfica. Lima, PE. Editorial Grupo Universitario, 321 p.
- Aguilo, J; Castillo, V; Insúa, J; Llop, R; López, F. 1984. Metodología para la evaluación de la erosión hídrica. Madrid, ES. s.n.t.
- ALA-I (Administración Local de Agua Ilave, PE). 2009. Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Ilave. Puno, PE. 276 p.
- Alvarado, M. 2002. Diagnóstico de la erosión hídrica en el estado de Tlaxcala. Tlaxcala. MX. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios Sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Miguel Othon de Mendizabal N.º 485.
- Arnoldus, HJ. 1978. An approximation of rainfall in the Universal Soil Loss Equation. New York, US. In M De Boodt and D. Gabriels (Editors). s.p.
- Ancco, Y. 2006. Modelamiento de la erosión hídrica en la microcuenca del río Coraraca – Ilave. Tesis Ing. Puno, PE. Universidad Nacional del Altiplano Puno, 98 p.
- Barreda, CE. 2002. Propuesta de zonificación agroecológica y de sistemas agropecuarios en la cuenca de los ríos Ilave - Huenque (Puno, Perú). Tesis Ing. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina, 93 p.
- Burrough, A. 1986. Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford, US. s.e., 194 p.
- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. 2 ed. Madrid, ES. RIALP, 450 p.
- Chuvieco, E. 1996. Fundamentos de teledetección espacial, 3 ed. Madrid, ES. RIALP, 568 p.
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental. Madrid, ES. Ariel Ciencia, 586 p.
- Cubero, D. 1996. Manual de manejo y conservación de suelos y aguas. San José, CR. s.e., 278 p.

European Space Agency, FR. 2000. The digital globe constellation. (en línea). Paris, FR. Consultado 20 ago. 2011. Disponible en <http://www.digitalglobe.com/index.php/82/Content+Collection+Systems>

Fernández, IA; Herrero, E. 2001. El satélite Landsat. Valladolid, ES. s.e., 37 p.

Foster, GR; Lane, LJ; Nowlin, JD; Laflen, JM; Young, RA. 1981. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, N.º 24: 1253–1263.

Fournier, F. 1960. Climat et erosion: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques, Ed. Presses Universitaires de France. París, FR. 201 p.

Godoy, RE. 2005. Aplicaciones de la teledetección en el análisis de la concentración de clorofila en las costas de la cuarta región de Coquimbo. Coquimbo, CL. s.n.t.

Goyo, S. 2007. Introducción a la teledetección. Caracas, VE. IGVSB, s.p.

Greenland, DJ; Lal, R. 1975. Soil conservation and management in the humid tropics. New York, US. Bresboni, 283 p.

Guanca, AV. 2010. Determinación de la erosión hídrica de los suelos de la cuenca del río Pilcomayo - Salta. Tesis Ing. Salta, AR. Universidad Nacional de Salta, 158 p.

Guzmán, OF. 2007. Fundamentos físicos de teledetección. Bogotá, CO. s.e., 85 p.

Hellin, J. 2004. De erosión de suelos a suelos de calidad, Revista Agroecológica LEISA, N.º 19(4): 70-71

Hernández, G. 2010. Cálculo de la tasa de erosión hídrica y Propuesta de obras de conservación de suelo en la línea de tendido eléctrico la Ventosa-Juile, Oaxaca. Tesis Ing. Chapingo, MX. Universidad Autónoma Chapingo, 178 p.

Hill, J; Hostert, P; Tsiourlis, G; Kasapidis, P; Udelhoven, TH; Diemer, C. 1998. Monitoring 20 years of increased grazing impact on the greek island of crete with earth observation satellites. Journal of Arid Environments. N.º 39: 165-178.

Huxhold, WE. 1991. An introduction to urban geographic information systems. New York, US. Editorial Oxford University Press, s.p.

INTECSA (Internacional de Ingeniería y Estudios Técnicos S.A. IT); AIC PROGETTI (Progettazioni Coordinate di Architettura e Ingegneria, IT); CNR (Compagnie Nationale du Rhone, IT). 1993. Plan Director Global Binacional de protección prevención de inundaciones y aprovechamiento de los recursos del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y Salar de Coipasa (Sistema TDPS): Estudio de suelos y erosión. Puno, PE, s.p.

ISRIC (Centro Internacional de Referencia e Información en Suelo); UNEP (Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas, CH). 1990. Valoración global de la degradación del suelo. s.l., 35 p.

Iturrate, E. 1998. Curso básico de teledetección con ENVI. (en línea). Consultado 15 jul. 2011. Disponible en <http://www.innovanet.com.ar/gis/TELEDETE/TELEDETE/pant1.htm>

Jensen, J. 1996. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. 2 ed. New Jersey, US. Prentice Hall, 318 p.

Kappelle, M. 2009. Erosión de Suelos. s.l. Fundación global democracia y desarrollo, 5 p.

Kyoung, L; Myung, S; Bernard, Engel; Zhenxu, T; Joongda, Choi; Ki-Sung, K. 2005. GIS-based sediment assessment tool. Revista Elsevier. N. ° 64: 61-80.

Laura, L. 2010. Estimación de la Pérdida de Suelos por Erosión Hídrica en la Cuenca del Río Juramento – Salta. Tesis Ing. Salta, AR. Universidad Nacional de Salta, 103 p.

López, T; Aidé, M; Sactena, N. 1998. The effect of land use on soil erosion in the uadiana watershed in Puerto Rico. In : Caribbean Journal of Science. N.° 3-4: 298-307.

Mármol, LA. 2006. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas y corrección de Torrentes. Salta, AR. s.n.t.

Mejía, J; Dal Pozzo, F; Montilla, P; Torres, G. 2009. Evaluación cuali-cuantitativa de la erosión hídrica en la microcuenca Aguas Calientes, estado Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, N.° 2: 203-223.

Montes, L; Domínguez, MA; Ventura, E. 2000. Utilización de un SIG en la estimación del riesgo de erosión hídrica en la cuenca Santa Catarina. Tesis M.Sc. Queretaro, MX. Universidad Autónoma de Queretaro, s.p.

- Montesinos, S. 1990. Teledetección: su utilización en la cuantificación y seguimiento de recursos hidráulicos aplicados al regadío. Madrid, ES. s.e., 108 p.
- Morgan, RPC. 1974. Estimating regional variations in soil erosion hazard in Peninsular Malaysia. *Malayan Nature Journal*. N.º 28: 94–106.
- Morgan, RPC. 2005. *Soil erosion and conservation*. 3 ed. Malden, US. Blackwell Publishing Ltd, 299 p.
- Moreno, DA; Renner, I. 2007. *Gestión integral de cuencas: la experiencia del proyecto regional cuencas andinas*. 1 ed. Lima, PE. s.e., 234 p.
- Moreira, MA. 2003. *Fundamentos do sensoramento remoto e metodologías de aplicacao*. 2 ed. Vicosá, BR. s.e., 307 p.
- Núñez, J. 2001. *Manejo y conservación de suelos*. 1 ed. San José, CR. Editorial Universidad Estatal a Distancia, 253 p.
- Núñez, V; García, P. 2000. *Uso de herramientas de los sistemas de información geográfica (SIG) en la ordenación de cuencas hidrográficas*. Salta, AR. s.n.t.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial, CH). 2006, *El clima y la degradación de tierras*. Génève, CH. Departamento del programa Mundial sobre el Clima, 32 p.
- Pérez, SJ. 2001. *Modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia utilizando Sistemas de información geográfica*. Tesis Ing. Bogotá, CO. Universidad Industrial de Santander, 77 p.
- Quintanilla, M. 2008. *Producción hídrica y de sedimentos en la cuenca del río Caine del departamento de Cochabamba*. Tesis M.Sc. Cochabamba, BO. Universidad Mayor de San Simón, s.p.
- Quisca, SI. 2011. *Introducción al transporte de sedimentos*. (audio). La Molina, PE, Universidad Nacional Agraria La Molina. 1 disco. (120 min, 45 seg), son.
- Rafaelli, S. 2003. *Paisaje erosivo en cuencas de montaña*. Tesis Dr. Córdoba, AR. Universidad Nacional de Córdoba, 196 p.

- Ramos, CL. 2001. Modelamiento ambiental para el análisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca media y alta del río Cañete y determinación del mapa de erosión. Lima, PE. 26 p.
- Rodríguez, OE. 2005. Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales. Bogotá, CO. s.n.t.
- Romero, FS. 2006. La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental, Revista Científica de la Sociedad Española de Acuicultura. N.º 24: 13-41
- Roose, EJ. 1975. Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest: vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales, ORSTOM, Adiopodoumé, Ivory Coast, 108 p.
- Rullan, CD. 2002. Estudio bitemporal de la vegetación en una zona afectada por incendios en el municipio de Santiago. Tesis M.Sc. Monterrey, MX. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, s.p.
- Santacruz, G. 2011. Estimación de la erosión hídrica y su relación con el uso de suelo en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas. Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe, Aqua-LAC. N.º 1: 45-54.
- Skidmore, A. 2002. Environmental modeling with GIS and Remote Sensing. New York, US. British Library Cataloging in Publication Llatu, 259 p.
- Smith, RB. 2001. Introducción a la percepción remota del ambiente (PRA). New York, US. s.e., 32 p.
- Sobrino, JA; Raissouni, N; Kerr, Y; Oliosio, A; Lopez, MJ; Belaid, A; El Kharraz, MH; Cuenca, J; Dempere, L. 2000. Teledetección. Valencia, ES. Editorial Universidad de Valencia, 467 p.
- Suarez, J. 2001. Control de erosión en zonas tropicales. Bucaramanga, CO. División Editorial Universidad Industrial de Santander, 545 p.
- Tejerina, FG. 2010. Determinación de la Erosión Hídrica Potencial de los Suelos de la Alta Cuenca del Río Bermejo (Salta) Implementado en Formato SIG. Tesis Ing. Salta, AR. Universidad Nacional de Salta, 145 p.

Torres, E; Cortes, J; Mejía, E; Exebio, A; Santos, AL; Delgadillo, ME. 2003. Evaluación de la degradación de los suelos en la cuenca el Josefino, Jesús María, Jalisco. Revista TERRA Latinoamericana. N.º 1: 117-126

Vargas, E. 1992. La fotografía aérea y su aplicación a estudios geológicos y geomorfológicos. La Paz, BO. s.e., 438 p.

Vásquez, A. 2000. Manejo de cuencas alto andinas. Tomo 1. Lima, PE. Escuela superior de administración de aguas "Charles Sutton", 516 p.

Villanueva, GH; Osinaga, RG; Chávez, AP. 2004. El uso sustentable de los suelos - tecnología de los suelos agrícolas. Salta, AR. s.n.t.

Wischmeier, WH; Johnson, CB; Cross, BV. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites, Journal of Soil and Water Conservation. N.º 26: 189–193.

Wischmeier, WH; Smith, DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Research Service Handbook 537.

Yéñez, A; Giner, A. 2000. Clasificación digital de imágenes por satélite. (en línea). Consultado 25 abr. 2011. Disponible en <http://mural.uv.es/gislo/telemedida.pdf>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Fotografías de la salida al campo

Anexo 2: Precipitación total mensual – promedio multimensual (1960-2007), estaciones de la cuenca del río Ilave y cuencas vecinas

Anexo 3: Distribución espacial de la precipitación total mensual de la cuenca del río Ilave

Anexo 4: Bandas originales de la escena 2-71 (Fecha: 27/08/2011)

Anexo 5: Bandas originales de la escena 2-72 (Fecha: 27/08/2011)

Anexo 6: Modelos de elevación digital: 22-16 y 23-16

Anexo 1: Fotografías de la salida a campo



MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS EN LA FASE DE CAMPO PARA RECOLECTAR AREAS DE ENTRENAMIENTO PARA EL PROCESO DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA



TOMANDO COORDENADAS CON GPS DEL TIPO DE COBERTURA NO IDENTIFICADA EN LA ETAPA DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA E INTERPRETACIÓN VISUAL DE LA IMAGEN



VISTA PANORAMICA DE LA PARTE ALTA DE LA SUBCUENCA LLUSTA EN LA CUAL SE PUEDE OBSERVAR LA ESCASA VEGETACIÓN QUE PRESENTAN LOS SUELOS



LA IMAGEN CORRESPONDE A LA SUBCUENCA MEDIO ALTO ILAVE EN LA CUAL SE OBSERVA EROSIÓN EN CARCAVAS



VISTA PANORAMICA DE LA PARTE ALTA DEL DISTRITO DE MAZOCRUZ EN LA CUAL SE ESTA PRESENTANDO PROBLEMAS MUY GRAVES DE EROSIÓN DE SUELOS



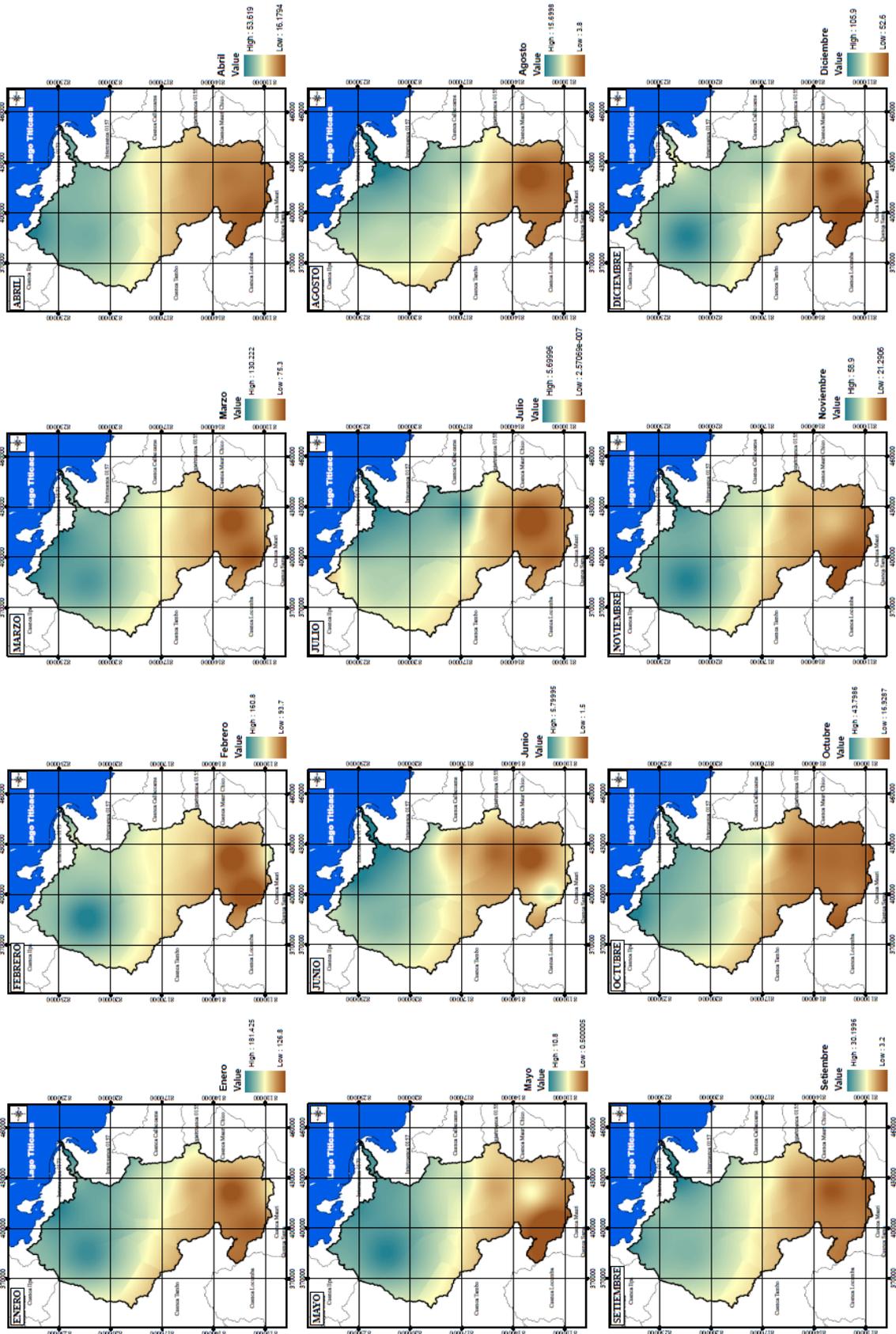
FOTOGRAFÍA DE LA PARTE ALTA DE LA SUBCUENCA ALTO ILAVE, DONDE SE OBSERVA POCA PROTECCIÓN AL SUELO POR LA ESCASA PRESENCIA DE COBERTURA VEGETAL

Anexo 2: Precipitación total mensual – Promedio multimensual (1960-2007) Estaciones de la Cuenca del río Ilave y Cuencas Vecinas

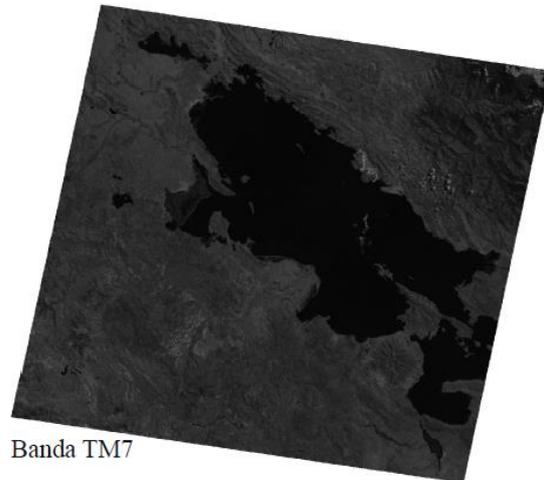
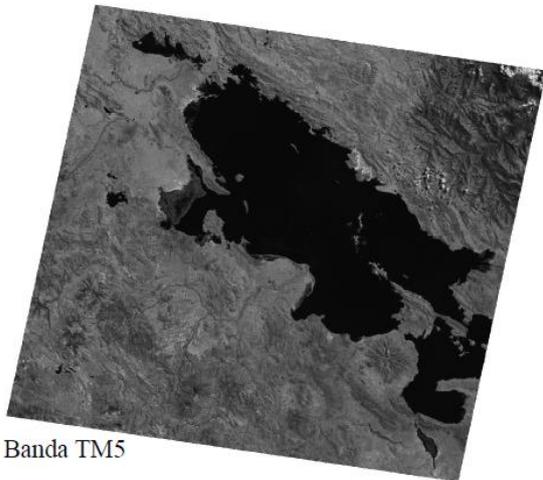
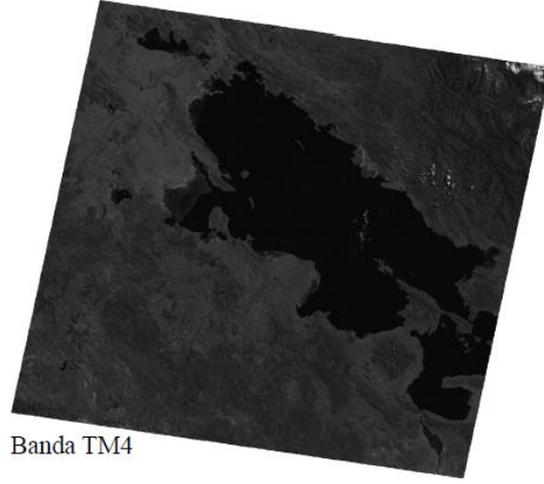
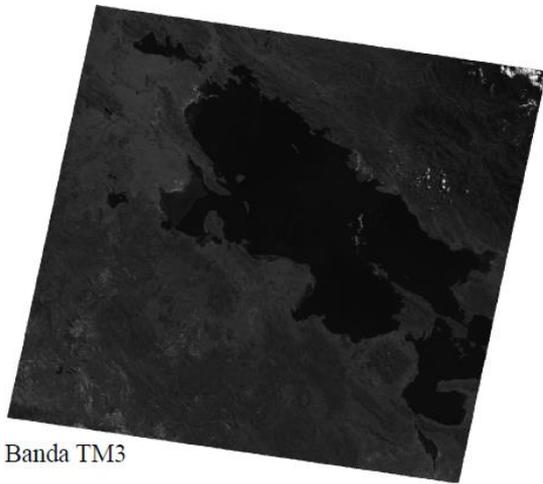
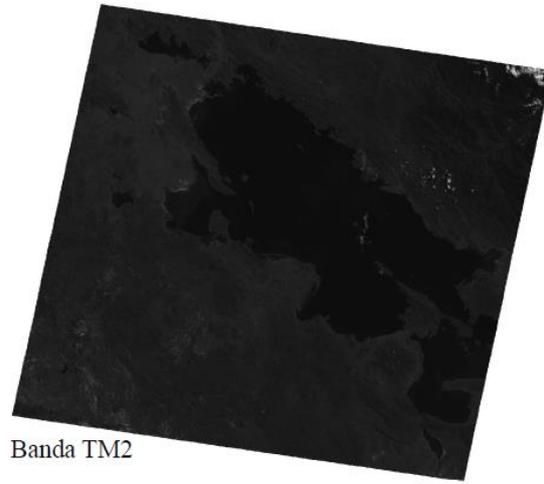
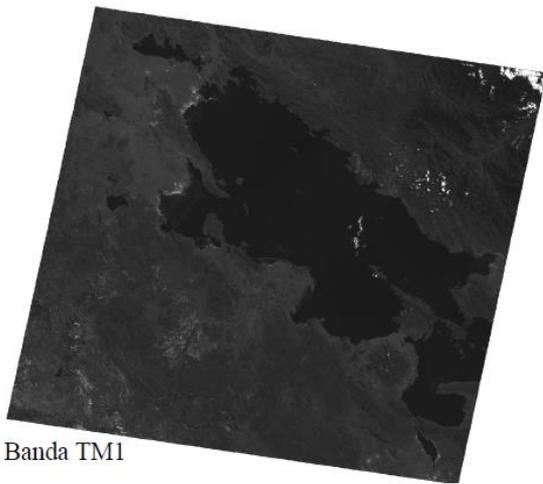
N°	ESTACIÓN	MESES												Total Anual
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
1	Capazo	158.4	144.1	103.2	19.0	3.8	3.7	1.8	4.5	3.4	16.4	26.5	76.7	561.5
2	Vilacota	132.1	132.4	101.6	12.9	2.1	1.4	2.9	4.9	3.1	14.1	15.0	49.7	472.2
3	Coypa Coypa	131.4	93.7	77.9	17.7	0.5	4.0	1.1	5.8	7.4	21.1	25.2	52.6	438.4
4	Chichillapi	126.8	97.3	75.3	20.1	6.7	1.5	0.0	3.8	3.2	18.6	36.7	55.4	445.4
5	Mazocruz	142.8	125.1	96.3	23.3	4.7	2.0	2.0	8.1	8.7	18.0	33.0	68.9	532.9
6	Pizacoma	167.2	131.1	93.3	31.6	4.2	3.7	2.7	10.7	14.3	18.4	34.4	101.2	612.8
7	Chilligua	158.0	129.1	105.3	31.3	7.6	2.8	5.2	11.6	17.1	31.5	44.9	91.6	636
8	Yorohoco	170.2	135.9	99.4	28.9	6.2	4.8	3.4	10.4	19.8	26.9	43.3	98.8	648
9	Pocoaque	173.1	121.6	94.3	43.0	7.9	6.6	7.3	11.8	21.8	35.3	40.8	85.3	648.8
10	Juli	202.9	170.9	151.2	55.0	12.3	5.5	6.5	15.9	31.4	41.1	59.8	115.1	867.6
11	Ilave	168.9	134.8	115.3	43.6	9.8	5.8	5.7	15.7	30.2	37.6	56.8	80.8	705
12	Rincon de la Cruz	181.6	143.5	129.7	43.4	10.4	5.6	5.3	12.9	22.3	38.0	51.6	93.7	738
13	Laraqueri	179.0	160.8	125.7	44.9	10.8	4.7	4.1	10.9	23.9	35.3	58.9	105.9	764.9
14	Puno	168.8	143.6	131.1	54.5	9.5	4.0	2.4	11.9	28.6	44.5	52.1	88.2	739.2
15	Mañazo	155.9	136.7	108.0	40.0	6.3	3.4	2.4	5.7	18.9	32.8	55.1	92.7	657.9
16	Pampa Umalzo	104.6	100.7	91.0	21.6	2.1	1.8	0.9	5.4	5.5	6.1	12.4	45.0	397.1
17	Ichuña	139.8	116.3	85.3	29.9	5.1	2.9	2.6	6.2	9.9	19.7	34.6	83.0	535.3

Fuente: ALA Ilave, Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del Río Ilave, 2009

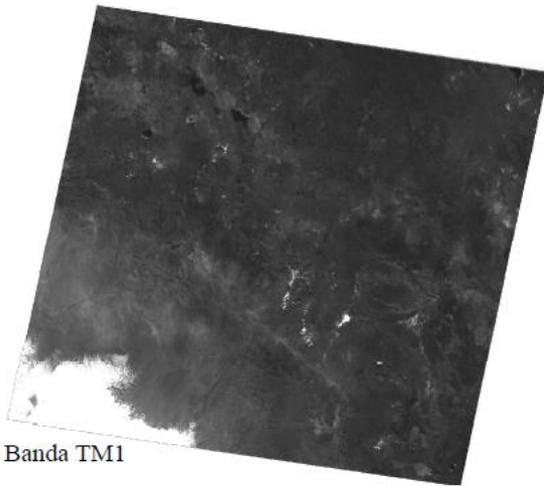
Anexo 3: Distribución espacial de la precipitación total mensual de la Cuenca del río Ilave



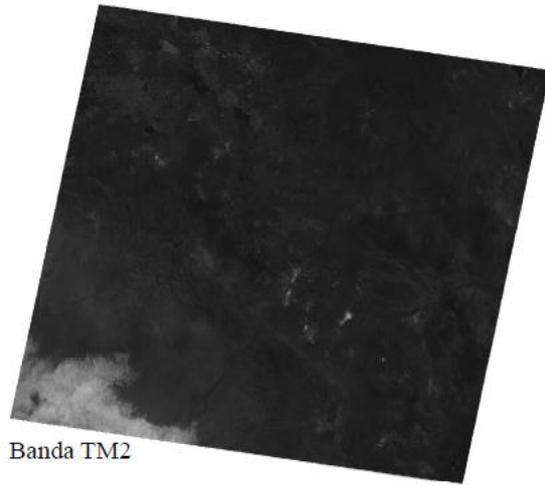
Anexo 4: Bandas originales de la escena 2-71 (Fecha: 27/08/2011)



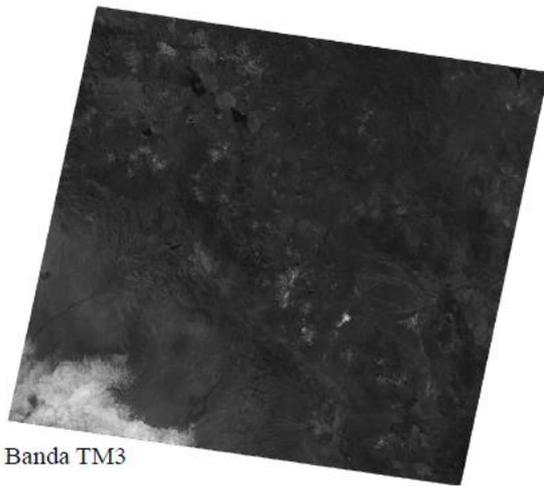
Anexo 5: Bandas originales de la escena 2-72 (Fecha: 27/08/2011)



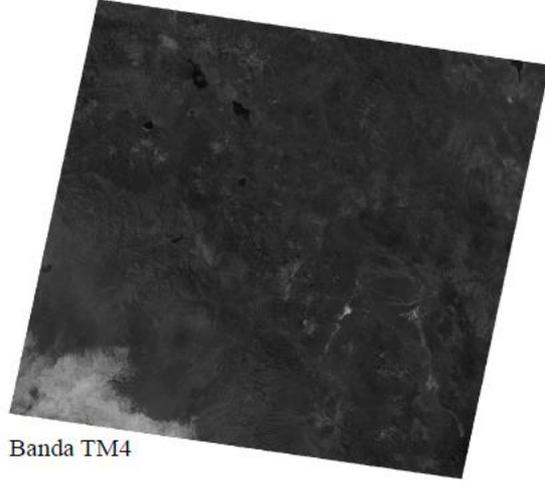
Banda TM1



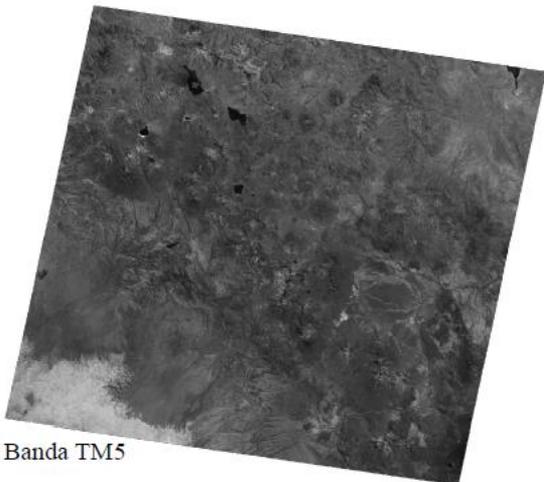
Banda TM2



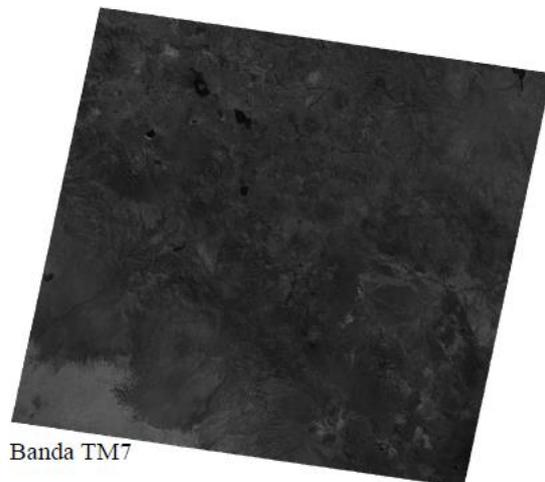
Banda TM3



Banda TM4



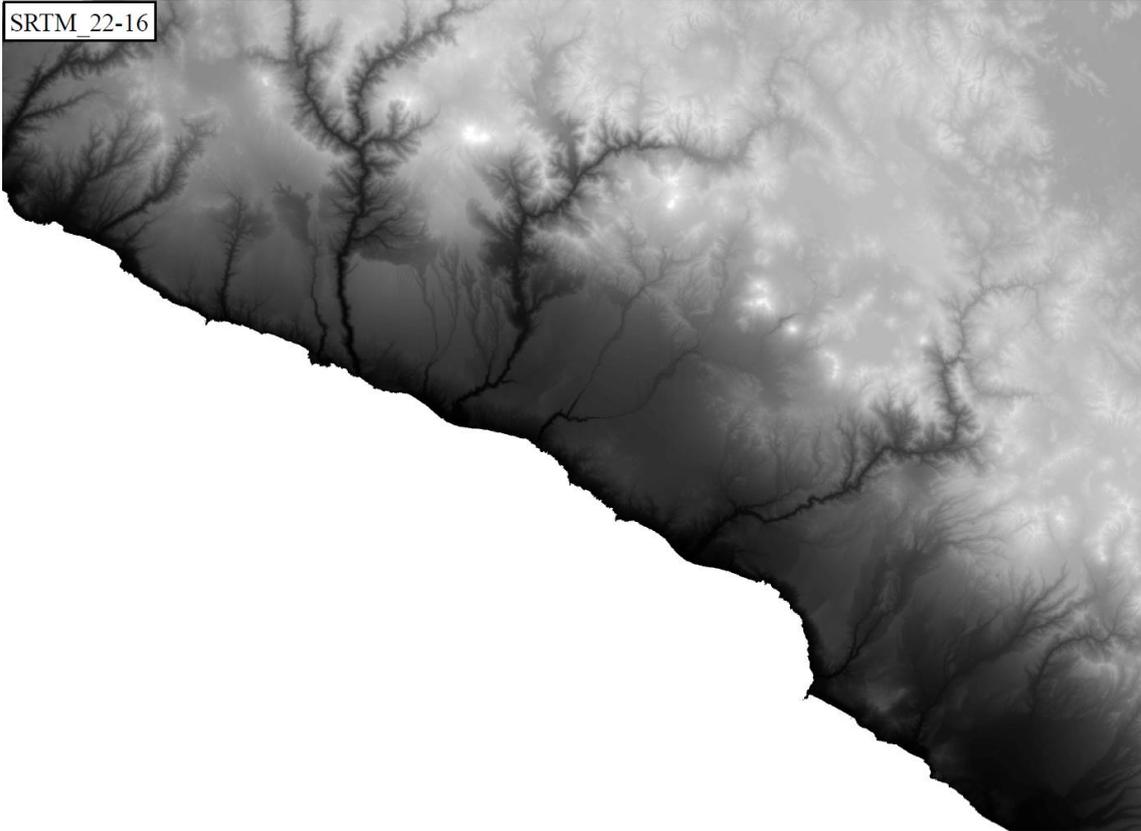
Banda TM5



Banda TM7

Anexo 6: Modelos de elevación digital: 22-16 y 23-16

SRTM_22-16



SRTM_23-16

